فصل اول

«مبانی حفریات زیرزمینی»

مقدمه

ضرورت و فواید تونل‌سازی بر کسی پوشیده نیست. در سال‌های اخیر ایجاد فضاهای زیرزمینی افزایش یافته و این موضوع باعث سهولت در اجرای کار زیرزمینی با تأثیر حداقل بر سازه‌های سطحی و ترافیک شده است. انتقال ترافیک به زیر سطح زمین سبب بالارفتن کیفیت زندگی در سطح شهرها شده است. همچنین استفاده از فضاهای زیرزمینی جهت استخراج مواد معدنی در حال افزایش است.

تعریف

تونل: راه عبوری در زیر سطح زمین (یا آب) که به‌صورت افقی (تقریباً افقی) قرار دارد و دو سمت آن با سطح در ارتباط است.

نکته۱: در تونل‌ها یک بعد (امتداد تونل) در مقابل دو بعد دیگر بسیار بزرگ‌تر است.

نکته۲: به بازکننده‌های زیرزمینی افقی و یا تقریباً افقی با یک راه دسترسی به زمین، تونل یک‌دهانه یا Adit می‌گویند.

چاه: معبری زیر سطح زمین (یا در ارتباط با سطح) که به‌صورت قائم حفر شده است.

نکته۳: در چاه‌ها نیز یک بعد در مقابل دو بعد دیگر بزرگ‌تر است.

مغارها: شامل فضاهای بزرگی زیر سطح زمین هستند که طول فضا و ابعاد سطح مقطع حفره با یکدیگر هم‌خوانی دارند و نزدیک به‌هم هستند.

نکته۴: مغارها جهت نیروگاه‌های برق ـ آبی، ذخیره‌سازی نفت و گاز، استقرار ورزشگاه‌ها و ... کاربرد دارند.

تقسیم‌بندی تونل‌ها

فضاهای زیرزمینی از جنبه‌های گوناگونی، تقسیم‌بندی می‌شوند در اینجا دو نوع تقسیم‌بندی عمومی ذکر شده است. یکی از این جنبه‌ها، جنبه کاربری فضای زیرزمینی است که به سه بخش حمل‌ونقل، انبارها و نیروگاه‌ها و پناهگاه‌ها تقسیم می‌شوند.

تونل‌های حمل‌ونقل شامل تونل‌های عبورومرور افراد و وسایل نقلیه (مترو، راه‌آهن، پیاده‌رو و ...)، تونل‌های انتقال آب و فاضلاب و دسته سوم تونل‌های سرویس (انتقال برق و ...) می‌باشند.

انبارها و نیروگاه‌ها، فضاهای بزرگی در زیر سطح زمین هستند که مکان‌هایی برای دفن زباله‌های اتمی، نیروگاه‌های برقی ـ آبی، پارکینگ و همچنین ورزشگاه‌ها را شامل می‌شود.

بخش سوم که شامل پناهگاه‌ها می‌شود مکان‌هایی در زیر سطح زمین برای محافظت از جان انسان‌ها و همچنین برای مخفی نگه‌داشتن ادوات و وسایل حیاتی به‌کار می‌رود.

کاربری فضاهای زیرزمینی	کاربرد
تونل حمل‌ونقل	تونل‌های عبورومرور افراد و وسایل نقلیه (مترو، راه‌آهن، پیاده‌رو و ...) تونل‌های انتقال آب (فاضلاب) تونل‌های سرویس (انتقال برق)
انبارها و نیروگاه‌ها	نیروگاه‌های برق ـ آبی پارکینگ ورزشگاه
پناهگاه‌ها	پناهگاه انسان پناهگاه ادوات جنگی

از جنبه نوع کاربری نیز می‌توان فضاهای زیرزمینی را به دو دسته طبقه‌بندی کرد: ۱ـ فضاهای معدنی که شامل بازکننده‌ها، گالری‌های دسترسی، بالاروها و ... می‌شوند؛ این نوع فضاها معمولاً کاربری موقت دارند ۲ـ فضاهایی غیرمعدنی (عمرانی) که مربوط به تونل‌های راه‌آهن، جاده و مغار نیروگاه و ...می‌شوند؛ این دسته از فضاها دائمی هستند.

نکته۵: فضاهایی که نگهداری ثانویه دارند جزء فضاهای دائمی محسوب می‌شوند.

ساختگاه تونل

واکنش زمین به احداث تونل به دو صورت کلی مناسب و نامناسب تقسیم‌بندی می‌شود. اگر شرایط حفاری زمین مناسب باشد، در زمینه حفر مشکلی پیش نمی‌آید. حال آن‌که در زمین‌های نامناسب، ممکن است احداث تونل توأم با خطراتی باشد که موجب توقف، تأخیر و افزایش هزینه‌ها شود.

عوامل اصلی تعیین‌کننده شرایط زمین شامل ۱) وضعیت تنش در منطقه، ۲) مشخصات سنگ و خاک، ۳) حضور آب زیرزمینی، ۴) وجود گازهای محبوس بین لایه‌ای و ۵) شرایط تکتونیکی محیط دربرگیرنده تونل می‌باشد.

مشخصات خاک

خاک‌های چسبنده (سفت) معمولاً شرایط بهتری جهت حفاری دارند، چون این نوع از خاک‌ها زمان پایداری بیشتری دارند. اما در خاک‌های ضعیف ممکن است خاک به علت چسبندگی پایین دچار ریزش و انبساط گردد. در این حالت می‌بایست نگهداری در سریع‌ترین حالت ممکن، پس از حفاری نصب گردد و یا اینکه در شرایطی این نوع خاک‌های سست، نیاز به بهسازی زمین پیش از حفاری دارند.

نکته۶: هرچه خاک چسبنده‌تر باشد امکان ایجاد تونل‌هایی با مقطع‌های بزرگ و زمان خودپابرجایی بیشتر، افزایش می‌یابد.

مثال۱: مناسب‌ترین شرایط از نظر ساختگاه، برای ایجاد تونل ترافیک شهری که زمان خودپابرجایی بیشتری داشته باشد، کدام است؟

۱) خاک درشت‌دانه
۲) خاک درشت‌دانه همراه با لایه‌بندی
۳) خاک ریزدانه چسبنده
۴) خاک ریزدانه به همراه لایه‌های درشت‌دانه

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» خاک‌های ریزدانه نسبت به خاک‌های درشت‌دانه عموماً چسبندگی بیشتری دارند و هرچه محیط دربرگیرنده فضای زیرزمینی چسبنده‌تر باشد، زمان خودپابرجایی نیز بیشتر است.

مشخصات سنگ

اگر توده سنگ به‌صورت بکر و محکم باشد، می‌تواند بدون نگهدارنده پابرجا بماند، اما عملیات حفاری در این نوع سنگ‌ها با مشکلاتی مواجه می‌شود. در شرایطی که سنگ تحت پدیده‌های تکتونیزه مثل گسلش، شیستوزیته، لایه‌بندی و ... قرار گیرد، استفاده از سیستم نگهداری ضرورت می‌یابد.

نکته۷: برای حفاری فضای زیرزمینی در محیط سنگی، در صورتی که توده سنگ به‌صورت بکر باشد، عملیات حفاری با مشکلاتی روبرو خواهد شد. اما در این نوع سنگ‌ها زمان خودپابرجایی زیاد است.

نکته۸: معمولاً زمان خودپابرجایی در محیط سنگی نسبت به محیط خاکی بیشتر است.

مثال۲: مناسب‌ترین محل از نظر زمین‌شناسی جهت حفر فضاهای بزرگ زیرزمینی (چاه، مغار) کدام گزینه است؟

۱) خاک‌های درشت‌دانه
۲) سنگ‌های تکتونیزه‌شده
۳) سنگ‌های تقریباً بکر
۴) سنگ‌های رسوبی همراه با لایه‌بندی

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» با توجه به این‌که فضاهای بزرگ‌مقطع در کار معدنی نظیر چاه، دارای عمر طولانی است لذا می‌بایست از نظر پایداری، بهترین محیط را برای مکان‌یابی این‌گونه فضاها درنظر گرفت. در نتیجه سنگ بکر بیشترین پایداری را تأمین خواهد کرد.

آب زیرزمینی

وجود آب در اکثر پروژه‌های تونل‌سازی و معدنی مشکلات عدیده‌ای را به‌وجود می‌آورد، بنابراین زهکشی محیط و خروج آب یا واکنش مناسب در برابر محیط آب‌دار لازم است.

مثال۳: کدام گزینه از روش‌های مقابله با آب در احداث پروژه‌های زیرزمینی نیست؟

۱) زهکشی و خروج آب از محیط
۲) استفاده از مواد منفجره و نگهداری ضدآب
۳) آب‌بند کردن محیط
۴) زهکشی محیط و خروج آب و نفوذناپذیر کردن آن

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» مناسب‌ترین حالت برای مقابله با آب در پروژه‌های زیرزمینی زهکشی و خروج آب از محیط و همچنین نفوذناپذیر کردن و ایجاد آب‌بند در پروژه است تا مانع از ورود آب به محیط تونل گردد.

فصل دوم

«تأثیر شرایط زمین‌شناسی بر طراحی و احداث فضاهای زیرزمینی»

مقدمه

مهم‌ترین اقدام در تونل‌سازی قبل از شروع کار احداث تونل، بررسی و مطالعه زمین‌شناسی محل عبور تونل می‌باشد. شناخت محیط و شرایط زمین‌شناسی محل تونل‌سازی تأثیر عمده‌ای بر انتخاب روش احداث، طراحی و نگهداری دارد، آگاهی و اطلاع کامل از مشخصه‌های زمین‌شناسی محل احداث تونل یک شرط لازم و اولیه برای موفقیت در طراحی و احداث تونل است. سوابق مشاهدات زمین‌شناسی و تعبیر و تفسیر آن‌ها نقش مهمی در کلیه مراحل انجام پروژه تونل ایفا می‌کند که از جمله آن‌ها ملاحظات مقدماتی طرح، ارزیابی و انتخاب طرح نهایی، برآورد و انتخاب روش احداث و درنهایت مراحل عملیاتی و اجرای تونل، می‌باشد.

در حقیقت کلیه تونل‌ها به استثنای تونل‌های لوله‌ای غرقابی و ترانشه‌هایی که در نهشته‌های سطحی حفر می‌شوند، همگی در پوسته زمین حفر می‌گردند. طبیعی است که خصوصیات فیزیکی ـ مکانیکی، سنگ یا خاک درون‌گیر بلاواسطه تونل و عوامل طبیعی نظیر، فشار سنگ، آب موجود و قابلیت کلی سنگ برای هوازدگی، به نحو زیادی بر سهولت یا سختی احداث و نوع نگهداری مطلوب تونل به منظور پایداری کوتاه یا درازمدت آن، تأثیر عمده می‌گذارد.

هدف کلی بررسی و مطالعه زمین‌شناسی مقدماتی این است که طبیعت یا خواص فیزیکی ـ مکانیکی زمین تشکیل‌دهنده مسیر تونل را نشان دهد و مقاطع مناسب زمین‌شناسی در طول مسیری که قرار است تونل‌سازی در آن انجام شود، تهیه گردد. غالباً مشکل است که اطلاعات زمین‌شناسی سطحی را با آنچه در طول مسیر برنامه‌ریزی‌شده تونل پیش می‌آید، مرتبط و منطبق کرد. مواردی از این‌گونه مشکلات در تونل‌های زیرآبی، تونل‌هایی که از زیر شهرهای با ساخت‌وساز زیاد عبور کرده‌اند و تونل‌هایی که در زیر رشته‌کوه‌های مرتفع حفر شده‌اند، پیش آمده است.

نکته۱: به دلیل شرایط غیرقابل رؤیت که غالباً در زیر زمین وجود دارد تا زمان انجام عملیات حفر نمی‌توان با اطمینان دقیق در مورد شرایطی که پیش خواهد آمد اظهارنظر و عمل نمود.

اطلاعات تفصیلی زمین‌شناسی که فوراً از مرکز سینه کار تونل اصلی برداشت می‌شوند، نقش مهمی در پیشروی تونل ایفا می‌کنند. در تونل‌هایی که حفر آن‌ها توسط ماشین‌های تونل‌سازی سنگین نظیر TBMها انجام می‌شود، امکان برداشت فوری از سینه‌کار وجود ندارد. در این گونه تونل‌ها به‌جای استفاده از برداشت‌های فوری سینه کارها در تونل‌های نسبتاً کم‌عمق از گمانه‌های قائم و در تونل‌های عمیق از گمانه‌های افقی که در جبهه کار تونل حفر می‌شوند، استفاده می‌شود.

مطالعات و بررسی زمین‌شناسی می‌تواند شامل موارد زیر باشد:

۱ـ تعیین و شناسایی سنگ‌ها و شرایط آن‌ها.

۲ـ بررسی و مطالعه اطلاعات آب‌شناسی، اطلاعات مربوط به گازهای زیرزمینی و دمای خاک.

۳ـ تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی و مقاومتی سنگ‌های مربوط به مسیر مورد انتظار تونل.

۴ـ تعیین ویژگی‌های زمین‌شناختی مربوط به میزان تنش افقی پیش‌بینی‌شده توده‌سنگ‌هایی که تونل در آن‌ها حفر می‌شود.

مثال۱: مطالعه و بررسی زمین‌شناسی شامل کدام مورد زیر نمی‌شود؟

۱) آب‌شناسی منطقه ۲) شناسایی سنگ‌های درون‌گیر ۳) ژئوفیزیک محدوده طرح ۴) طرح نهایی حفاری

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» مطالعه و بررسی زمین‌شناسی شامل، مطالعات سنگ‌شناسی و تعیین خواص فیزیکی و مقاومتی سنگ‌های دربرگیرنده، مطالعات آب‌شناسی، ژئوفیزیک و ژئوتکنیک و تعیین میزان نسبت تنش‌های برجا است.

فصل سوم

«طبقه‌بندی توده سنگ از نظر ژئومکانیکی»

مقدمه

اکثر تونل‌ها به‌ویژه تونل‌های راه و راه آهن عمدتاً در مناطق کوهستانی و در داخل سنگ حفر می‌شوند. برای طبقه‌بندی توده سنگ روش‌های متعددی وجود دارد. در برخی طبقه‌بندی‌ها فقط به منشأ تشکیل سنگ توجه می‌شود و لذا سنگ را به سه دسته آذرین، رسوبی و دگرگونی تقسیم‌بندی می‌کند و یا بعضاً سنگ‌ها را براساس مقاومت تک‌محوری آن دسته‌بندی می‌کنند. در روش‌های کامل‌تر که امروزه بیش‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرند خصوصیات درزه و شکاف‌ها و شرایط آب زیرزمینی و اثر تنش برجا نیز لحاظ می‌شود. از جمله مهم‌ترین روش‌هایی که امروزه به‌کار گرفته می‌شود، روش ترزاقی، روش RMR و روش Q می‌باشد.

طبقه‌بندی ترزاقی:

در سال ۱۹۴۶، ترزاقی یک سیستم طبقه‌بندی برای شرایط مختلف سنگ ارائه داد که در تخمین بارهای وارد بر سیستم حائل تونل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. ترزاقی انواع مختلف زمین‌ها را توصیف کرده و براساس تجربیاتی که در طراحی و نصب سیستم نگهداری حائل فولادی تونل‌های راه‌آهن در آلپ کسب نموده بود، حدود بارهای ناشی از سنگ که با حائل وارد می‌شود را برای شرایط مختلف زمین مشخص نمود. ترزاقی وضعیت انواع سنگ را به شرح زیر تعریف می‌نماید:

سنگ بکر:

سنگی که در آن نه درزه و نه ترک مویی وجود دارد. بنابراین اگر چنین سنگی بشکند، شکستگی در قسمت سالم سنگ اتفاق می‌افتد. به علت آسیب وارد به سنگ در نتیجه آتشکاری، سقوط سنگ از طاق تونل طی چندین ساعت یا چندین روز پس از آتشکاری معمول است. این حالت به عنوان شرایط پوسته‌پوسته‌شدن سنگ (spalling) شناخته می‌شود. سنگ بکر سخت ممکن است با وضعیت popping نیز مواجه شود که در چنین شرایطی قطعات سنگ خودبه‌خود و به صورت ناگهانی از دیواره‌ها و طاق تونل جدا می‌شود.

نکته۱: popping، پدیده‌ای است که قطعات سنگ بکر (بدون درزه و شکاف) به صورت ناگهانی و خودبه‌خود از دیواره و طاق تونل جدا می‌شود.

نکته۲: پوسته‌پوسته‌شدن (spalling) حالتی است که پس از آسیبی که به سنگ وارد می‌شود و در نتیجه سقوط سنگ در دیواره و سقف مشاهده می‌شود.

سنگ لایه‌ای (Stratified rock):

مرکب از طبقات منفرد با مقاومت کم یا بدون مقاومت در امتداد جدایی و مرزی بین لایه‌ها است. طبقات و لایه‌ها ممکن است با حضور درزه‌های عرضی ضعیف گردند. در چنین سنگی شرایط پوسته‌پوسته‌شدن کاملاً معمولی است.

سنگ نسبتاً درزه‌دار (moderately jointed rock)

شامل درزه‌ها و ترک‌های مویی است اما بلوک‌های بین درزه‌ها به حدی با یکدیگر چفت‌وبست شده‌اند که دیواره‌های قائم تونل نیاز به حائل جانبی ندارند. در سنگ‌هایی از این نوع، هردو شرایط پوسته‌پوسته‌شدن و ترکیدگی سنگ میزبان ممکن است پیش آید.

سنگ بلوک‌شده و رگه‌دار: (blocky and seamy rock)

شامل قطعات و خرده‌های سنگ هستند که از نظر شیمیایی بکر یا تقریباً بکر هستند و به‌طور کامل از یکدیگر جدا بوده و چفت‌وبست مناسبی باهم ندارند. در چنین سنگی دیواره‌های قائم تونل ممکن است به حائل جانبی نیاز داشته باشند.

سنگ کاملاً خرد ولی بکر از نظر شیمیایی (Completetly crushed but chemically intact)

از نظر شیمیایی دست‌نخورده، بکر و کاملاً خرد و خصوصیت روان‌شدن دارند، اگر بیشتر یا تمام دانه‌ها به کوچکی دانه‌های ماسه‌ریزدانه بوده و سیمانی‌شدن دوباره اتفاق نیفتاده باشد، سنگ خردشده در زیر سطح آب خواص ماسه اشباع را دارد.

سنگ فشارنده (Squeezing Rock)

به‌طور آهسته به داخل تونل پیشروی می‌کند بدون اینکه افزایش حجم محسوسی داشته باشد. شرط لازم برای فشارندگی وجود درصد بالایی از کانی‌های میکایی میکروسکوپی و کانی‌های رسی با ظرفیت تورمی کم است.

سنگ تورمی (Swelling Rock)

این نوع سنگ عمدتاً به علت انبساط و متورم‌شدن به داخل تونل پیشروی می‌کند. خاصیت تورمی سنگ‌ها به‌نظر می‌رسد محدود به سنگ‌هایی باشد که دارای کانی‌های رسی از قبیل مونت‌موریونیت با ظرفیت تورمی زیاد هستند.

مثال۱: عبارت «در شرایطی که قطعات سنگ به صورت خودبه‌خودی و ناگهانی از دیواره‌ها و طاق تونل جدا شوند» نشانگر کدام شرایط است؟

۱) پدیده پوسته‌پوسته‌شدن ۲) وضعیت ترکیدگی

۳) پدیده مچاله‌شوندگی ۴) پدیده لهیدگی

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» ترکیدگی سنگ یا همان پدیده popping است که غالباً به‌صورت جداشدن خودبه‌خودی و ناگهانی سنگ از دیواره‌ها و طاق تونل در اثر تنش‌های زیاد است.

مثال۲: کدام عبارت، تعریف صحیحی از سنگ لایه‌ای است؟

۱) سنگی که احتمال جریان آزاد مواد خاکی به داخل تونل در اعماق کم وجود داشته باشد.

۲) سنگی که در آن نه درزه و نه ترک وجود دارد.

۳) ترکیبی از طبقات منفرد با مقاومت بین‌لایه‌ای پایین در مرز بین لایه‌ها

۴) شامل قطعاتی است که به طور کامل از یکدیگر جدا بوده و چفت‌وبست مناسبی با یکدیگر ندارند.

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» سنگ لایه‌ای سنگی است مرکب از انطباق منفرد با مقاومت کم یا بدون مقاومت و در امتداد جدایی و مرز بین لایه. طبقات و لایه‌ها ممکن است با حضور درزه‌های عرضی ضعیف شوند. در چنین سنگی شرایط پوسته‌پوسته‌شدن کاملاً معمول است.

طبقه‌بندی توده سنگ به روش RMR

این روش توسط بنیاوسکی در سال ۱۹۷۳ برای اولین بار معرفی شده و در طی زمان اصلاحاتی روی آن انجام گرفته است. در این روش امتیازبندی توده سنگ براساس پارامترهای زیر صورت می‌پذیرد:

- مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ بکر (Uniaxial compressive strenght of intact rock)
- شاخص کیفی سنگ (RQD)
- فاصله درزه‌ها (Joint spacing)
- شرایط درزه‌ها (Joint condition)
- شرایط آب زیرزمینی (Ground water condition)
- امتداد درزه‌ها (Joint orientation)

مجموع پنج پارامتر اول را RMR پایه می‌نامند. با لحاظ‌کردن امتیاز منفی مربوط به پارامتر ششم (امتداد درزه‌ها) مقدار RMR به‌دست می‌آید. در جدول داده‌شده نحوه امتیازدهی به پارامترهای مختلف در سیستم RMR ارائه شده است:

الف ـ پارامترهای طبقه‌بندی و امتیاز آن‌ها

	پارامتر		محدوده مقادیر				
۱	مقاومت سنگ بکر	اندیس مقاومت بار نقطه‌ای	$>۱۰MPa$	$۴-۱۰MPa$	$۲-۴MPa$	$۱-۲MPa$	برای این محدوده مقاومت فشاری تک‌محوره ترجیح دارد.
		مقاومت فشاری تک‌محوره	$>۲۵۰MPa$	$۱۰۰-۲۵۰MPa$	$۵۰-۱۰۰MPa$	$۲۵-۵۰MPa$	$۵-۲۵$ MPa / $۱-۵$ MPa / <۱ MPa
	امتیاز		۱۵	۱۲	۷	۴	۲ / ۱ / ۰
۲	شاخص کیفیت سنگ RQD		%۹۰–%۱۰۰	%۷۵–%۹۰	%۵۰–%۷۵	%۲۵–%۵۰	<%۲۵
	امتیاز		۲۰	۱۷	۱۳	۸	۳
۳	فاصله درزه‌ها		$>۲m$	$۰/۶-۲m$	$۲۰۰-۶۰۰mm$	$۶۰-۲۰۰mm$	$<۶۰mm$
	امتیاز		۲۰	۱۵	۱۰	۸	۵
۴	شرایط درزه‌ها (به قسمت (و) مراجعه شود)		سطوح خیلی زبر، غیرممتد، جدانشده، دیواره درزه‌ها هوانزده	سطوح کمی زبر، جدایی دیواره درزه‌ها کمتر از ۱mm، کمی هوازده	سطوح کمی زبر، جدایی دیواره درزه‌ها کمتر از ۱mm، بسیار هوازده	سطوح آینه‌ای با ضخامت کمتر از ۵mm مواد پرکننده با $۱-۵mm$ بازشدگی درزه‌های ممتد	ضخامت مواد پرکننده نرم بیش از ۵mm با بازشدگی بیش از ۵mm، درزه‌ها ممتد
	امتیاز		۳۰	۲۵	۲۰	۱۰	۰
۵	آب زیرزمینی	جریان آب در هر ۱۰ متر طول تونل $(\frac{l}{min})$	بدون آب	<۱۰	$۱۰-۲۵$	$۲۵-۱۲۵$	>۱۲۵
		نسبت فشار آب درزه به تنش اصلی بزرگ‌تر	۰	$<۰/۱$	$۰/۱-۰/۲$	$۰/۲-۰/۵$	$>۰/۵$
		شرایط عمومی	کاملاً خشک	نم	خیس	آب قطره‌قطره می‌ریزد.	آب جاری است.
	امتیاز		۱۵	۱۰	۷	۴	۰

ب ـ تعدیل امتیاز برای جهت درزه‌ها

راستا و جهت میل درزه‌ها		خیلی مساعد	مساعد	متوسط	نامساعد	خیلی نامساعد
امتیاز	تونل‌ها	۰	−۲	−۵	−۱۰	−۱۲
	پی‌ها	۰	−۳	−۷	−۱۵	−۲۵
	شیروانی‌ها	۰	−۵	−۲۵	−۵۰	−۵۰

ج ـ کلاس توده سنگ به بر اساس امتیاز کل RMR.

امتیاز	۸۱–۱۰۰	۶۱–۸۰	۴۱–۶۰	۲۱–۴۰	<۲۰
شماره رده	I	II	III	IV	V
شرح و توصیف	سنگ خیلی خوب	سنگ خوب	سنگ متوسط	سنگ ضعیف	سنگ خیلی ضعیف

د ـ اطلاعات مربوط به هر رده

شماره رده	I	II	III	IV	V
متوسط زمان خودپایداری	۱۰ سال برای دهانه ۱۵ متری	یک سال برای دهانه ۱۰ متری	یک هفته برای دهانه ۵ متری	۱۰ ساعت برای دهانه ۲/۵ متری	۳۰ دقیقه برای دهانه ۱ متری
چسبندگی توده‌سنگ (KPa)	>۴۰۰	۳۰۰–۴۰۰	۲۰۰–۳۰۰	۱۰۰–۲۰۰	<۱۰۰
زاویه اصطکاک توده‌سنگ	>۴۵	۳۵–۴۵	۲۵–۳۵	۱۵–۲۵	<۱۵

فصل چهارم

«حفر فضای زیرزمینی با استفاده از چالزنی و آتشباری»

برای حفاری در سنگ‌های سخت و در شرایطی که نتوان از دیگر روش‌ها استفاده کرد؛ از روش چالزنی و آتشباری با مواد منفجره استفاده می‌شود. این روش شامل مراحل زیر است:

۱) چالزنی، ۲) خرج‌گذاری، ۳) انفجار، ۴) تخلیه دود (تهویه) ۵) لق‌گیری، ۶) تخلیه مواد حفاری شده (بارگیری و باربری)، ۷) پایداری‌سازی (از قبیل نصب راک‌بولت، تور سیمی، شاتکریت؛ در صورت لزوم)، ۸) کارهای متفرقه دیگر مانند اضافه‌نمودن طول لوله‌های آب، راکت‌های تهویه، سیم برق.

در ۲۵سال اخیر تکنیک‌های چالزنی پیشرفت زیادی کرده است و استفاده از جامبو الکتروهیدرولیکی کارایی چالزنی را بالا برده است. افزایش کارایی تنها به معنی افزایش سرعت چالزنی نیست بلکه کیفیت چالزنی هم بهبود یافته است. منظور از کیفیت، محل دقیق، صاف‌بودن، طول چال‌ها و همچنین کنترل پارامترهای چالزنی مثل فشار تماسی و گشتاور وارده است.

با استفاده از رایانه می‌توان کلیه فعالیت‌های انجام‌شده را کنترل، ثبت و کیفیت چالزنی را بالا برد. خرج‌گذاری در چال‌ها می‌تواند با سرعت زیاد انجام شود. این کار توسط خرج‌های با لوله پلاستیکی یا تجهیزات خرج‌گذاری مکانیکی صورت می‌گیرد.

در مورد اخیر مقدار خرج قرارداده‌شده در واحد طول چال را می‌توان به دقت تنظیم کرد. پیشرفت در زمینه مواد منفجره، به استفاده از انواع ایمن‌تر منجر شده است. امولسیون‌های منفجره جدید، حداقل تعداد گازهای سمی را ایجاد می‌کنند.

سرعت پیشروی در حفاری به روش چالزنی و انفجار در پروژه‌هایی که به‌خوبی مدیریت می‌شوند تا ۷۰ متر در هفته امکان‌پذیر می‌باشد ولی به علت بالابودن تعداد نیروی انسانی، بالابودن هزینه‌ها در پروژه‌های بزرگ، آسیب‌هایی که به محیط اطراف تونل (سنگ اطراف تونل) وارد می‌شود و همچنین با در نظرگرفتن مسائل زیست‌محیطی، در بسیاری موارد استفاده از روش‌های حفاری مکانیزه بر روش چالزنی و انفجار برتری دارد.

تذکر۱: دو مسئله مهم که در حین انفجار باید به آن توجه شود این است که اولاً حفاری به اندازه مورد نیاز باشد، چون اگر بیش از مقطع مورد نیاز حفاری صورت گیرد هم هزینه خارج‌کردن سنگ‌ها زیاد می‌شود و هم بعداً فضای خالی را باید با بتن پر کرد. ثانیاً باید توجه کرد توده سنگ در حین انفجار آسیب نبیند تا فشار اضافی بر پوشش تونل وارد نکند.

نکته ۱: حفر تونل با استفاده از روش چالزنی و آتشباری برای سنگ‌های سخت می‌باشد. همچنین در مواردی که طول تونل کوتاه باشد و روش‌های مکانیزه اقتصادی نباشد، روش انفجار بهترین گزینه است.

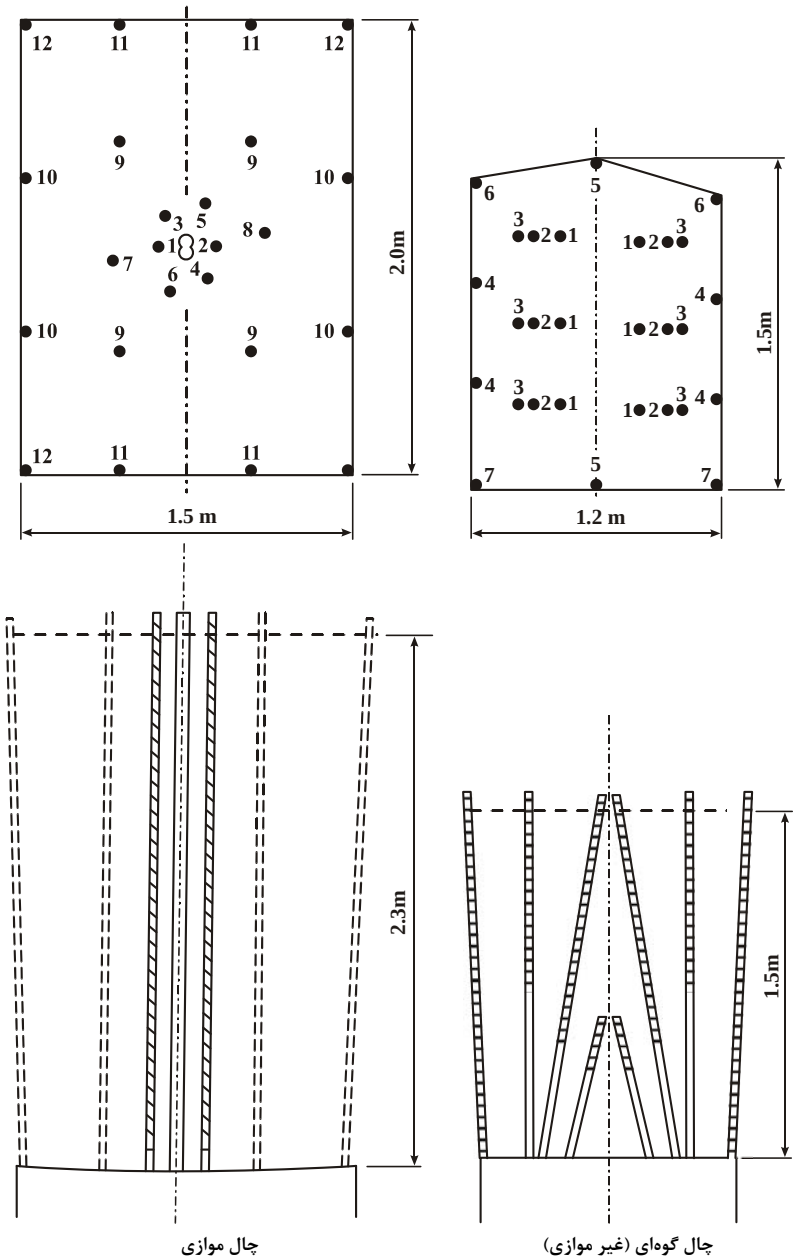
عوامل مؤثر در حفاری تونل با استفاده از روش چالزنی و آتشباری با مواد منفجره به شرح زیر می‌باشند که در ادامه به شرح هریک از آن‌ها پرداخته شده است:

۱) آرایش چال‌های انفجار (نقشه انفجار) ۲) حفر چال ۳) خرج‌گذاری ۴) انفجار

نکته ۲: روش چالزنی و آتشباری شامل: چالزنی، خرج‌گذاری، انفجار، تهویه، لق‌گیری، بارگیری، باربری و نگهداری اولیه می‌شود.

آرایش چال‌ها

الگوی مناسب چال‌های انفجار (آرایش چال‌ها) در حفاری سنگ‌های سخت معمولاً به ابعاد مقطع بستگی دارد و همان‌گونه که در شکل داده شده، مشاهده می‌شود چال‌ها در مرکز مقطع به شکل گوه‌ای(V) یا موازی در اطراف محیط تونل حفر می‌گردند. چاشنی‌های الکتریکی با تأخیر کم در هسته مرکزی و چاشنی‌های با تأخیر زیاد در اطراف محیط قرار می‌گیرند و بدین وسیله محل تخریب به مقطع مورد نظر محدود می‌گردد.



حفر تونل با چال موازی و غیرموازی

نقشه انفجار در تونل‌ها به ابعاد تونل، مقاومت سنگ‌ها، ضخامت فشنگ‌های مواد منفجره، قدرت مواد منفجره و عواملی نظیر آن‌ها بستگی دارد.
آرایش چال‌ها معمولاً مقطع تونل را به چند بخش تقسیم می‌کند.

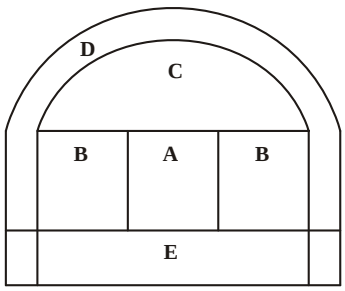
A: بخش مرکزی یا برش که مهم‌ترین نقش را در عملکرد سایر چال‌ها و پیشروی تونل دارد.

B: بخش‌های 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

E: بخش کف تونل



بخش‌های مختلف مقطع تونل براساس حفاری و انفجار

فصل پنجم

«حفر فضای زیرزمینی به وسیله ماشین‌های بازویی»

مقدمه

ماشین‌های تونل‌سازی به دو گروه کلی ماشین‌های حفار بازویی (حفر بخشی) و ماشین‌های تمام‌مقطع، تقسیم می‌شوند. در ماشین‌های بازویی یک یا چند بازوی حفار وجود دارد که سطح مقطع آن به مراتب کمتر از سطح مقطع تونل است و با جابه‌جاکردن آن در نقاط مختلف مقطع، تونل را حفاری می‌کنند. در ماشین‌های تمام‌مقطع، یک صفحه حفار در جلوی ماشین تعبیه شده است که با چرخش خود، تمام مقطع را یک‌جا حفاری می‌کند. این ماشین‌ها به‌نام ماشین‌های تونل‌زن حفار TBM معروف هستند.

ماشین‌های بازویی از سال ۱۹۴۰ میلادی در کشورهای اروپایی مورد توجه واقع شد و تا دهه ۱۹۵۰ میلادی انواع قابل توجهی از ماشین‌های حفار بازویی در صنعت حفر تونل پا به عرصه نهادند.

تکامل این ماشین در شوروی آن زمان باعث شد که مدل روس آن به‌نام PK3 در سال ۱۹۶۱ میلادی در انگلستان مورد استفاده قرار گیرد.

با تکامل ماشین حفاری بازویی، مقدار زیادی از این ماشین‌ها در معادن زغال سنگ کشور انگلستان به‌کار گرفته شد. قابلیت انعطاف بالای این ماشین‌ها اجازه می‌داد که این ماشین‌ها در استخراج زغال سنگ‌های دارای لایه‌بندی چندگانه به‌صورت انتخابی مؤثر باشند. در حقیقت با امکان استخراج انتخابی توسط این ماشین‌ها لایه‌های ضعیف‌تر حفر و در نتیجه لایه‌های محکم‌تر سنگی ناپایدار و امکان استخراج آن‌ها آسان می‌شد.

علاوه بر این، سر برش‌دهنده بازویی ماشین حفار بازویی، امکان حفر آسان مقاطعی با شکل‌های مستطیلی و قوسی را میسر می‌سازد و می‌توان تونل‌هایی با شکل‌های مختلف را حفر کرد.

از نظر ابعاد مقطع نیز در محدوده وسیعی کارایی دارد و تونل‌های با سطح مقطع ۱۰ تا ۲۵ متر مربع با آن حفر می‌شود.

در سال‌های اخیر توجه قابل ملاحظه‌ای بر افزایش ظرفیت انواع ماشین‌های حفار بازویی برای دست‌یابی به سرعت بیشتر تونل‌سازی و افزایش قابلیت آن‌ها برای برش‌دادن سنگ‌های سخت شده است. این مسائل موجب افزایش قابل توجهی در وزن چنین ماشین‌هایی گردیده است.

اجزاء ماشین حفار بازویی

مهم‌ترین اجزای دستگاه حفار بازویی عبارت‌اند از: بدنه، موتور، بازو، سرمته، ناخن‌های حفار و سیستم بارگیری که در ادامه به شرح آن‌ها می‌پردازیم:

۱) بدنه:

بدنه دستگاه، معمولاً مرکب از یک ارابه چرخ زنجیری است که تحرک آن را تأمین می‌کند.

ابعاد ارابه دستگاه متفاوت است و به ظرفیت مورد نظر بستگی دارد.

۲) موتور:

موتور اصلی دستگاه معمولاً برقی است و سیستم‌های هیدرولیک ماشین را تغذیه می‌کند. توان کلی دستگاه متفاوت است و بسته به ابعاد ماشین بین ۸۶ تا ۶۲۵ کیلووات تغییر می‌کند.

۳) بازو:

بازو یکی از مهم‌ترین قسمت‌های دستگاه است که به بدنه متصل شده و قادر است در امتداد افقی و قائم حرکت کند. در بعضی از ماشین‌ها، بازو حالت تلسکوپی دارد و با استفاده از سیستم هیدرولیک کوتاه و بلند می‌شود. اگرچه تعداد بازوها معمولاً یکی است ولی در بعضی از ماشین‌ها، دو بازو تعبیه

فصل ششم

«حفر تونل به‌وسیله ماشین‌های تمام‌مقطع (T.B.M)»

مقدمه

این ماشین‌ها، تمامی مقطع تونل را به‌صورت یک‌جا و دایره‌ای حفر می‌کنند. تکامل و گسترش این دستگاه‌ها سبب شده است که آهنگ پیشروی تونل‌ها در حد قابل توجهی افزایش یابد. امروزه نیز با پیشرفت تکنولوژی در سنگ‌های سخت از این ماشین‌ها استفاده می‌شود.

اولین ماشین از نوع تمام‌مقطع در سال ۱۸۸۰ میلادی به قطر ۲/۱۳ متر به‌کار گرفته شد که سرعت پیشروی آن حدود ۳۵ متر در هفته است. در سال ۱۹۵۴ نوع جدیدی از ماشین‌های تمام‌مقطع به قطر ۷/۸۵ متر برای حفر تونل‌های سدی در ایالت داکوتای جنوبی آمریکا به‌کار گرفته شد. سنگی که تونل‌ها در آن احداث می‌شد شیل بود که در اثر شکستگی و گسل‌های فراوان خرد شده و مقاومت فشاری تک‌محوری آن ۱/۴ تا ۲/۸ مگاپاسکال است، سپس سرعت پیشروی به حدود ۴۳ متر در روز رسید. کوشش‌های بعدی به‌منظور ساخت ماشین‌های تمام‌مقطعی بود که در شرایط سخت زمین‌شناسی، قادر به حفر تونل باشند که آهنگ پیشرفت و تکامل در این زمینه، در مقایسه با پیشرفت‌های اولیه این ماشین‌ها، محدودتر است. در واقع شروع اصلی این تحقیقات در سال ۱۹۵۷ برای ساخت ماشین‌هایی بود که بتواند در سنگ‌های خیلی سخت نیز با راندمان معقول، تونل حفر کند. از آن زمان به‌تدریج این دستگاه‌ها سنگین‌تر و محکم‌تر شدند و توان آن‌ها نیز افزایش یافت اما پیشرفت آن‌ها در زمینه حفر سنگ‌های محکم، کند است. به‌عنوان مثال عملکرد نوعی از این دستگاه‌ها که مجهز به هر دو سیستم برش ناخنی و دیسکی بود، برای حفر در سنگ‌های آهکی سیلتی که در بین آن‌ها لایه‌هایی با مقاومت ۱۴۰ مگاپاسکال وجود داشت راضی‌کننده نبود. سرانجام ناخن‌ها به طور کلی حذف شدند و حفر تونل با استفاده از دیسک‌های حفار ادامه یافت.

نکته ۱: هرچه جنس محیط سخت‌تر شود، عملکرد ناخن و چنگ‌زن‌ها در کله حفار پایین می‌آید و دیسک‌ها جایگزین می‌شوند.

تذکر ۱: استفاده از ماشین حفر تمام‌مقطع تونل (TBM) در طول‌های زیاد حفاری (بیش از ۳ – ۲ کیلومتر) معمولاً حالت اقتصادی پیدا می‌کند و در طول‌های کمتر به‌علت هزینه سرمایه‌گذاری زیاد چندان توجیه اقتصادی ندارد.

قسمت‌های ماشین

صرف نظر از نوع TBM، در تمامی آن‌ها قسمت‌های اصلی به شرح زیر وجود دارند:

۱ـ بدنه

بدنه ماشین محور اصلی دستگاه را تشکیل می‌دهد که تمام قسمت‌ها، مثل کله حفار، الکتروموتور، سیستم هیدرولیک و ... روی آن نصب شده‌اند. بسته به نوع ماشین، اجزای بدنه متفاوت‌اند ولی در حالت کلی از مجموعه‌ای از اجزای فولادی تشکیل شده است. موتورهای محرکه دستگاه، انرژی لازم برای چرخش کله حفار را تأمین می‌کنند. البته بین الکتروموتور اصلی و کله حفار، سیستم جعبه‌دنده وجود دارد که به کمک آن می‌توان سرعت‌ها و گشتاورهای مختلف را برای کله حفار تأمین نمود.

در برخی از ماشین‌ها، الکتروموتور، مجاور کله حفار است، در تعدادی دیگر موتور محرکه در عقب دستگاه قرار دارد و حرکت چرخشی به‌وسیله محوری که در امتداد محور ماشین تعبیه شده است به کله حفار منتقل می‌شود.

مثال ۱: محور اصلی دستگاه ماشین حفار تمام‌مقطع کدام است؟

۱) کله حفار ۲) سیستم نصب نگهدارنده ۳) بدنه یا سپر ۴) الکتروموتور

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» اصلی‌ترین بخش ماشین حفاری تمام‌مقطع، بدنه یا سپر است که کلیه قسمت‌ها بر روی آن نصب می‌شوند و وظیفه نگه‌داشتن کلیه قطعات کنار یکدیگر را دارند.

فصل هشتم

«احداث تونل در زمین‌های نرم»

مقدمه

مقصود از زمین‌های نرم یا سست، زمین‌هایی است که در مورد آن‌ها امکان حفر تونل با وسایل دستی وجود دارد. در این موارد، درجه سختی احداث تونل، هزینه‌های حفر و روش اجرا، به زمان خودپابرجایی سازه احداث شده بستگی دارد.

یکی از مهم‌ترین اشکالاتی که به هنگام حفر تونل در این زمین‌ها وجود دارد، رهاشدن یا تنش‌زدایی زمین‌های بالای بخش حفاری‌شده است که ممکن است ریزش کرده و محل حفاری‌شده را پر کند. در صنعت تونل‌سازی، این واقعه را **افت فشار** می‌نامند. امکان وقوع این پدیده در صورت حضور آب زیرزمینی بیشتر می‌شود و اگر کنترل نشود، خطرات زیادی را در پی خواهد داشت حتی ممکن است منجر به ریزش‌های موضعی یا خرابی کامل بنا شود. همچنین تخلیه مواد به داخل تونل علاوه بر تخریب سازه، ممکن است نشست سطحی زمین را نیز در پی داشته باشد.

در عملیات اجرایی در تونل‌هایی با زمین سست، سه مرحله حفاری، نگهداری اولیه و کنترل آب در ارتباط بسیار نزدیک با هم هستند.

نکته۱: در اجرای تونل در زمین‌های سست سه عامل حفاری، کنترل آب و نگهداری اولیه از اهمیت بالایی برخوردار هستند.

نکته۲: معمولاً در نقاط شهری شرایط تونل‌سازی در زمین‌های سست به علت قرارگرفتن سطح آب زیرزمینی در تراز بالا بیشتر رخ می‌دهد.

تذکر۱: در مورد زمین‌های سست و ریزشی می‌توان از روش‌های تونل‌سازی سپری یا روش کَند و پوش (cut & cover) نیز استفاده کرد.

نکته۳: در انتخاب روش احداث تونل در زمین‌های نرم پارامترهای جنس زمین، وضعیت تنش در منطقه، ابعاد تونل، پایداری هر سینه کار و وضعیت ماشین‌آلات موجود تأثیرگذارند.

روش‌های اجرای تونل‌سازی در زمین‌های نرم

روش‌های اجرای تونل در این زمین‌ها را می‌توان به شرح زیر رده‌بندی کرد:

۱ـ روش سنتی ۲ـ روش امریکایی ۳ـ روش انگلیسی ۴ـ روش آلمانی ۵ـ روش اتریشی ۶ـ روش بلژیکی

روش سنتی:

این شیوه تونل‌سازی در زمین‌های سست از زمان‌های قدیم به‌کار می‌رفته است. واضح است که امروزه در مواردی از این روش‌ها استفاده می‌شود که به علت مسائل فنی یا اقتصادی نتوان از روش‌های مکانیزه استفاده کرد. به عنوان مثال در حالتی‌که تونل در زمینی مرکب از رسوبات یخچالی حفر می‌شود که در آن مواد تشکیل‌دهنده زمین، متفاوت هستند و همراه با ذرات شن‌وماسه، تخته‌سنگ‌های بزرگ نیز وجود دارد، دیگر نمی‌توان از سپر یا ماشین تونل‌سازی استفاده کرد. در این موارد باید شیوه سنتی را به‌کار گرفت و حفاری را با وسایل دستی انجام داد.

مورد دیگر استفاده از شرایط سنتی، زمانی است که شرایط اقتصادی اجازه استفاده از روش‌های مدرن را ندهد. مثلاً در مواردی که به علت کوتاه‌بودن تونل، حمل و نصب ماشین‌های تونل‌سازی یا سپر، اقتصادی نباشد یا اصولاً سرمایه اولیه برای استفاده از ماشین‌ها وجود نداشته باشد.

مثال۱: کاربرد روش سنتی در کدام گزینه مطرح شده است؟

۱) طول تونل زیاد، در محیط شهری
۲) زمین آبرفتی و طول تونل کوتاه
۳) حفاری در محیط‌های شهری
۴) تونل در محیط سنگی

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» روش سنتی حفاری در زمین‌های سست کاربرد دارد و بنا به بررسی فنی و اقتصادی بر روی طول تونل می‌توان تصمیم صحیح را اتخاذ کرد ولی معمولاً در طول‌های کوتاه روش‌های مکانیزه کاربرد ندارند و از روش حفر سنتی استفاده می‌شود. در محیط‌های شهری به دلیل اهمیت نشست سطح، روش سپری به دلیل کنترل نشست کاربرد بیشتری دارد.

فصل نهم

«حفر چاه و روش‌های ویژه حفاری تونل»

چاه

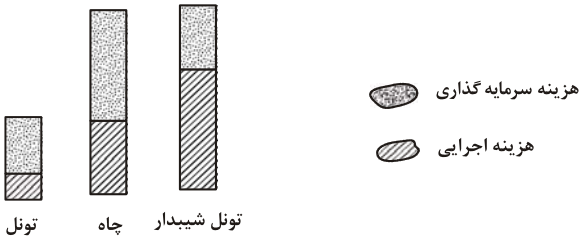
سازه قائمی که از سطح زمین به داخل ماده معدنی حفر می‌شود، چاه نامیده می‌شود. یکی از راه‌های دستیابی به ماده معدنی چاه است. از انواع چاه‌ها می‌توان به چاه‌های اکتشافی، باربری، سرویس‌دهی، تهویه و چاه رفت‌وآمد اشاره کرد.

هزینه سرمایه‌گذاری: به هزینه‌هایی‌که از لحظه شروع حفر چاه تا حفر کامل می‌بایست صورت گیرد، گفته می‌شود. هزینه‌های اجرایی، به هزینه‌هایی گفته می‌شود که در زمان بهره‌برداری از چاه باید پرداخت شود. هزینه سرمایه‌گذاری چاه بیش‌تر از تونل‌ها اما هزینه اجرایی معمولاً کمتر است.

مثال۱: هزینه سرمایه‌گذاری در کدام مورد بیشتر است؟

۱) تونل افقی ۲) تونل شیبدار ۳) چاه ۴) چاه و تونل

پاسخ: گزینه «۳» هزینه سرمایه‌گذاری چاه بیشتر از تونل اما هزینه اجرایی کمتری دارد و به‌طور کلی چاه از تونل شیبدار، اقتصادی‌تر است. در منحنی‌های زیر معیاری برای مقایسه هزینه‌های اجرایی و سرمایه‌گذاری در چاه، تونل و تونل شیب‌دار مشاهده می‌شود.



با توجه به دیاگرام فوق استفاده از تونل مقرون‌به‌صرفه‌تر است.

در صورت ضرورت در مراحل بعدی از چاه و پس از آن از تونل شیبدار استفاده می‌شود.

◆ ◆ ◆ ◆

حفر چاه‌های معدنی

به‌طور کلی مراحل حفاری را می‌توان به دو مرحله اصلی تقسیم‌بندی کرد: ۱) مراحل طراحی و۲) مراحل اجرا.

مسائل مربوط به طراحی:

۱ـ انتخاب محل چاه، ۲ـ انتخاب شکل مقطع حفاری، ۳ـ انتخاب سطح مقطع حفاری، ۴ـ انتخاب و طراحی تیم بالابر، ۵ـ طراحی دکل باربری، ۶ـ طراحی تیم تخلیه مواد، ۷ـ طراحی ترانسپورت مواد، ۸ـ طراحی تأسیسات سر چاه

مسائل مربوط به مرحله اجرا:

۱ـ چالزنی، ۲ـ خرج‌گذاری و آتشباری، ۳ـ تهویه، ۴ـ لق‌گیری، ۵ـ بارگیری و باربری، ۶ـ نگهداری، ۷ـ خدمات فنی، ۸ـ آبکشی

تذکر۱: اجرای چاه به روش مکانیزه توسط ماشین‌های ویژه حفر چاه نیز صورت می‌گیرد.

مثال۲: کدام گزینه روند درستی از اجرای چاه را نشان می‌دهد؟

۱) خرج‌گذاری ـ لق‌گیری ـ تهویه ـ چالزنی ۲) تهویه ـ آتشکاری ـ لق‌گیری ـ آبکشی

۳) آبکشی ـ لق‌گیری ـ آتشباری ـ تهویه ۴) چالزنی ـ آتشباری ـ تهویه ـ آبکشی

پاسخ: گزینه «۴» روند درست در گزینه (۴) ارائه شده است. در ابتدا چالزنی سپس آتشباری، تهویه، لق‌گیری، بارگیری و باربری، نگهداری ـ خدمات فنی و آبکشی صورت می‌گیرد.

Colar: بخشی از چاه است که تأسیسات سطحی روی آن قرار می‌گیرد. بدیهی است که از نظر نگهداری می‌بایست بتن‌ریزی سنگین صورت گیرد.

فصل دهم

«روش‌های بهسازی و پایدارسازی زمین»

مقدمه

احتمالاً مهم‌ترین عامل در موفقیت یا عدم موفقیت قابل توجه یک پروژه تونل‌سازی، کنترل مناسب آب زیرزمینی است. در سوابق کارهای تونل‌سازی موارد متعددی وجود دارد که هزینه‌های بسیار زیاد و تأخیرهای قابل توجه در جریان احداث به دلیل عدم پیش‌بینی مشکل جریان آب به‌وقوع پیوسته است.

بهسازی زمین با هدف دستیابی به شرایط مناسب از زمین صورت می‌گیرد که امکان حفر و پیشروی ایمن، بدون وجود تأخیرهای زیاد و همراه با میزان قابل قبولی از کنترل جریان آب مواد خرد شده و ریزش سنگ مرتبط با آن به داخل تونل را میسر می‌سازد.

بهسازی زمین به‌طور کلی و مرسوم معمولاً به ۳ روش زیر صورت می‌گیرد:

۱) زهکشی و خشک‌اندازی ۲) تزریق دوغاب ۳) یخبندان زمین

زهکشی و خشک‌اندازی:

هدف اصلی در استفاده از روش زهکشی، کاهش تأثیر آب بر حفریات جهت پایدارسازی حفریات است. حضور آب علاوه بر مشکلات اجرایی حین پروژه سبب کاهش مقاومت و مدول الاستیسیته محیط دربرگیرنده فضای زیرزمینی و همچنین سبب افزایش نسبت پواسون سنگ یا خاک دربرگیرنده می‌شود. وجود آب در محیط‌هایی با کانی‌های رسی (کائولینیت، ایلیت و ...) باعث احتمال وقوع پدیده آماس و تغییر تنش در طول درزه و شکاف‌ها می‌شود.

زهکشی به دو دسته تقسیم می‌شود:

۱ـ زهکشی قبل از حفر فضا، ۲ـ زهکشی پس از حفر فضا

مثال ۱: کدام‌یک از موارد زیر مربوط به شرایط بهسازی زمین نیست؟

۱) پایدارسازی زمین تا قبل از نصف پوشش نهایی
۲) از بین‌بردن کامل فشار آب
۳) پایداری بهینه کار تونل‌سازی
۴) افزایش مقاومت زمین دربرگیرنده

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» هدف اصلی از بهسازی زمین، ایجاد شرایطی است که بتوان امکان حفر را در شرایط ایمن و بدون وقفه‌های طولانی‌مدت کنترل کرد. گزینه‌های (۱)، (۳) و (۴) هر سه نشان‌دهنده بهسازی و پایدارسازی است. گزینه‌ی (۲) نیز می‌تواند یکی از شرایط بهسازی را داشته باشد اما در بهسازی، هدف از بین‌بردن کامل فشار آب نیست بلکه نیاز است تا فشار آب را به حداقل ممکن رساند و در آن شرایط پروژه مربوطه را انجام داد. از بین‌بردن کامل فشار آب چندان توجیه اقتصادی و فنی ندارد.

مثال ۲: حضور آب در محیط اطراف فضای زیرزمینی سبب رخداد چه پدیده‌ای نمی‌شود؟

۱) افزایش نسبت پواسون
۲) کاهش مقاومت توده سنگ دربرگیرنده
۳) افزایش فشار وارد بر پوشش
۴) افزایش مدول یانگ

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» در اکثر پروژه‌های زیرزمینی حضور آب به عنوان یک مزاحم چه در مرحله طراحی و چه در مرحله اجرا تلقی می‌شود و تمام سعی و تلاش بر این است که آب را از محیط تا حد ممکن حذف نمود لذا حضور آب سبب کاهش پارامترهای مقاومتی سنگ می‌شود.

نکته ۱: هرچه نسبت پواسون زیادتر شود نشان از سست‌شدن محیط است. نسبت پواسون برای آب حدود ۰/۵ است.