



دانشگاه مهندسی - گروه مهندسی عمران

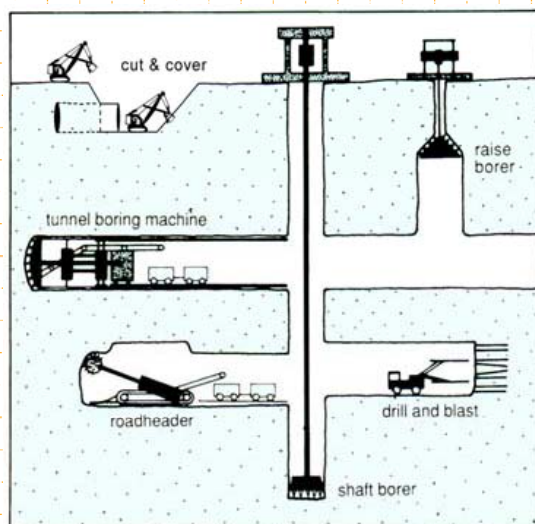


اصول مهندسی تونل

فصل چهارم: تونل سازی در زمین های نرم

علی میرزایی

۴-۱- روش های حفاری



• انتخاب یک سیستم مناسب تونل سازی برای یک پروژه با توجه به شرایط زمین و محدودیت های پروژه انجام می پذیرد.

• روش های متداول حفاری:

- ۱- کند و پوش (Cut & Cover)
- ۲- ماشین حفار تونل (Tunnel Boring Machine)
- ۳- انفجار (Drill & Blast)
- ۴- ماشین های بازویی (Roadheader)
- ۵- ماشین حفار شفت (Shaft borer)
- ۶- ماشین حفار بالا بر (Raise borer)

روش های متداول حفاری

۴-۱- روش های حفاری

- در انتخاب روش و ماشین آلات حفاری معمولاً به نکات ذیل توجه می گردد:

۱- شرایط زمین و بازه تغییرات آن

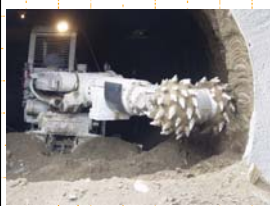
۲- هندسه، قطر و طول تونل

۳- سازه های مجاور پروژه و میزان جابجایی های ایجاد شده

۴- پیامد های کاهش مقاومت زمین

۵- هزینه های احداث تونل

۶- امنیت کارگران



۲/۳۱

علی میرزایی

فصل چهارم: تونل سازی در زمین های نرم

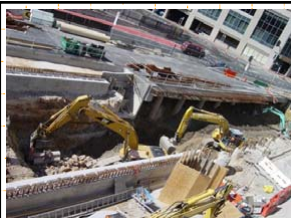
اصول مهندسی تونل

۴-۲- روش کند و پوش

- در روش کند و پوش، تونل درون یک فضای کاملاً حفاری شده ساخته شده (ترانشه) و سپس روی آن پوشانده می شود.

- از روش کند و پوش هنگامی استفاده می شود که تونل به سطح زمین نزدیک بوده و حفاری از سطح زمین اقتصادی، ممکن و قابل قبول باشد.

- در این روش ابتدا یک ترانشه حفاری شده و سپس تونل با تعبیه مقاطع بتنی پیش ساخته نیم دایره ساخته شده و در انتها روی آن پوشانده شده و مجدداً جاده بر روی آن احداث می گردد.

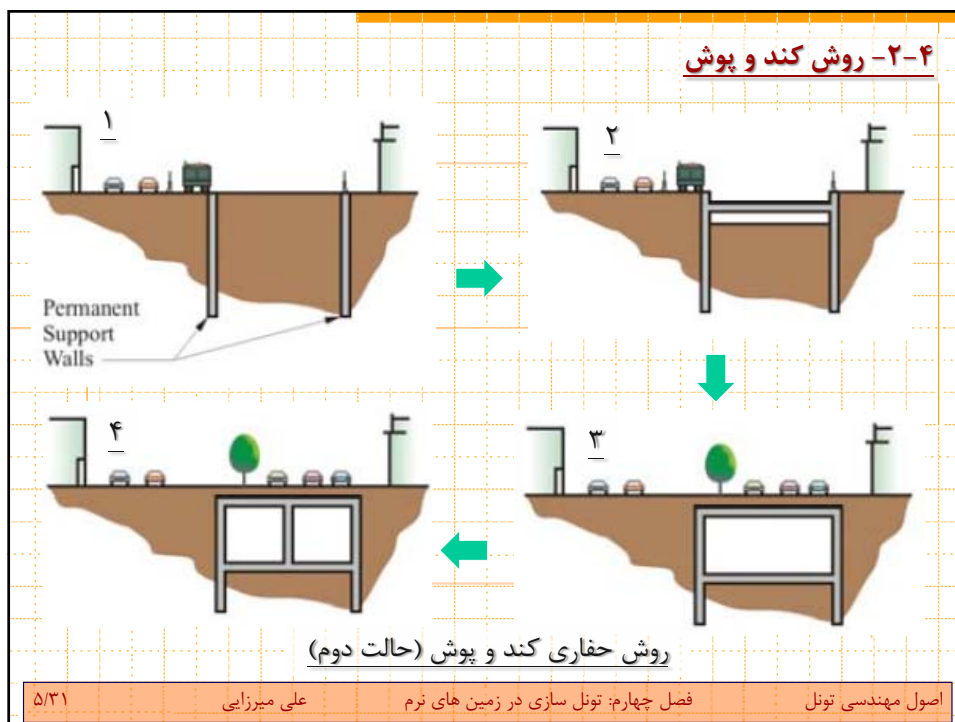
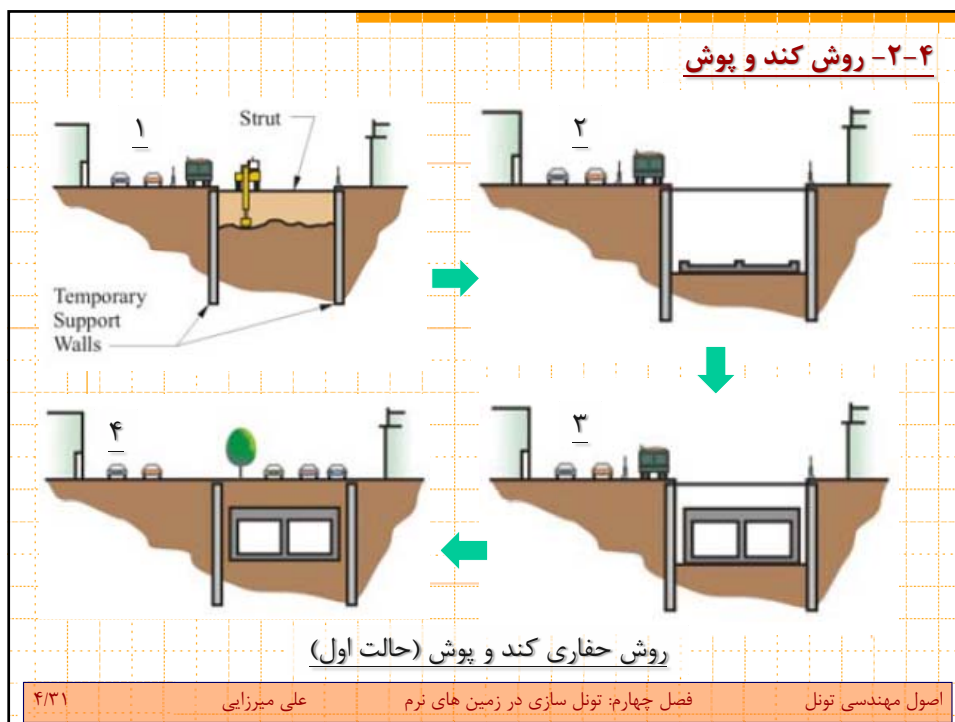


۳/۳۱

علی میرزایی

فصل چهارم: تونل سازی در زمین های نرم

اصول مهندسی تونل



۲-۴- روش کند و پوش

تکیه گاه حفاری:

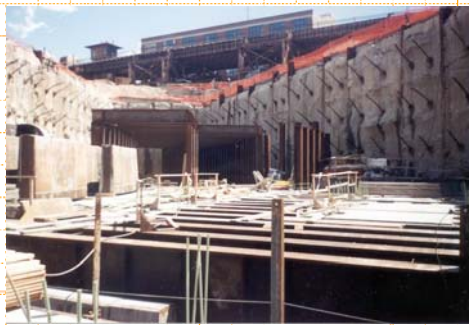
• **دائم:** به عنوان یک عضو در داخل تونل باقی می ماند.

• تکیه گاه حفاری می تواند به دو صورت اجرا گردد:

• **موقت:** بعد از احداث پروژه از درون ترانشه خارج می گردد.



تکیه گاه موقت



تکیه گاه دائم

۶/۳۱

علی میرزایی

فصل چهارم: تونل سازی در زمین های نرم

اصول مهندسی تونل

۲-۴- روش کند و پوش

تکیه گاه حفاری:

• روش های اجرای تکیه گاه حفاری:



سپر کوبی



بتن پاشی



دیوار بتنی

۷/۳۱

علی میرزایی

فصل چهارم: تونل سازی در زمین های نرم

اصول مهندسی تونل

۲-۴- روش کند و پوش

تکیه گاه حفاری:

• روش های اجرای تکیه گاه حفاری:



۸/۳۱ علی میرزایی فصل چهارم: تونل سازی در زمین های نرم اصول مهندسی تونل

۲-۴- روش کند و پوش

عایق بندی:

• تجهیزات عایق بندی تونل بایستی با توجه به شرایط موجود و سازگاری آن با سازه تونل انتخاب شده و نصب گردند.

جابجایی های زمین و تاثیر آن بر روی سازه های مجاور:

• در روش حفاری کند و پوش، امکان رخداد تغییر شکل در زمین عمدتاً به واسطه تغییر شکل دیواره های نگهدارنده و یا تحکیم خاک به واسطه تغییرات تراز آب زیر زمینی وجود دارد.

• در این گونه حفاری ها، حوضه تاثیر حفاری بر روی سازه های مجاور پیش از احداث پروژه مطالعه شده و بعد از احداث ترانше رفتار زمین بازبینی و اندازه گیری می شود.

۹/۳۱ علی میرزایی فصل چهارم: تونل سازی در زمین های نرم اصول مهندسی تونل

۴-۲- روش کند و پوش

جابجایی های زمین و تاثیر آن بر روی سازه های مجاور:

• برای کاهش میزان جابجایی های زمین رعایت موارد ذیل می تواند مفید واقع گردد:

❖ بهسازی خاک منطقه قبل از شروع به حفاری

❖ تقویت زیر سازه های موجود

❖ ابزار گذاری و قرائت رفتار زمین در حین و بعد از عملیات حفاری

❖ استفاده از دیواره های نگهدارنده سخت تر و عایق تر

❖ استفاده از سازه های نگهدارنده سخت تر و بهم نزدیک تر

۱۰/۳۱

علی میرزایی

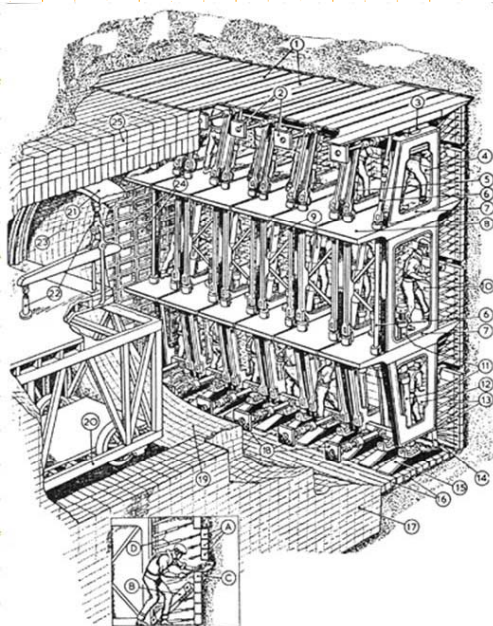
فصل چهارم: تونل سازی در زمین های نرم

اصول مهندسی تونل

۴-۳- حفر تونل در زمین های نرم

• حفر تونل در زمین های نرم و اشباع در اوایل قرن نوزدهم میلادی توسط مارک برونل با ابداع روش حفاری سپر کوبی و حفر تونل تایمز آغاز گردید.

• سپر ابداع شده توسط برونل دارای سه ردیف و در هر ردیف شش سلول مجزا بوده که مجموعاً در یک سپر ۱۸ کارگر به طور مستقل مشغول به حفاری بوده اند.



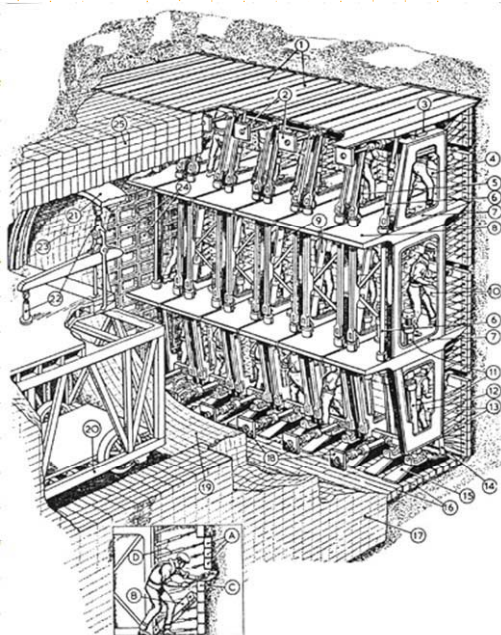
۱۱/۳۱

علی میرزایی

فصل چهارم: تونل سازی در زمین های نرم

اصول مهندسی تونل

۳-۴- حفر تونل در زمین های نرم



• سپر برونل به وسیله جک های هیدرولیکی به لاینینگ تکیه داده شده است.

• بعد از اتمام حفاری تمام مقطع، ادامه لاینینگ تونل اجرا شده و سپر برونل به سمت جلو حرکت داده می شده است.

• سپر برونل به ارتفاع ۶/۷ متر و عرض ۹/۷ متر بوده و دارای متوسط سرعت حفاری ۱۲/۵ الی ۴/۲ متر در هفته بوده است.

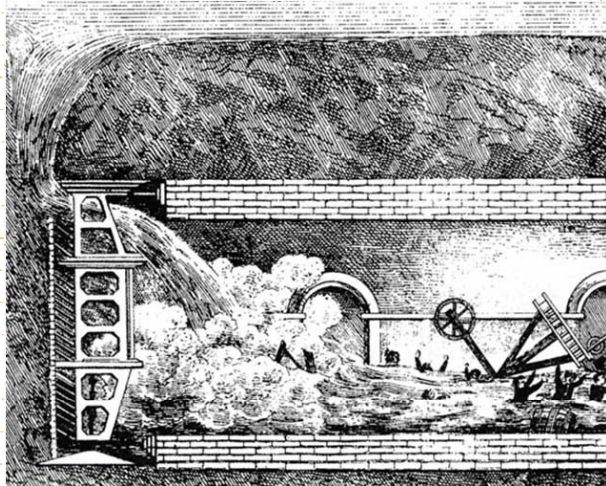
۱۲/۳۱

علی میرزایی

فصل چهارم: تونل سازی در زمین های نرم

اصول مهندسی تونل

۳-۴- حفر تونل در زمین های نرم



• یکی از مشکلات اصلی در روش حفاری سپرکوبی برونل، امکان ورود آب های زیر زمینی به درون مقطع تونل بوده که این امر باعث کشته شدن ۶ نفر در طول پروژه حفر تونل تایمز گردید.

• علی رغم تکمیل تونل تایمز در سال ۱۸۴۳، این تونل امروزه نیز بدون هیچ گونه عملیات بهسازی / تغییرات در حال بهره برداری و استفاده شهری می باشد.

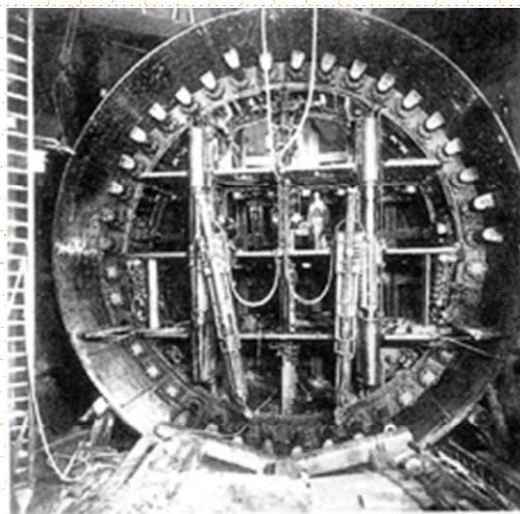
۱۳/۳۱

علی میرزایی

فصل چهارم: تونل سازی در زمین های نرم

اصول مهندسی تونل

۳-۴- حفر تونل در زمین های نرم



- در سال ۱۸۶۹، گریت هد از یک سپر دایروی به قطر ۲/۱ متر از جنس چدن برای حفاری استفاده نمود.

- نحوه حرکت سپر گریت هد نیز مشابه با سپر برونل با استفاده از جک های هیدرولیکی بوده است.

- سپر ابداعی گریت هد الگوی ساخت سپرهای باز امروزی در حفر تونل ها بوده است.

۱۴/۳۱

علی میرزایی

فصل چهارم: تونل سازی در زمین های نرم

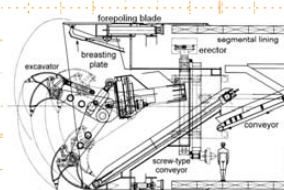
اصول مهندسی تونل

۴-۴- حفر تونل به روش سپر کوبی

- یکی از متداول ترین روش های تونل سازی در زمین های نرم استفاده از روش های حفر تونل به کمک سپر کوبی می باشد.

- مزایای استفاده از روش سپر کوبی در زمین های نرم:

- حفر کل مقطع تونل در یک مرحله امکان پذیر می باشد.
- دیواره تونل دارای یک تکیه گاه موقت کامل و دارای قابلیت تحرک رو به جلو می باشد.
- در حین حرکت تکیه گاه موقت رو به جلو، لاینینگ نهایی تونل به عنوان تکیه گاه دائمی تونل اجرا شده است.



۱۵/۳۱

علی میرزایی

فصل چهارم: تونل سازی در زمین های نرم

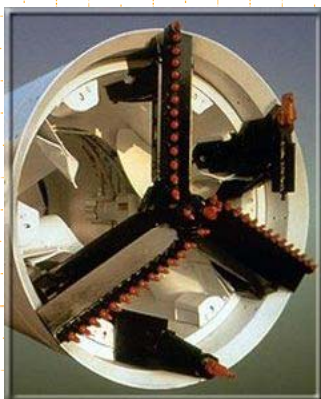
اصول مهندسی تونل

۴-۴- حفر تونل به روش سپر کوبی

• طبقه بندی سپرها با توجه به شکل وجه حفاری آن ها:

۱- سپر با جلوی باز (Open Face Shield):

• هنگامی که جبهه حفاری زمین بدون نیاز به فشار سپر بتواند پایدار باقی مانده و دچار ریزش نگردد از سپرهای با جلوی باز برای حفاری استفاده می شود.



• در سپرهای با جلوی باز، تنها تکیه گاه بین زمین و سپر، تیغه های حفاری می باشد.

۱۶/۳۱

علی میرزایی

فصل چهارم: تونل سازی در زمین های نرم

اصول مهندسی تونل

۴-۴- حفر تونل به روش سپر کوبی

• طبقه بندی سپرها با توجه به شکل وجه حفاری آن ها:

۲- سپر با جلوی بسته (Closed Face Shield):

• در صورتی که جبهه حفاری زمین نتواند بدون وجود تکیه گاه پایدار باقی بماند از سپرهای با جلوی بسته استفاده می گردد.



• در این گونه سپرها، تیغه حفاری دارای امکان تزریق گل (عموما بنتونیت) و یا اعمال فشار هوا را به جبهه حفاری دارا می باشد.

• با استفاده از سپری های با جلوی بسته امکان حفر تونل با قطرهای بزرگتر میسر می باشد.

۱۷/۳۱

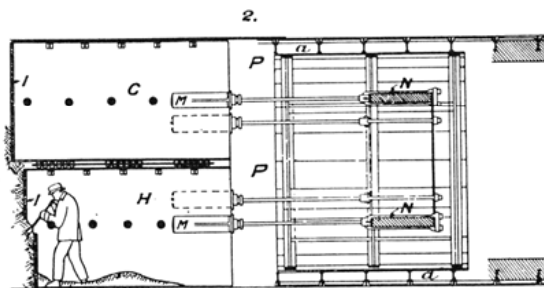
علی میرزایی

فصل چهارم: تونل سازی در زمین های نرم

اصول مهندسی تونل

۴-۴- حفر تونل به روش سپر کوبی

• استفاده از هوای فشرده:



• برای حل مشکل ورود آب های زیر زمینی به درون تونل، گریت هد در سال ۱۸۸۶ برای حفر تونل متروی شهر لندن، فشار هوای درون مقطع حفاری را به صورت مصنوعی افزایش داد.



• تا اوائل قرن بیستم میلادی، اغلب تونل های ساخته شده در جهان با روش پیشنهادی گریت هد حفر شدند.

۱۸/۳۱

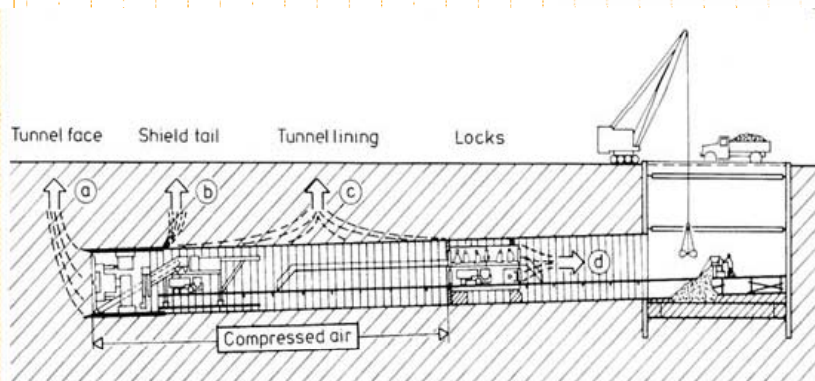
علی میرزایی

فصل چهارم: تونل سازی در زمین های نرم

اصول مهندسی تونل

۴-۴- حفر تونل به روش سپر کوبی

• استفاده از هوای فشرده:



- (a) Air leaks at tunnel face
- (b) Air leaks at the shield tail
- (c) Air leaks due to escape through joints in the lining
- (d) Air consumption when passing persons or material through the airlock chambers

۱۹/۳۱

علی میرزایی

فصل چهارم: تونل سازی در زمین های نرم

اصول مهندسی تونل

۴-۴- حفر تونل به روش سپر کوبی

• استفاده از هوای فشرده:

❖ نکات مهم در استفاده از هوای فشرده در حفر تونل:

- فشار هوا متناسب با فشار هیدرواستاتیک کنترل و تنظیم می گردد.
- حداکثر فشار هوای درون تونل نبایستی از ۴ بار (۴۰۰ کیلو پاسکال) تجاوز نماید.
- از فشار هوا نمی توان به عنوان تکیه گاه جبهه حفاری استفاده نمود و بایستی برای این امر از تکیه گاه های مکانیکی استفاده کرد.
- پایداری فشار هوای ایجاد شده در تونل به مقدار زیادی به میزان نفوذپذیری دانه های خاک نسبت به هوا وابسته می باشد.
- پیشنهاد می گردد تا از این روش برای حالاتی استفاده شده که میزان پوشش خاک بالای تونل برابر حداقل ۲ برابر قطر دهانه تونل باشد.

۲۰/۳۱

علی میرزایی

فصل چهارم: تونل سازی در زمین های نرم

اصول مهندسی تونل

۴-۴- حفر تونل به روش سپر کوبی

• استفاده از هوای فشرده:

❖ معایب اصلی استفاده از هوای فشرده در حفاری:

- کاهش میزان کارکرد کارگران و امکان صدمات جانی
- خطر آتشسوزی به واسطه حجم بالای اکسیژن در تونل
- کوتاه تر بودن زمان کار کارگران
- سختی استفاده در زمین های با نفوذپذیری بالا نسبت به هوا

۲۱/۳۱

علی میرزایی

فصل چهارم: تونل سازی در زمین های نرم

اصول مهندسی تونل

۴-۴- حفر تونل به روش سپر کوبی

❖ استفاده از گِل در حفاری

• امروزه به واسطه مشکلاتی همچون ایمنی، سلامت و اجرا (به عنوان مثال ثابت نگه داشتن فشار هوا در زمین های با نفوذپذیری بالا) کمتر از هوای فشرده در حفاری های سپری استفاده می گردد.

• در بیشتر حفاری های کنونی، از سپرهای مجهز به سیستم تزریق گِل حفاری (Slurry Shield) و یا سپرهای مجهز به سیستم تعادل فشار جانبی زمین در جبهه حفاری (Earth Pressure Balance Shield) به جای هوای فشرده استفاده می گردد.



۲۲/۳۱

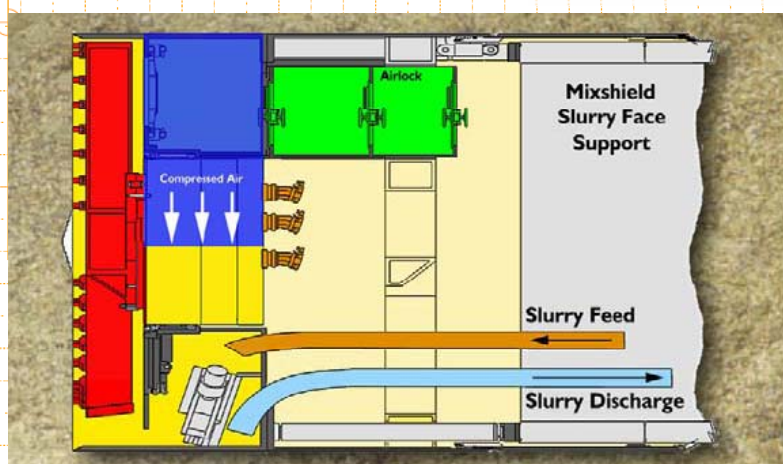
علی میرزایی

فصل چهارم: تونل سازی در زمین های نرم

اصول مهندسی تونل

۴-۴- حفر تونل به روش سپر کوبی

❖ استفاده از گِل در حفاری



• سپرهای ترکیبی (Mixed Shields): قابلیت همزمان تزریق گِل حفاری و اعمال هوای فشرده

۲۳/۳۱

علی میرزایی

فصل چهارم: تونل سازی در زمین های نرم

اصول مهندسی تونل

۴-۴- حفر تونل به روش سپر کوبی

❖ استفاده از گِل در حفاری



• در سپرهای مجهز به سیستم تزریق گِل در حفاری، به جای افزایش فشار هوا، گِل بنتونیت با فشار دلخواه در داخل وجه مورد حفاری زمین تزریق شده و باعث پایداری جبهه حفاری خواهد شد.

• همچنین به واسطه تزریق بنتونیت و ورود بنتونیت به درون حفرات خاک در جبهه حفاری، امکان کنترل فشار آب حفره ای زمین در جبهه حفاری با کنترل فشار آب درون بنتونیت و نهایتاً پایداری نگه داشتن جبهه حفاری میسر می باشد.

۲۴/۳۱

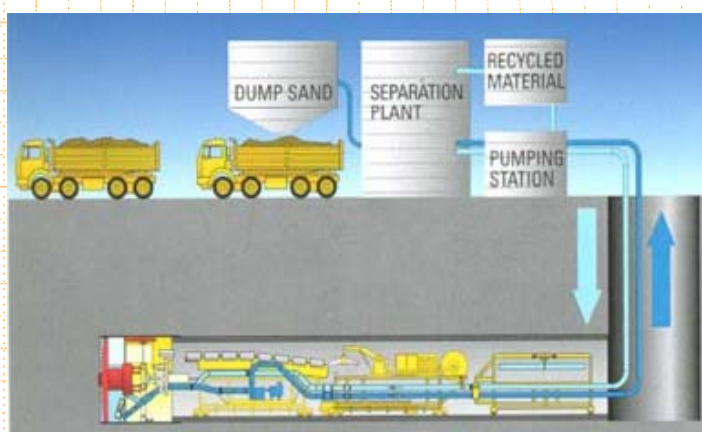
علی میرزایی

فصل چهارم: تونل سازی در زمین های نرم

اصول مهندسی تونل

۴-۴- حفر تونل به روش سپر کوبی

❖ استفاده از گِل در حفاری



• با پیشرفت حفاری، مخلوط مصالح حفاری شده از زمین و بنتونیت به مخازن تفکیک سازی انتقال داده شده و گِل بنتونیت تفکیک شده و مجدداً در چرخه تزریق استفاده می گردد.

۲۵/۳۱

علی میرزایی

فصل چهارم: تونل سازی در زمین های نرم

اصول مهندسی تونل

۴-۴- حفر تونل به روش سپر کوبی

❖ استفاده از گل در حفاری

مزایا:

- داشتن یک روش تونل سازی ایمن همراه با نشست های جزئی در جبهه حفاری

معایب:

- نیاز به تجهیزات پمپاژ، مخازن نگه داری و یا تفکیک سازی بنتونیت و تجهیزات مرتبط.
- نیاز به دفن بقایای غیر قابل تفکیک بنتونیت و خاک مربوط به جبهه حفاری زمین و مشکلات محیط زیستی مرتبط.

۲۶/۳۱

علی میرزایی

فصل چهارم: تونل سازی در زمین های نرم

اصول مهندسی تونل

۴-۴- حفر تونل به روش سپر کوبی

❖ سپرهای با قابلیت متعادل نمودن فشار جانبی زمین

- استفاده از تزریق گل بنتونیت در حفاری تونل در خاک های حاوی ریزدانه بالا باعث ایجاد سختی مضاعف در تفکیک و بازیافت گل بنتونیت از مصالح حاصل از حفاری زمین و به تبع آن افزایش هزینه می گردد.

- به غیر از مشکلات هزینه بالای تزریق گل بنتونیت در حفاری های درون خاک های ریز دانه و مشکلات زیست محیطی، در اغلب پروژه های تونل سازی درون شهرها، فضای لازم جهت نصب تجهیزات مرتبط با تزریق/تفکیک گل بنتونیت وجود ندارد.

- با عنایت به موارد مذکور، سپرهای با قابلیت متعادل نمودن فشار جانبی زمین (Earth Pressure Balanced Shields) و یا (EPB Shields) در سال ۱۹۷۰ در کشور ژاپن مورد استفاده واقع گردیدند.

۲۷/۳۱

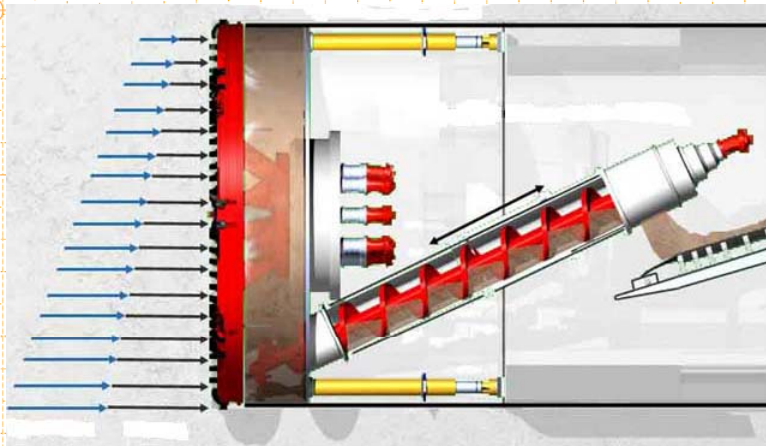
علی میرزایی

فصل چهارم: تونل سازی در زمین های نرم

اصول مهندسی تونل

۴-۴- حفر تونل به روش سپر کوبی

❖ سپرهای با قابلیت متعادل نمودن فشار جانبی زمین



• سپرهای EPB فشاری معادل با فشار جانبی زمین به جبهه حفاری وارد می نمایند.

۲۸/۳۱

علی میرزایی

فصل چهارم: تونل سازی در زمین های نرم

اصول مهندسی تونل

۴-۴- حفر تونل به روش سپر کوبی

❖ سپرهای با قابلیت متعادل نمودن فشار جانبی زمین

• مزیت اصلی سپرهای EPB شامل عدم نیاز به مجموعه تفکیک سازی و یا تزریق بوده و دارای توجیه اقتصادی در حفاری زمین های حاوی ریزدانه بالا همچون رس و یا لای نیز می باشد.

• برای سهولت در انتقال، در برخی از سپرهای EPB مواد حفاری شده با فوم های قابل بازیافت ترکیب شده و به سمت خارج تونل انتقال می یابند.

• در سپرهای EPB، تمامی مصالح خروجی از دستگاه طبیعی و مربوط به جبهه حفاری بوده و در صورت استفاده از مواد فوم در حین حفاری، این گونه مواد با گذشت زمان کوتاه (کمتر از یک ماه) کاملاً بازیافت می گردند.

۲۹/۳۱

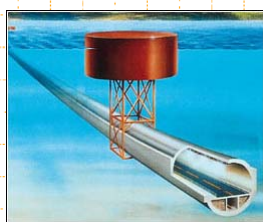
علی میرزایی

فصل چهارم: تونل سازی در زمین های نرم

اصول مهندسی تونل

۴-۵- تونل های غوطه ور / مستغرق

• **تونل های غوطه ور:** از تونل های غوطه ور می توان در شرایط اجرایی سخت همچون تونل سازی در خاک نرم زیر یک رودخانه و ... استفاده نمود.



• **تونل های مستغرق:** از تونل های مستغرق می توان برای حفر تونل در اعمال دریاها که شرایط حفر زمین سخت و یا غیر ممکن بوده استفاده نمود.

۳۰/۳۱

علی میرزایی

فصل چهارم: تونل سازی در زمین های نرم

اصول مهندسی تونل

۴-۶- جمع بندی

روش تونل سازی	کاربرد
کند و پوش	تونل های نزدیک به سطح زمین
سپر باز	حالتی که جبهه حفاری زمین بعد از حفاری پایدار بماند
سپر بسته	حفاری در زمین های نرم و ضعیف (همچون رس، ماسه و یا لای) در جبهه های حفاری فاقد پایداری و ریزشی
سپر کوبی با هوای فشرده	حفاری در محیط های اشباع
سپر کوبی و تزریق گل حفاری	حفاری در زمین های ریزشی درشت دانه و اشباع
سپر کوبی ترکیبی	
سپر کوبی و متعادل نمودن فشار جانبی زمین	حفاری در زمین های ریزشی ریزدانه و اشباع

مقایسه روش های متداول تونل سازی در زمین های نرم

۳۱/۳۱

علی میرزایی

فصل چهارم: تونل سازی در زمین های نرم

اصول مهندسی تونل

