



دانشگاه مهندسی - گروه مهندسی عمران



اصول مهندسی تونل

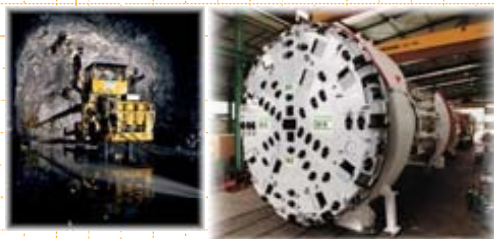
فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

علی میرزایی

۵-۱- مقدمه



- برای ایجاد حفاری در سنگ ها، بایستی با استفاده از یک مکانیزم مناسب ترک های لازم را در سنگ ایجاد نموده و آن را به تکه های کوچک تر تقسیم بندی نمود.



- در این فصل در ابتدا در مورد مکانیزم های گسیختگی سنگ ها و روش های طبقه بندی سنگ ها بحث شده است.

- در ادامه نیز به شرح و مقایسه دو نوع روش متداول حفاری در سنگ های سخت شامل ۱- گمانه زنی و انفجار و ۲- ماشین های حفاری پرداخته شده است.

۵-۲- مکانیزم های گسیختگی در سنگ ها

- شناخت نحوه و مکانیزم گسیختگی توده سنگ های پیرامون یک سازه زیر زمینی همچون تونل، در طراحی سازه نگهبان مرتبط با آن بسیار مهم می باشد.
- مکانیزم گسیختگی در سنگ ها تابع دو پارامتر می باشد:
 - ۱- شدت تنش های برجا
 - ۲- مشخصات توده سنگ
- در اعماق نزدیک به سطح زمین و با شدت تنش های برجای کمتر، توده سنگ به صورت بلوکه ای بوده و مکانیزم گسیختگی سنگ عمدتاً شامل سقوط بلوک های سنگی تحت اثر وزن بلوک ها از دیواره و سقف تونل می باشد.
- در اعماق پایین تر زمین، شدت تنش های برجا قابل توجه بوده و گسیختگی به واسطه گسیخته شدن توده سنگ رخ پیدا می کند.

۲/۶۴

علی میرزایی

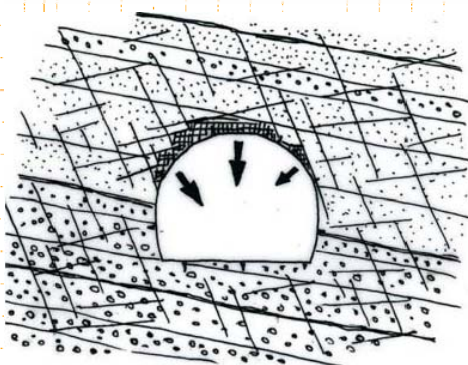
فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۵-۲- مکانیزم های گسیختگی در سنگ ها

۵-۲-۱- گسیختگی بلوکی:

- با توجه به حجم و اندازه درزه های توده سنگ و اندازه مقطع تونل، توده سنگ را می توان یک ماده پیوسته و یا ناپیوسته در نظر گرفت.



وضعیت ناپیوسته توده سنگ

- در اغلب حالات، با توجه به قطر مقطع تونل و وضعیت درزه های سنگ، رفتار توده سنگ مشابه یک ماده ناپیوسته بوده و بایستی بلوک ها و گوه های بحرانی را شناسایی و با روش های مناسب مهار نمود.

۳/۶۴

علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۲-۵- مکانیزم های گسیختگی در سنگ ها

۱-۲-۵- گسیختگی بلوکی:

- در اغلب گسیختگی های بلوکی، شروع گسیختگی ابتدا با رها شدن بلوک و یا گوه بحرانی آغاز شده و گسیختگی کامل با رها شدن سایر بلوک ها ادامه می یابد.



نحوه انتشار گسیختگی بلوکی در توده سنگ های ناپیوسته

۴/۶۴

علی میرزایی

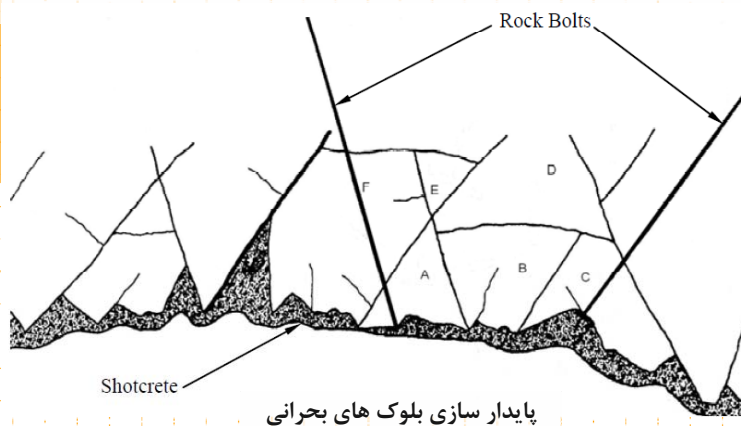
فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۲-۵- مکانیزم های گسیختگی در سنگ ها

۱-۲-۵- گسیختگی بلوکی:

- با مهار و پایدار نمودن بلوک بحرانی، می توان از رخداد گسیختگی بلوکی ممانعت به عمل آورد.



پایدار سازی بلوک های بحرانی

۵/۶۴

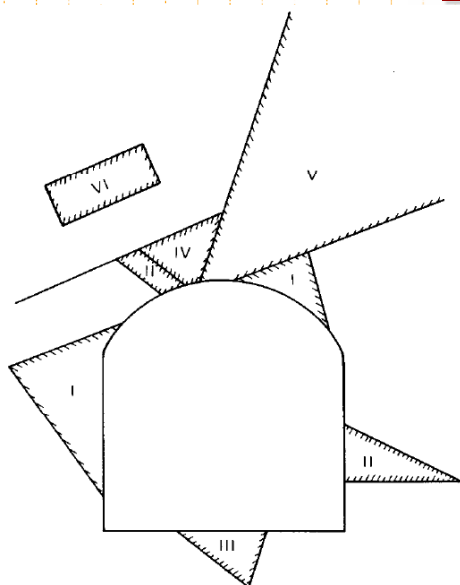
علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۵-۲- مکانیزم های گسیختگی در سنگ ها

۵-۲-۱- گسیختگی بلوکی:



• منظور از بلوک و یا گوه بحرانی، بلوکی (گوه ای) بوده که در صورت عدم پایدارسازی آن، رها شده و آزاد می گردد.

• برای تشخیص بلوک های بحرانی، معمولاً از تئوری بلوک ها استفاده می گردد.

• در تئوری بلوک ها، با داشتن شیب و راستای درزه ها، می توان بلوک های بحرانی را تشخیص داد.

۶/۶۴

علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

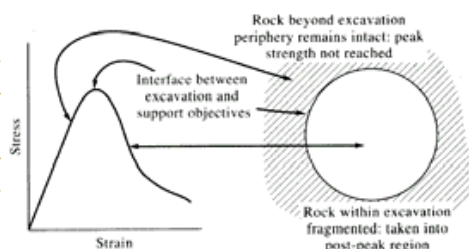
اصول مهندسی تونل

۵-۲- مکانیزم های گسیختگی در سنگ ها

۵-۲-۲- گسیختگی توده سنگ:

• در اعماق زمین به واسطه بالا بودن تنش ها، اغلب گسیختگی های ایجاد شده در سنگ ها به واسطه گسیخته شدن توده سنگ می باشد.

• در این گونه حالات، تنش های ایجاد شده در سنگ از مقاومت سنگ بیشتر بوده و باعث گسیختگی توده سنگ می گردد.



• به عنوان مثال: در اغلب سنگ ها، مقاومت کششی آن ها $1/10$ مقاومت فشاری آن ها بوده و در نتیجه مساحت زیر نمودار تنش - کرنش حالت کششی $1/100$ نمودار مربوط به حالت فشاری می باشد.

• در نتیجه انرژی لازم برای گسیخته نمودن یک سنگ در حالت کششی $1/100$ انرژی مورد نیاز برای گسیخته نمودن آن در حالت فشاری است.

۷/۶۴

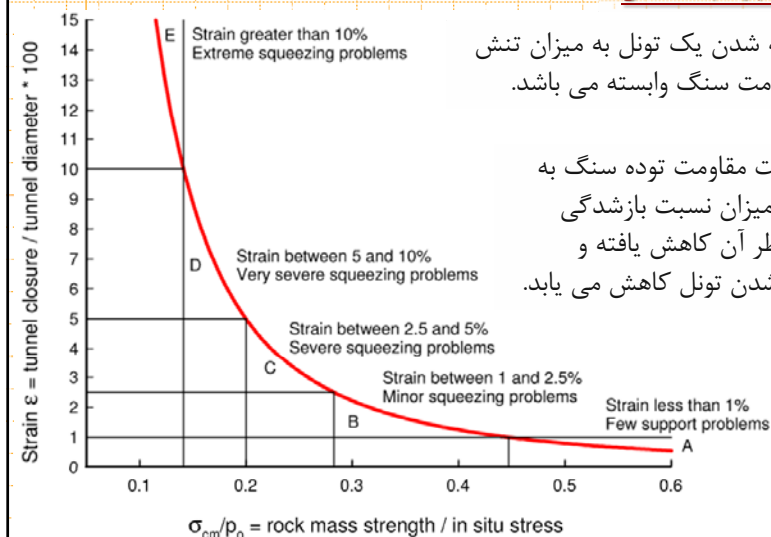
علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۲-۵- مکانیزم های گسیختگی در سنگ ها

۳-۲-۵- تورم و مچاله شدن



• پتانسیل مچاله شدن یک تونل به میزان تنش های برجا و مقاومت سنگ وابسته می باشد.

• با افزایش نسبت مقاومت توده سنگ به تنش های برجا میزان نسبت بازشدگی دهانه تونل به قطر آن کاهش یافته و پتانسیل مچاله شدن تونل کاهش می یابد.

۸/۶۴

علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۲-۵- مکانیزم های گسیختگی در سنگ ها

۳-۲-۵- تورم و مچاله شدن



• مچاله شدن یک تونل به واسطه افزایش تنش های برجا

۹/۶۴

علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

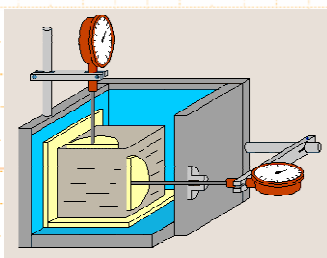
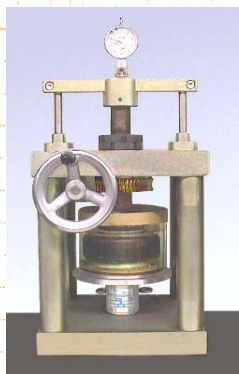
۵-۲- مکانیزم های گسیختگی در سنگ ها

۵-۲-۳- تورم و مچاله شدن

• به واسطه افزایش درصد رطوبت درون حفره ها و درزه های سنگ امکان افزایش حجم توده سنگ و گسیختگی به واسطه تورم وجود دارد.

• میزان ذرات رسی موجود درون حفرات و درزه های سنگ بر روی پتانسیل تورم توده سنگ موثر می باشد.

• پتانسیل تورم را می توان در آزمایشگاه و با استفاده از آزمایش تورم اندازه گیری نمود.



• از جمله سنگ های با پتانسیل تورم می توان به سنگ شیل حاوی مونت موریلونیت و یا بازالت هوازده اشاره نمود.

۱۰/۶۴

علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۵-۳- طبقه بندی توده سنگ

۵-۳-۱- مقدمه

• هدف از طبقه بندی توده سنگ ها، بررسی مشخصات و رفتار سنگ ها در گروه های یکسان می باشد.

• برای طبقه بندی سنگ ها عموماً از سه سیستم طبقه بندی ترزاقی، Q و RMR استفاده می گردد.

۵-۳-۲- سیستم طبقه بندی ترزاقی

• سیستم طبقه بندی ترزاقی توده سنگ را به صورت کیفی بوده و در راستای تعیین انتخاب سیستم تکیه گاه مناسب برای تونل توسط ترزاقی (۱۹۴۶) معرفی شده است.

۱۱/۶۴

علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۵-۳- طبقه بندی توده سنگ

۵-۳-۲- سیستم طبقه بندی ترزاقی

• گروه های طبقه بندی توده سنگ در سیستم ترزاقی:

• **سنگ بکر (Intact Rock)**: سنگی که در آن درزه و ترک مویی وجود ندارد. ریزش ورقه ای از سقف تونل طی چندین ساعت یا چندین روز پس از آتشکاری امری معمولی است. این حالت به عنوان شرایط خردشدگی سنگ شناخته می شود. سنگ بکر ممکن است با وضعیت ترکیدگی نیز مواجه شود که در چنین حالتی قطعات سنگ خودبه خود و با حالت تند و خشن از دیواره ها و سقف تونل جدا می شوند.

• **سنگ لایه ای (Stratified rock)**: سنگی است که از لایه های منفرد و متوالی تشکیل شده است. در امتداد مرز لایه ها مقاومت زیادی وجود ندارد. این لایه ها ممکن است با حضور درزه های متقاطع ضعیف بشوند. در چنین سنگی شرایط ریزش ورقه ای کاملاً معمول است.

۱۲/۶۴

علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۵-۳- طبقه بندی توده سنگ

۵-۳-۲- سیستم طبقه بندی ترزاقی

• گروه های طبقه بندی توده سنگ در سیستم ترزاقی:

• **سنگ نسبتاً درزه دار (Moderately jointed rock)**: سنگی است شامل درزه ها و ترک های مویی، به همین علت بلوکهای بین درزه ها به صورت موضعی در یکدیگر رشد کرده و یا به حدی با یکدیگر قفل و بست شده اند که دیواره های قائم تونل نیاز به حائل جانبی ندارد. در سنگهای از این نوع هر دو شرایط ریزش ورقه ای و ترکیدن سنگ ممکن است پیش آید.

• **سنگ بلوکی شده و رگه دار (Blocky and seamy rock)**: سنگی است که از قطعات و خرده های سنگ بکر یا تقریباً بکر شیمیایی تشکیل شده که به طور کامل از یکدیگر جدا شده و به صورت ناقص با هم قفل و بست شده اند. در چنین سنگی ممکن است دیواره های قائم تونل به حائل جانبی نیاز داشته باشند.

۱۳/۶۴

علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۵-۳- طبقه بندی توده سنگ

۵-۳-۲- سیستم طبقه بندی ترزاقی

• گروه های طبقه بندی توده سنگ در سیستم ترزاقی:

• **سنگ خرد شده (Crushed rock):** از نظر شیمیایی بکر است. سنگی است که خصوصیات سنگ خرد شده در سنگ شکن را دارد. اگر بیشتر یا تمام قطعات خرد شده به کوچکی دانه های ماسه ی ریزدانه بوده و سیمانه شدن مجدد اتفاق نیفتاده باشد، سنگ خرد شده در زیر سطح آب خواص یک ماسه ی اشباع را از خود نشان می دهد.

• **سنگ مچاله شده (Squeezing rock):** سنگی است که به طور آهسته به داخل تونل پیشروی می کند، بدون اینکه افزایش حجم محسوسی داشته باشد. شرط لازم برای لهیدگی وجود درصد بالایی از کانیهای میکایی میکروسکوپی و کانیهای رسی با ظرفیت تورمی کم است.

• **سنگ تورمی (Swelling rock):** سنگی است که عمدتاً به علت انبساط و متورم شدن به داخل تونل پیشروی می کند. به نظر می رسد که ظرفیت تورمی محدود به سنگهایی باشد که دارای کانیهای رسی از قبیل مونت موری لونیت با ظرفیت تورمی بالا هستند.

۱۴/۶۴

علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۵-۳- طبقه بندی توده سنگ

۵-۳-۲- سیستم طبقه بندی Q

• بر پایه مشاهدات حاصل از تونل های مختلف، بارتون و همکاران (۱۹۷۴) اندیس کیفیت تونل سازی (Q) را پیشنهاد نمودند که بیانگر مشخصات توده سنگ و شرایط تکیه گاه لازم برای تونل می باشد.

• اندیس Q در بازه ۰/۰۰۱ الی ۱۰۰۰ متغیر بوده و با استفاده از رابطه زیر به صورت تابعی از ۶ پارامتر بدست می آید:

$$Q = \left[\frac{RQD}{J_n} \right] \times \left[\frac{J_r}{J_a} \right] \times \left[\frac{J_w}{SRF} \right]$$

• RQD: کیفیت طراحی سنگ، J_n عدد دسته درزه، J_r عدد زبری درزه، J_a عدد تغییرات درزه، J_w عامل کاهش آب درزه و SRF ضریب کاهش تنش.

۱۵/۶۴

علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۳-۵- طبقه بندی توده سنگ

۲-۳-۵- سیستم طبقه بندی Q

$$Q = \left[\frac{RQD}{J_n} \right] \times \left[\frac{J_r}{J_a} \right] \times \left[\frac{J_w}{SRF} \right]$$

سهم اندازه
بلوک ها

سهم مقاومت
اصطكاكى درزه ها

سهم تنش هاى
درون درزه ها

• بارتون برای تعیین سیستم نگهبان تونل، پارامتر D_e (بعد معادل) را به صورت نسبت دهانه حفاری به ESR پیشنهاد نمود:

$$D_e = \frac{\text{Excavation span, diameter or height (m)}}{\text{Excavation Support Ratio ESR}}$$

۱۶/۶۴

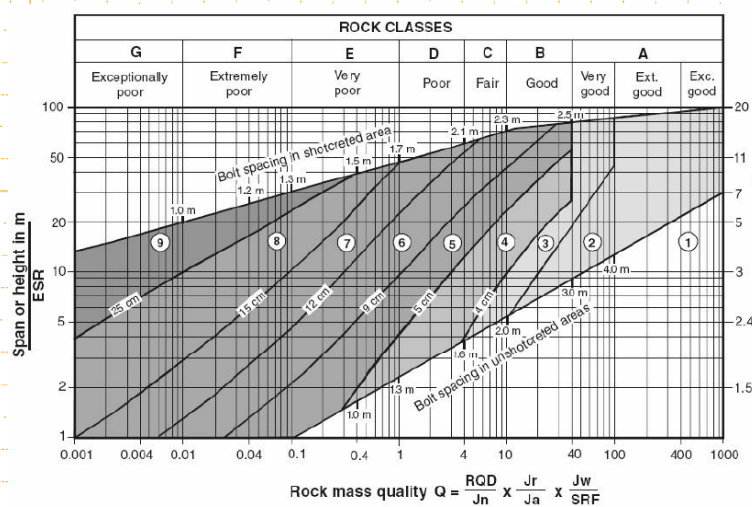
علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۳-۵- طبقه بندی توده سنگ

۲-۳-۵- سیستم طبقه بندی Q



• استفاده از سیستم طبقه بندی Q جهت طراحی سیستم نگهبان تونل

۱۷/۶۴

علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۵-۳- طبقه بندی توده سنگ

۵-۳-۲- سیستم طبقه بندی RMR

• باینوسکی (۱۹۸۴) سیستم طبقه بندی RMR را با پایه ای مشابه سیستم طبقه بندی Q پیشنهاد نمود.

• سیستم طبقه بندی RMR دارای شش مولفه می باشد:

- ۱- مقاومت تک محوری سنگ
- ۲- RQD
- ۳- فاصله درزه ها و ناپیوستگی ها
- ۴- شرایط درزه ها و ناپیوستگی ها
- ۵- شرایط آب زیر زمینی
- ۶- جهت درزه ها

• برای هر یک از پارامترهای فوق، مقدار مرتبط برای سنگ های مختلف در جداول ذکر شده است.

۱۸/۶۴

علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۵-۳- طبقه بندی توده سنگ

۵-۳-۲- سیستم طبقه بندی RMR

• مقدار RMR یک سنگ برابر مجموع مقادیر اختصاص یافته به هر یک از ۶ مورد مذکور می باشد.

• رابطه بین مقدار RMR و Q برای یک سنگ به صورت زیر می باشد:

$$Q = 10^{\frac{RMR-50}{15}}$$

• با استفاده از سیستم طبقه بندی RMR می توان وضعیت سازه نگهدارنده تونل را طراحی نمود.

۱۹/۶۴

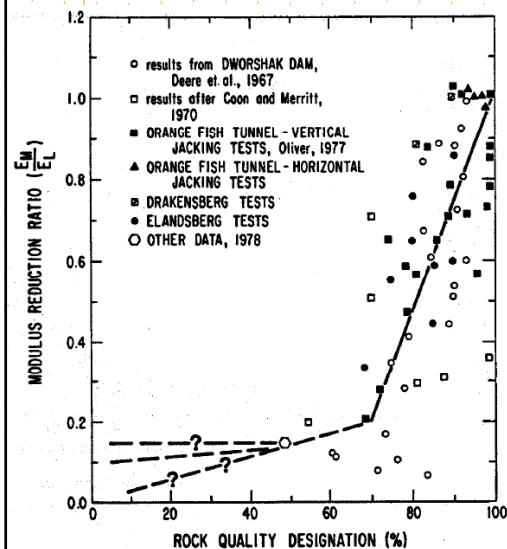
علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۳-۵- طبقه بندی توده سنگ

۲-۳-۵- سیستم طبقه بندی RMR



از جمله کاربردهای دیگر سیستم های طبقه بندی، تخمین مقدار مدول تغییر شکل توده سنگ می باشد که برای این امر روابط تجربی متعددی توسط محققین ارائه شده است.

E_m : مدول تغییر شکل توده سنگ

E_l : مدول تغییر شکل سنگ مادر (اندازه گیری شده در آزمایشگاه)

۲۰/۶۴

علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۳-۵- طبقه بندی توده سنگ

۲-۳-۵- سیستم طبقه بندی RMR

Rock Mass Deformation Modulus (MPa)	Reference
$E_m = 10^{\frac{(RMR-10)}{40}}$	Serafim and Pereira (1983)
$E_m = 25 \log_{10} Q$	Barton et. al. (1980, 1992), Grimstad and Barton (1993)
$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{cl}}{100}} \cdot 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right) *}$	Hoek and Brown (1998)
$E_m = 100000 \left[\frac{1 - D/2}{1 + e^{((75+25D-GSI)/11)}} \right] **$	Hoek and Diederichs (2006)
$E_m = 2RMR - 100 \text{ for } RMR \geq 50$	Bieniawski (1978)
$E_m = E_i / 100 \left[0.0028 RMR^2 + 0.9 \exp(RMR / 22.82) \right] E_i = 50 GPa$	Nicholson and Bieniawski (1990)
$E_m = 0.1 (RMR / 10)^3$	Read et. al. (1999)

$$(GSI = RMR_{76} = RMR_{89} - 5 = 9 \log_e Q + 44)$$

۲۱/۶۴

علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

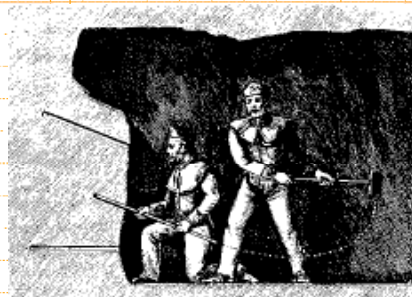
اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۴-۵-۱- مقدمه

- حفاری در سنگ ها عمدتاً به دو صورت روش های انفجاری و استفاده از ماشین آلات مکانیزه حفاری انجام می پذیرد.

۴-۵-۲- روش های انفجاری



- در این روش ابتدا گمانه های مختلف با توجه به الگوی طراحی انفجار درون سنگ حفر شده و سپس درون گمانه ها مواد منفجره را تعبیه نموده و عملیات انفجار با ترتیب و الگوی مرتبط انجام می پذیرد.

۲۲/۶۴

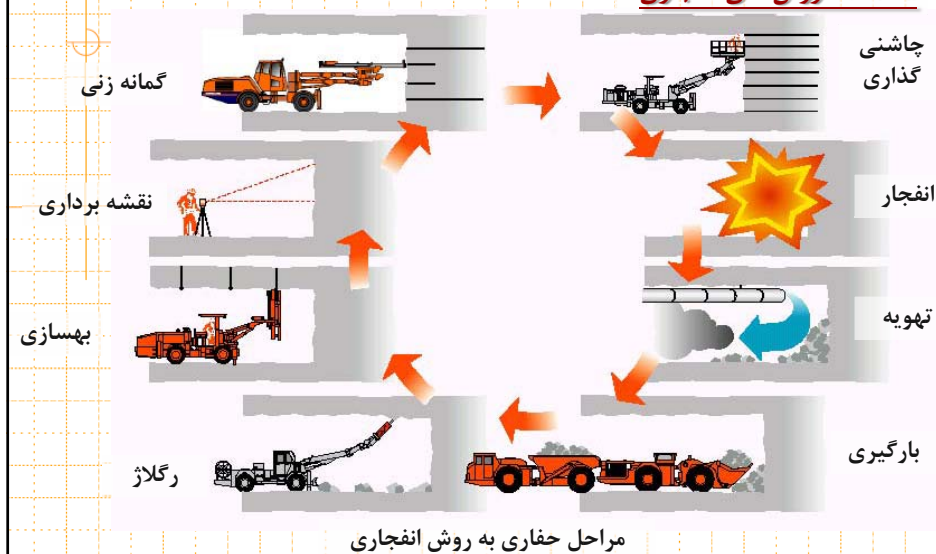
علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۴-۵-۲- روش های انفجاری



مراحل حفاری به روش انفجاری

۲۳/۶۴

علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۲-۴-۵- روش های انفجاری

- به واسطه انفجار، ترک هایی درون توده سنگ ایجاد شده که عمده تا عمق یک متر درون سنگ گسترش می یابد.
- ترک های ایجاد شده درون توده سنگ باعث ایجاد گوه ها و بلوک های جدید گشته و نهایتا باعث گسیختگی توده سنگ می گردد.
- در بیشتر حالات، به واسطه انفجار حجم بیشتری از سنگ حفاری شده و بایستی مجددا پر گردد.
- برای جلوگیری از حفاری حجم اضافه سنگ، از الگوهای انفجار استفاده می گردد.

۲۴/۶۴

علی میرزایی

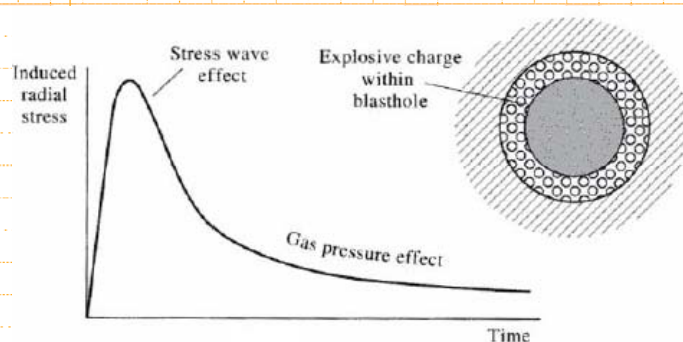
فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۲-۴-۵- روش های انفجاری

- به واسطه انفجار، یک موج تنش و فشار گاز قابل توجهی درون توده سنگ منتشر می گردد.
- موج تنش ایجاد شده باعث شکسته شدن توده سنگ به بلوک های بزرگتر و فشار گاز ایجاد شده باعث تکه تکه شدن بلوک های شکسته شده سنگ می گردد.



۲۵/۶۴

علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۴-۴-۵- روش های انفجاری

- به واسطه انفجار، ترک ها و ناپیوستگی هایی درون سنگ ایجاد شده و یا ترک ها و ناپیوستگی های موجود درون سنگ گسترش یافته و بلوک های سنگی آزاد شده و حرکت خواهند نمود.
- برای فراهم نمودن امکان حرکت آسانتر بلوک ها، بایستی بین انفجارها فاصله زمانی مناسب در نظر گرفته شود.
- برای ایجاد تاخیر و فاصله زمانی مناسب بین انفجارها، از چاشنی های تاخیری استفاده می گردد.
- در استفاده از روش حفاری انفجاری، مقطع انفجار تنها دارای یک جبهه آزاد بوده و بایستی تمهیدات لازم برای حفاری بهینه در نظر گرفته شود.

۲۶/۶۴

علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۴-۴-۵- روش های انفجاری

- برای حفاری تونل ها به روش انفجاری، ابتدا عملیات انفجار در مقطع بالای تونل انجام پذیرفته و سپس مقطع پایین تونل چاشنی گذاری شده و منفجر می گردد.
- همچنین عملیات انفجار را می توان به صورت آنی برای تمام مقطع تونل انجام داد.
- نحوه چیدمان و طراحی محل تعبیه مواد انفجاری درون سنگ، به سه پارامتر زیر وابسته می باشد:
 - ۱- جنس سنگ
 - ۲- نوع درزه ها و ناپیوستگی ها
 - ۳- مقطع نهایی مورد نظر

۲۷/۶۴

علی میرزایی

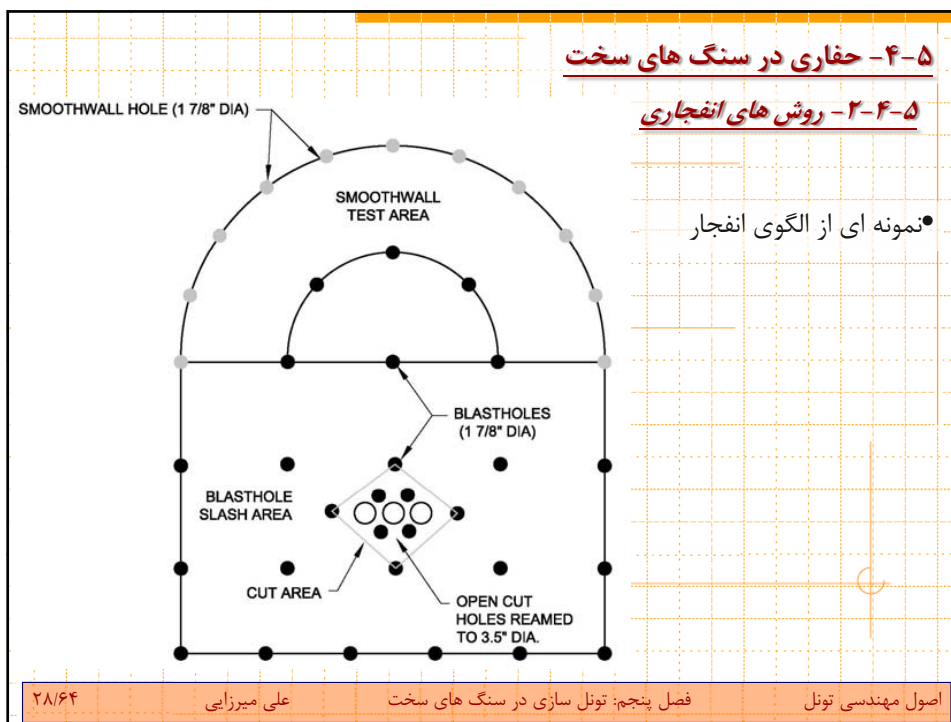
فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۲-۴-۵- روش های انفجاری

• نمونه ای از الگوی انفجار



۲۸/۶۴

علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۲-۴-۵- روش های انفجاری

• معمولاً توده های سنگ مرتبط با عملیات حفاری به روش انفجاری، دارای ناپیوستگی و درزه های کمتری بوده و آزادی توده سنگ ها برای جابجا و حرکت نمودن بعد از انفجار بسیار محدود می باشد.

• برای ایجاد آزادی بیشتر، گمانه هایی با قطر بزرگتر از گمانه های مربوط به چاشنی های انفجار درون توده سنگ حفر شده و خالی نگه داشته می شوند.

• این گمانه ها معمولاً در مناطقی حفر شده که انفجار در آن مناطق آغاز می گردد.

• بعد از انفجار مناطق شامل گمانه های آزاد، مناطق دیگر توده سنگ به گونه ای منفجر شده تا بلوک های ایجاد شده به سمت منطقه حفر شده در مرحله اول انفجار حرکت و سقوط نمایند.

۲۹/۶۴

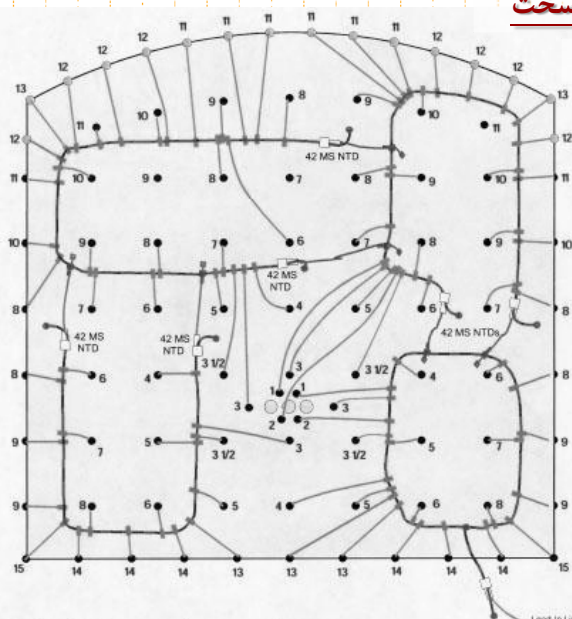
علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۲-۴-۵- روش های انفجاری



• نمونه ای از یک
الگوی انفجار

۳۰/۶۴

علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۲-۴-۵- روش های انفجاری

- در اغلب الگوهای انفجاری، آخرین انفجارها در پیرامون تونل انجام شده و معمولاً از مواد انفجاری ضعیف تر استفاده شده تا بتوان از حفاری بیش از اندازه مقطع تونل جلوگیری شود.
- از جمله مشکلات اصلی روش حفاری به کمک انفجار، زایل شدن بخش عمده ای از انرژی حاصل از انفجار بوده که عمدتاً باعث ارتعاش محیط تونل و گاهی ایجاد ناپایداری ها درون تونل و درون سازه های مجاور می گردد.
- به واسطه انفجار، فشار هوای درون تونل نیز افزایش یافته و این افزایش فشار هوا به صورت یک موج درون فضای تونل منتشر شده که بایستی در حین عملیات انفجار تمهیدات ایمنی لازم برای کارگران در نظر گرفته شود.
- به طور کلی استفاده از روش های انفجاری برای حفاری در سنگ های سخت یک روش توأم تجربی و علمی می باشد.

۳۱/۶۴

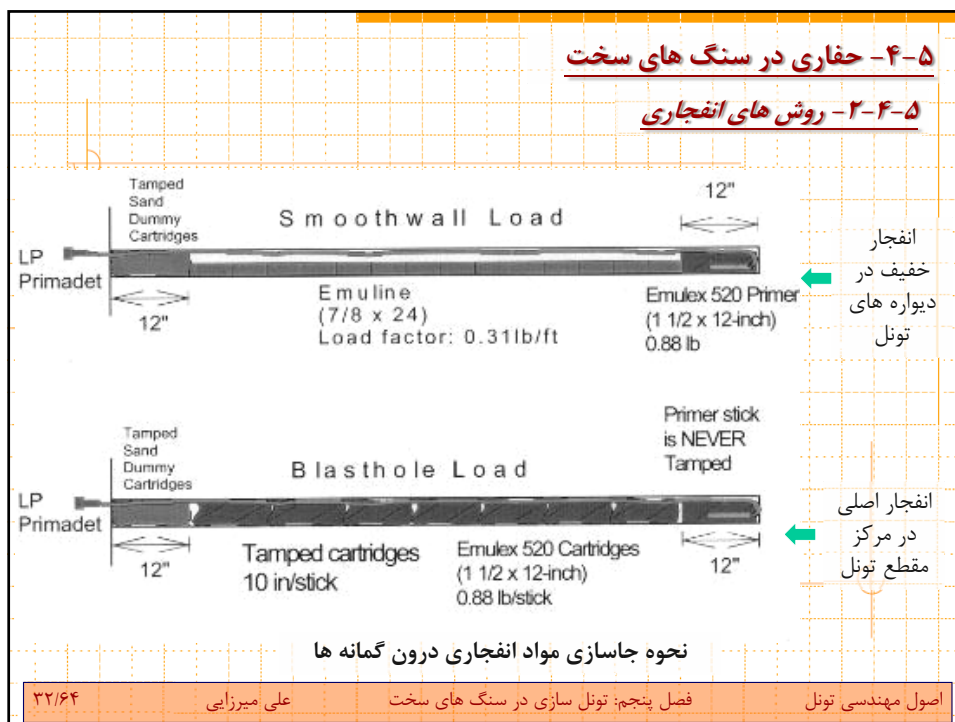
علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

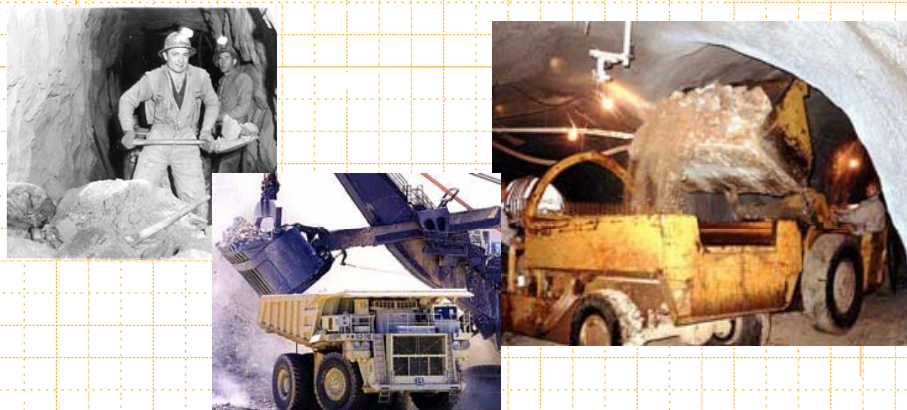
۲-۴-۵- روش های انفجاری



۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۲-۴-۵- روش های انفجاری

- بعد از انجام عملیات انفجار و سقوط بلوک های سنگی، گوه های سنگی در صورت نیاز به قطعات کوچکتری خرد شده و به بیرون از تونل انتقال داده می شود.



۳۳/۶۴

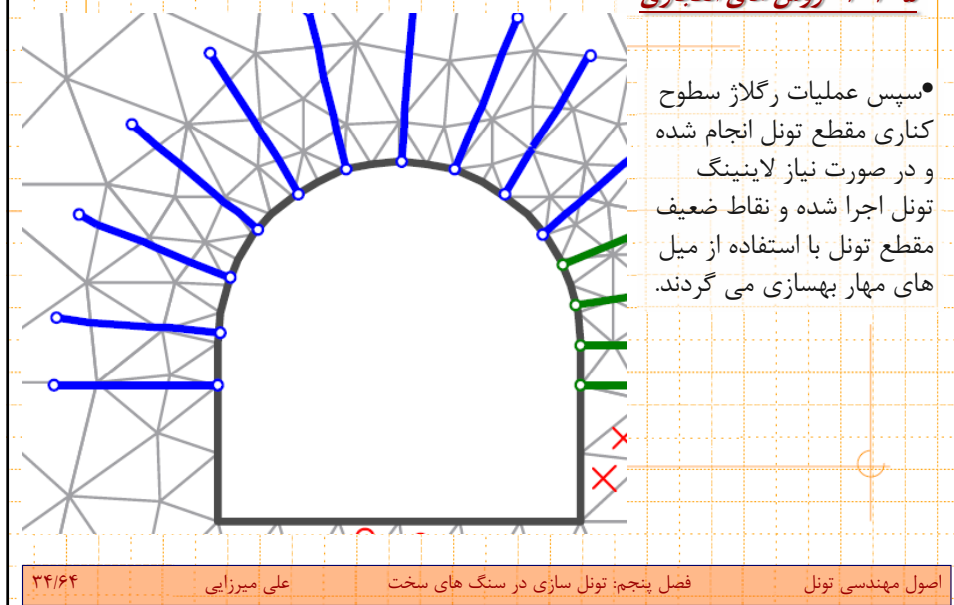
علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

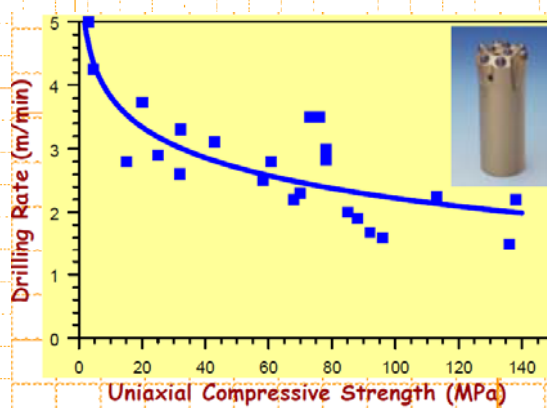
۲-۴-۵- روش های انفجاری



۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

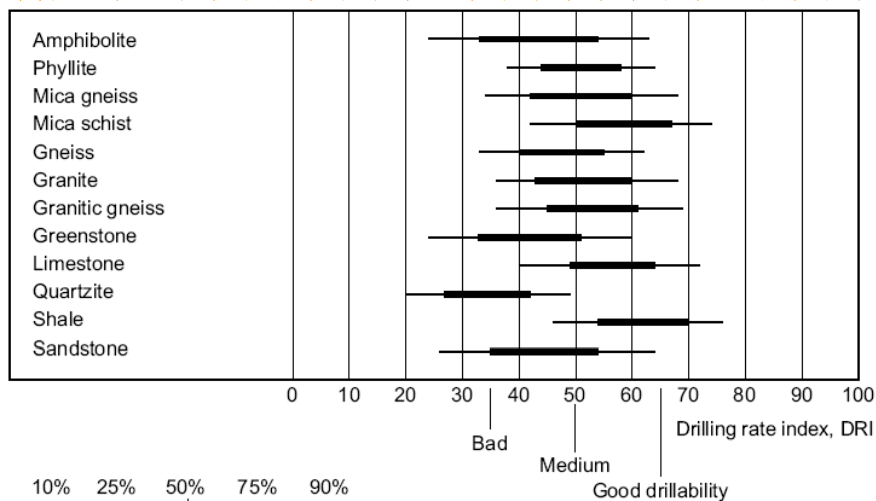
۲-۴-۵- روش های انفجاری

- یکی از مسایل مهم سرعت گمانه زنی در توده سنگ بوده که بر روی سرعت انجام استفاده از روش حفاری انفجاری موثر می باشد.



۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۲-۴-۵- روش های انفجاری



۳۶/۶۴

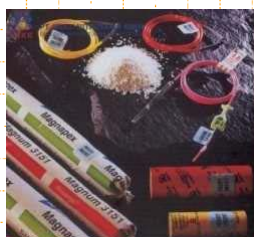
علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

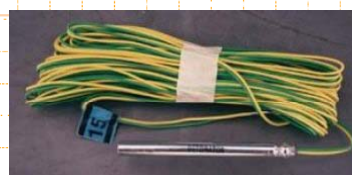
اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۲-۴-۵- روش های انفجاری



مواد منفجره



چاشنی های تاخیری



کابل های ارتباطی



فیوز های ایمنی

تجهیزات مورد استفاده در روش حفاری انفجاری

۳۷/۶۴

علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۲-۴-۵- روش های انفجاری



حفاری به روش انفجاری

۳۸/۶۴

علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۳-۴-۵- ماشین های حفاری مکانیزه

- با پیشرفت علم و در اوایل سال ۱۹۶۰، از ماشین های حفاری مکانیزه برای حفاری در زمین های سنگی سخت نیز استفاده گردید.
- به طور کلی، ماشین های حفاری مکانیزه در سنگ ها دارای مقطع حفاری ۱-کاملاً بسته و ۲- نیمه بسته می باشند.



مقطع نیمه بسته



مقطع کاملاً بسته

۳۹/۶۴

علی میرزایی

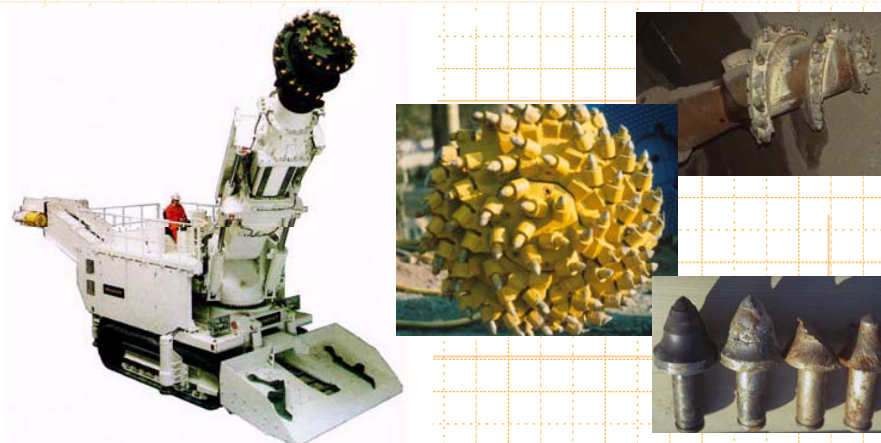
فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۳-۴-۵- ماشین های حفاری مکانیزه

- ماشین های حفاری نیمه بسته دارای انعطاف عمل بیشتر و ارزان قیمت تر بوده و معمولاً برای تونل های سنگی با طول کمتر از ۲ کیلومتر استفاده می شوند.



۴۰/۶۴

علی میرزایی

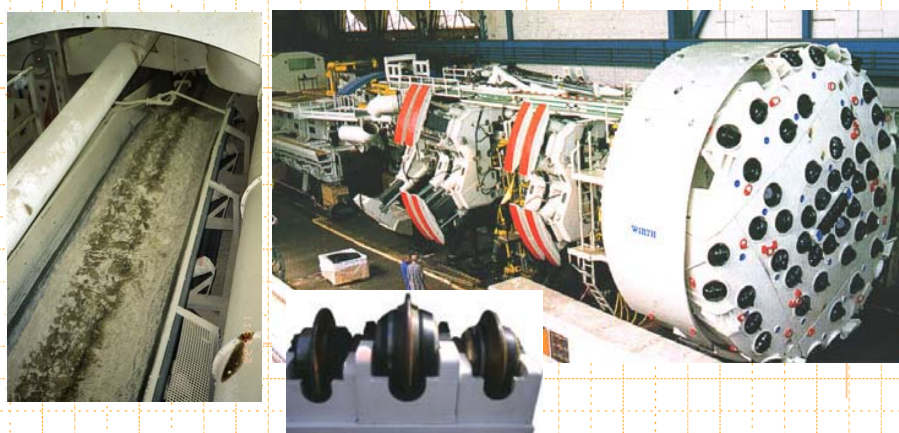
فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۳-۴-۵- ماشین های حفاری مکانیزه

- ماشین های حفاری با مقطع کاملاً بسته برای حفاری تونل های با طول بیشتر از ۲ کیلومتر در زمین های سنگی و با سرعت حفاری بیشتر استفاده می شوند.



۴۱/۶۴

علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۳-۴-۵- ماشین های حفاری مکانیزه

- عوامل اصلی موثر بر روی عملکرد ماشین های حفاری مکانیزه در سنگ ها عبارتند از:



❖ سرعت حفاری ماشین

❖ میزان بهره وری



- به واسطه شرایط مختلف همچون خراب شدن تیغه های حفاری و نیاز به تعویض آن ها، بایستی عملیات حفاری را متوقف نمود.

- میزان بهره وری ماشین حفاری مکانیزه تابعی از زمان فعال حفاری می باشد.

۴۲/۶۴

علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۳-۴-۵- ماشین های حفاری مکانیزه

- در دستگاه های حفاری مکانیزه، تمهیدات لازم برای تعویض تیغه های حفاری در محل اندیشیده شده است.



۴۳/۶۴

علی میرزایی

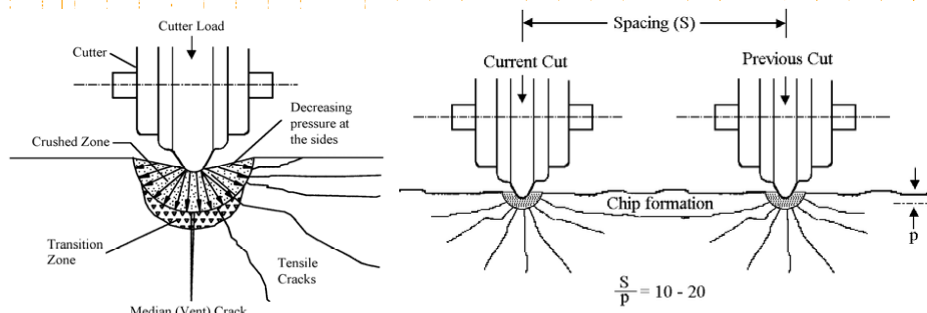
فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۳-۴-۵- ماشین های حفاری مکانیزه

- مکانیزم عمل حفاری در سنگ ها، با ایجاد درزه و ترک ها در سنگ و تشکیل بلوک های سنگی انجام می پذیرد.



- چیدمان تیغه ها در مقطع حفاری و نیز مقدار و زاویه نیرویی که تیغه ها به جبهه حفاری اعمال نموده در راستای گسترش درزه ها در جبهه حفاری و تشکیل بلوک ها انجام می پذیرد.

۴۴/۶۴

علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۳-۴-۵- ماشین های حفاری مکانیزه

- به طول کلی دستگاه های حفاری مکانیزه تونل (TBM) در زمین های نرم و یا سخت را می توان با توجه به عوامل زیر طبقه بندی نمود:

❖ نحوه اعمال نیروی حفاری

❖ تکیه گاه نیروی حفاری

❖ نحوه پایدار نگه داشتن جبهه حفاری

۴۵/۶۴

علی میرزایی

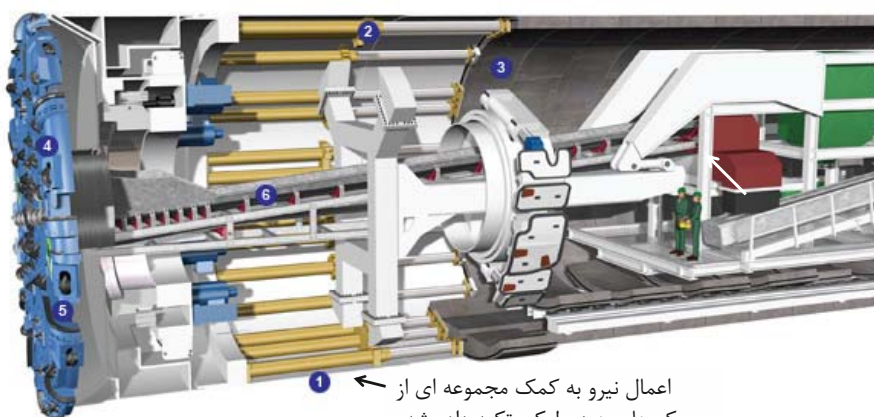
فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۳-۴-۵- ماشین های حفاری مکانیزه

❖ نحوه اعمال نیروی حفاری



Segment TBM

اعمال نیرو به کمک مجموعه ای از جک های هیدرولیکی تکیه داده شده به لاینینگ تونل

۴۶/۶۴

علی میرزایی

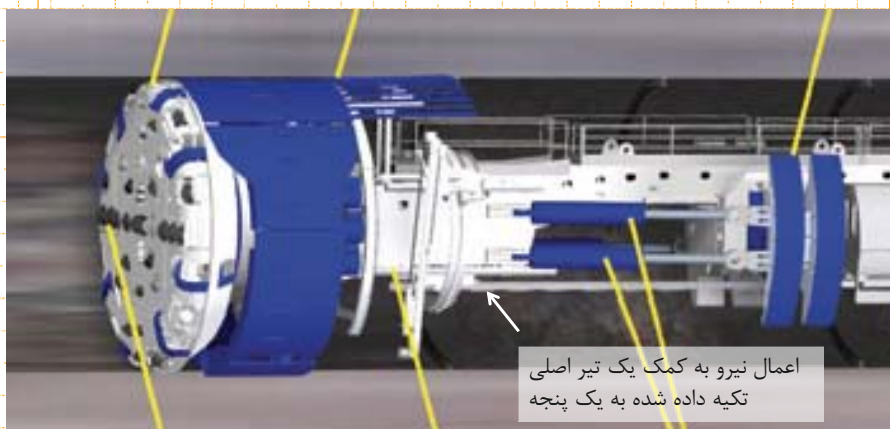
فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۳-۴-۵- ماشین های حفاری مکانیزه

❖ نحوه اعمال نیروی حفاری



Main Beam TBM

اعمال نیرو به کمک یک تیر اصلی تکیه داده شده به یک پنجه

۴۷/۶۴

علی میرزایی

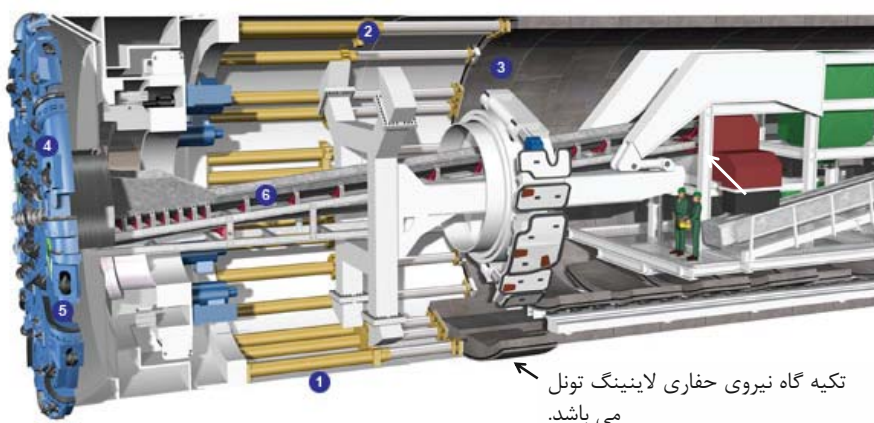
فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۳-۴-۵- ماشین های حفاری مکانیزه

❖ نحوه اعمال نیروی حفاری



Segment TBM

۴۸/۶۴

علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۳-۴-۵- ماشین های حفاری مکانیزه

❖ تکیه گاه نیروی حفاری



Gripper TBM

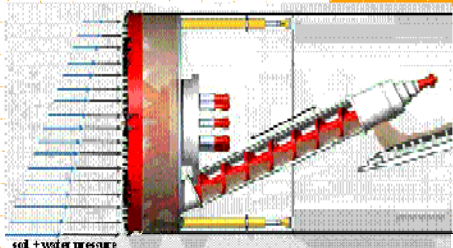
۴۹/۶۴

علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت
۳-۴-۵- ماشین های حفاری مکانیزه
 ❖ نحوه پایدار نگه داشتن جبهه حفاری



**Earth Pressure
Balanced TBM**

اعمال فشار جانبی
معاذل به جبهه حفاری



**Mixed Shield
TBM**

تزریق گل حفاری با
فشار (اعمال پس فشار
به وسیله فشار هوا)

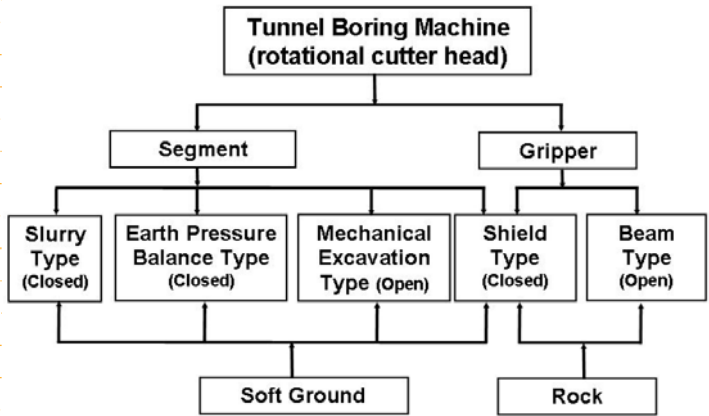


Slurry Shield TBM

تزریق گل حفاری

۵۰/۶۴
علی میرزایی
فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت
اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت
۳-۴-۵- ماشین های حفاری مکانیزه
 ❖ با توجه به مطالب ارائه شده، دستگاه های حفاری مکانیزه (TBM) را می توان به صورت زیر طبقه بندی نمود:



```

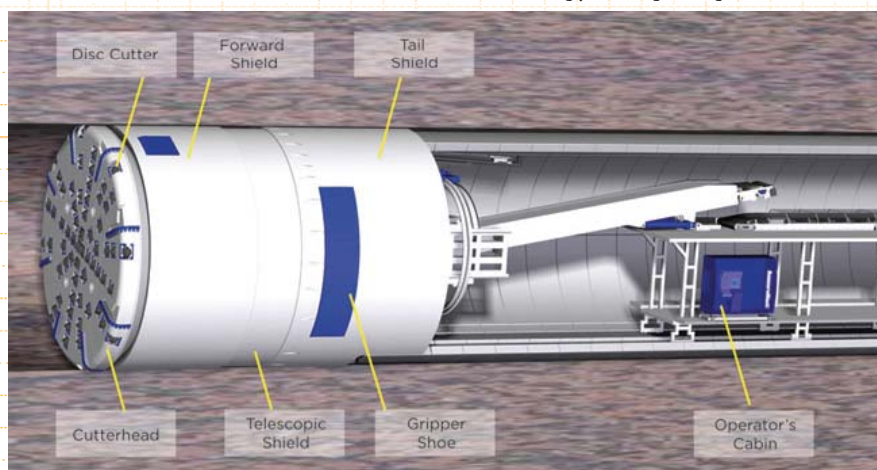
graph TD
    TBM[Tunnel Boring Machine  
(rotational cutter head)] --> Segment
    TBM --> Gripper
    Segment --> Slurry[Slurry Type  
(Closed)]
    Segment --> EPB[Earth Pressure  
Balance Type  
(Closed)]
    Segment --> ME[Mechanical  
Excavation  
Type (Open)]
    Gripper --> Shield[Shield Type  
(Closed)]
    Gripper --> Beam[Beam Type  
(Open)]
    Slurry --> SG[Soft Ground]
    EPB --> SG
    ME --> SG
    Shield --> Rock
    Beam --> Rock
  
```

۵۱/۶۴
علی میرزایی
فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت
اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۳-۴-۵- ماشین های حفاری مکانیزه

❖ دستگاه مکانیزه حفاری با سپر مضاعف (Double Shield TBM)



۵۲/۶۴

علی میرزایی

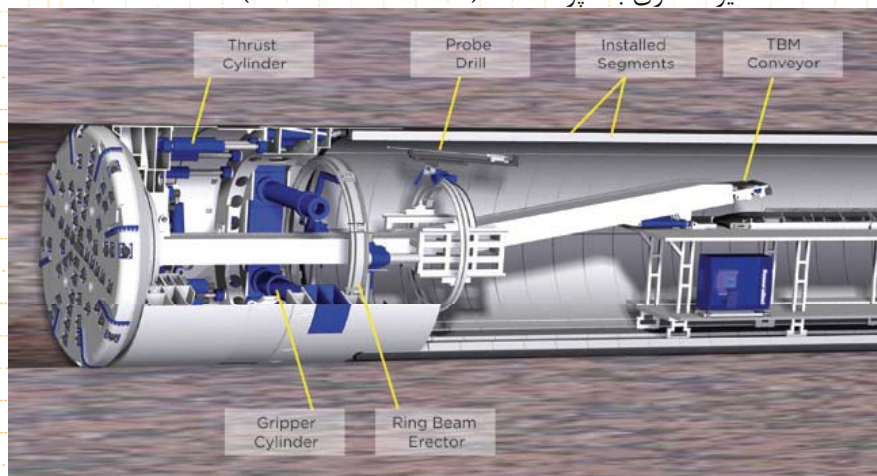
فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۳-۴-۵- ماشین های حفاری مکانیزه

❖ دستگاه مکانیزه حفاری با سپر مضاعف (Double Shield TBM)



۵۳/۶۴

علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۴-۴-۵- تکیه گاه های حفاری

• با اتمام مرحله حفاری، در صورت امکان رخداد ناپایداری و ریزش تونل، بایستی از تکیه گاه های اولیه مناسب برای جلوگیری از این امر استفاده گردد.

• برخی از تکیه های متداول در تونل سازی عبارتند از:

❖ تقویت سنگ ها (Rock Reinforcement)

❖ قوس (دنده) های فلزی (Steel Ribs)

❖ شبکه (مش) فلزی (Lattice Girders)

❖ بتن پاشی (Shotcrete)

❖ قطعات بتنی پیش ساخته (Precast Concrete Segments)

❖ میله گذاری (Forepoling)

۵۴/۶۴

علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۴-۴-۵- تکیه گاه های حفاری

❖ تقویت سنگ ها (Rock Reinforcement)

• تقویت سنگ ها عمدتاً با استفاده از میل های پیچی (Rock Bolts) و یا میل های مهار پرچی (Rock Dowels) انجام می پذیرد.

• ظاهر میل های مهار پیچی و پرچی مشابه یکدیگر بوده، لیکن مکانیزم عملکرد آن ها با یکدیگر متفاوت می باشد.

• در میل مهار های پرچی، هیچ گونه نیرویی از سوی میل مهار به سنگ وارد نشده، لیکن به واسطه کوچکترین جابجایی در سنگ، میل مهار وارد عمل شده و با تحمل نیروهای کششی و پیچشی مانع از جابجا شدن سنگ می گردد.

۵۵/۶۴

علی میرزایی

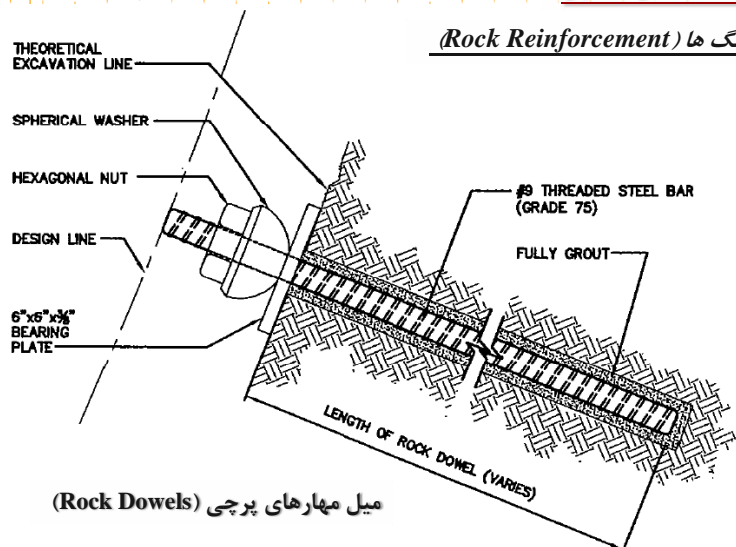
فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۴-۴-۵- تکیه گاه های حفاری

❖ تقویت سنگ ها (Rock Reinforcement)



۵۶/۶۴

علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

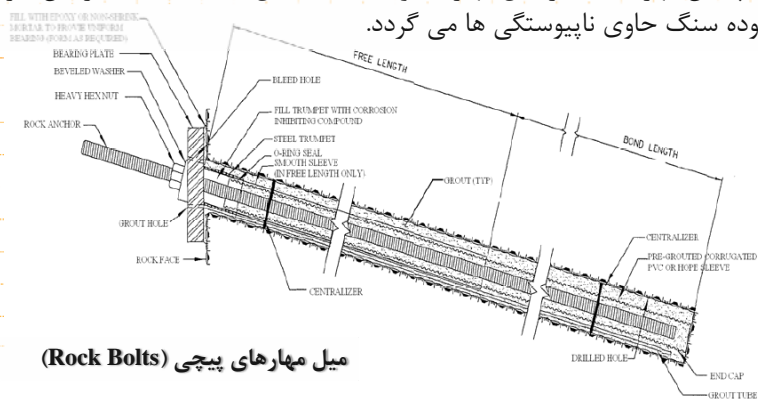
اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۴-۴-۵- تکیه گاه های حفاری

❖ تقویت سنگ ها (Rock Reinforcement)

- در میل مهارهای پیچی، بعد از سفتی مناسب ملات تزریق شده، یک نیروی کششی به واسطه پیچاندن مهره های سر میل مهار به توده سنگ اعمال شده که باعث افزایش ظرفیت باربری توده سنگ حاوی ناپیوستگی ها می گردد.



میل مهارهای پیچی (Rock Bolts)

۵۷/۶۴

علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۴-۴-۵- تکیه گاه های حفاری

❖ قوس (دنده) های فلزی (Steel Ribs)



قوس های دنده ای در ورودی تونل

- قوس های فلزی امروزه بسیار کمتر استفاده شده و از آن ها برای برخی شرایط خاص همچون تقاطع تونل ها، دهانه های خاص، قسمت ورودی دستگاه های حفاری مکانیزه و ... استفاده می گردد.

۵۸/۶۴

علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۴-۴-۵- تکیه گاه های حفاری

❖ قوس (دنده) های فلزی (Steel Ribs)



قوس های دنده ای در ورودی تونل

۵۹/۶۴

علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۴-۴-۵- تکیه گاه های حفاری

❖ شبکه (مش) فلزی (Lattice Girders)

• در برخی از تونل سازی و به ویژه در روش های حفاری متوالی، از تیرهای خرپایی و شبکه (مش) فلزی به عنوان تکیه گاه حفاری استفاده می گردد.

• عضو خرپا معمولا متشکل از میلگرد و دارای مقطع مثلی می باشد.

• عضو خرپای شبکه فلزی، سهم زیادی در تحمل نیروها نداشته، لیکن دارای دو کارایی مهم ذیل می باشد:

۱- یک معیار مناسب برای تعیین ضخامت لازم برای عمل بتن پاشی می باشد.

۲- معمولا در فواصلی که میل های مهارتی نصب شده تعبیه می شوند و یک تکیه گاه ایمن در برابر سقوط احتمالی در نقاط بحرانی می باشند.



۶۰/۶۴

علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۴-۴-۵- تکیه گاه های حفاری

❖ شبکه (مش) فلزی (Lattice Girders)



۶۱/۶۴

علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۴-۴-۵- تکیه گاه های حفاری

❖ بتن پاشی (Shotcrete)



• بتن پاشی می تواند به صورت مجزا و یا همراه با یک سازه نگهدارنده اجرا شود.

۶۲/۶۴

علی میرزایی

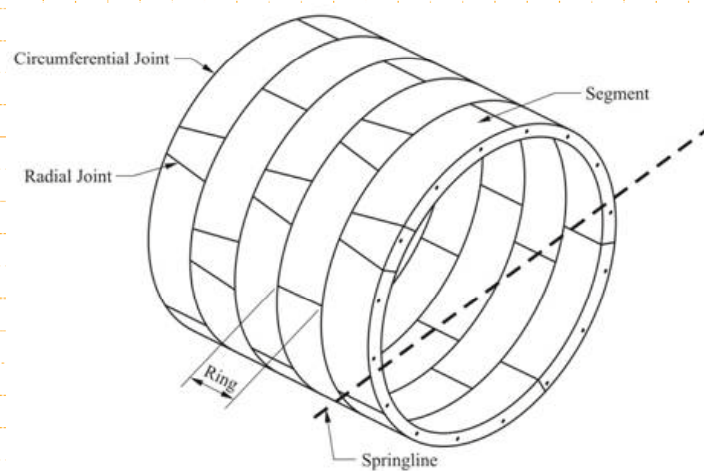
فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۴-۴-۵- تکیه گاه های حفاری

❖ قطعات بتنی پیش ساخته (Precast Concrete Segments)



۶۳/۶۴

علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

۴-۵- حفاری در سنگ های سخت

۴-۴-۵- تکیه گاه های حفاری

❖ میله گذاری (Fore Poling)



۶۴/۶۴

علی میرزایی

فصل پنجم: تونل سازی در سنگ های سخت

اصول مهندسی تونل

با تشکر از توجه شما