اصول مهندسی تونل

جلسهٔ نهم

مبانی طراحی سیستم های تقویت و نگهداری

Principles of Tunnel Engineering

انواع سیستم های نگهداری

- **نگهداری موقت (Temporary) و دائم (Permanent)**

در قدیم نگهداری موقت برای تامین ایمنی در طول عملیات حفاری و نگهداری دائم برای تامین ایمنی طی بهره برداری طراحی می شد

- **نگهداری اولیه (primary) و ثانویه (Secondary)**

امروزه نگهداری اولیه برای ایمن ساختن فضای کار و فعال سازی و حفظ مقاومت توده سنگ طراحی شده و نگهداری ثانویه نیز مکمل نگهداری اولیه بوده و وظیفهٔ زیبا سازی و حفاظت در مقابل هوازدگی را بر عهده دارد

- **نگهداری فعال (Active) و غیرفعال (Passive)**

نگهداری فعال در زمان نصب به توده سنگ بار وارد می کند ولی نگهداری غیر فعال تنها در صورت جابجایی توده سنگ وارد عمل می شود

- **نگهداری رسمی (Formal) و غیر رسمی (Informal)**

نگهداری که مشخصاً برای یک وضعیت هندسی خاص طراحی شده است را رسمی گویند

- **نگهداری افزایشی (Incremental)**

سیستم نگهداری که در مواقع نیاز بر اساس مشاهدات میتوان در آن اصلاحات ضروری را انجام داد

روش های طراحی نگهداری تونل

- **روش های تحلیلی**

وضعیت تنش و تغییر شکل های اطراف تونل به کمک راه حل های فرم بسته، روش های عددی و مدل سازی فیزیکی مطالعه شده و نگهداری مناسب طراحی می شود

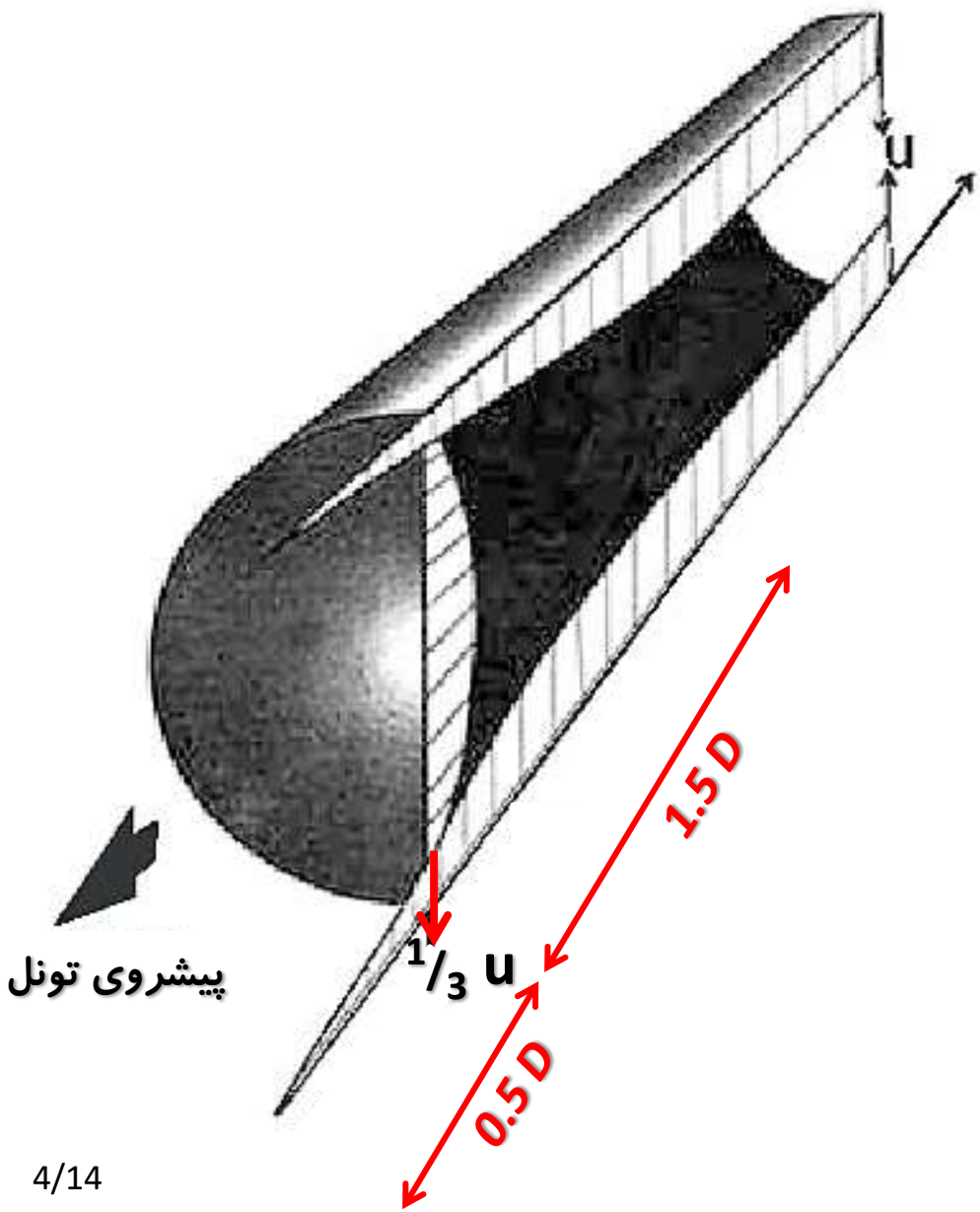
- **روش های مشاهده ای**

به کمک ابزار بندی و پایش حرکات زمین حین حفاری و همچنین تحلیل اندرکنش زمین–سیستم نگهداری اقدام به نگهداری تونل می نمایند. این روشش در تونل زنی جدید اتریشی (NATM) و محدود سازی تقارب (Convergence Confinement) کاربرد دارد.

- **روش های تجربی**

بر اساس تحلیل های آماری تجارب بدست آمده از پایداری پروژه های انجام شدهٔ پیشین و همچنین به کمک روش های رده بندی توده سنگ نگهداری تونل طراحی می شود.

تغییر شکل یک تونل فاقد نگهداری

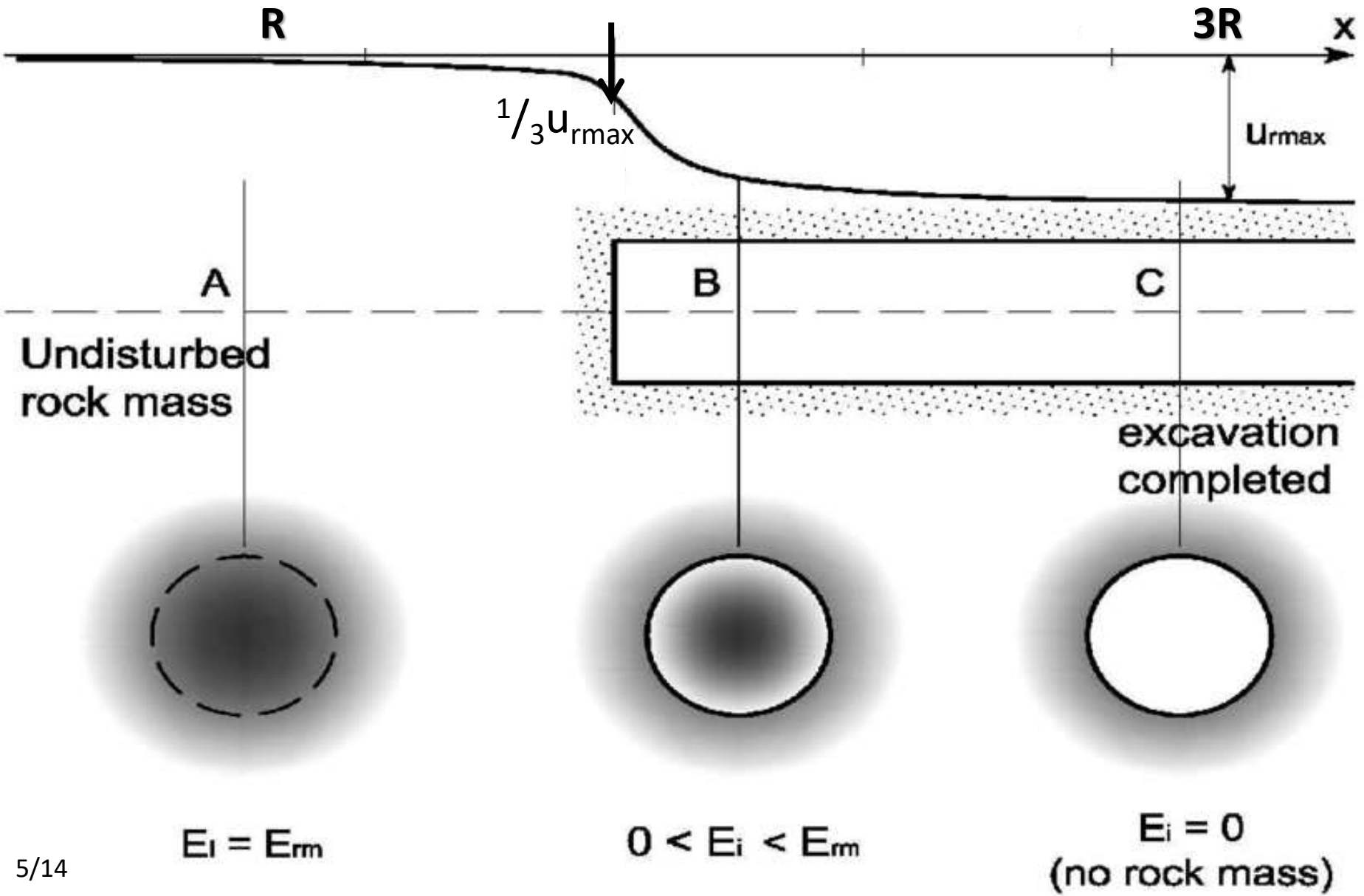


تغییر شکل های قابل اندازه گیری توده سنگ از فاصله ای برابر با نصف قطر تونل در پیشاپیش جبهه کار آغاز می شود.

این تغییر شکل افزایش یافته و زمانی که سینه کار حفاری از زیر نقطهٔ پایش عبور می کند، میزان جابجایی شعاعی حدود یک سوم جابجایی حداکثری است.

با پیشروی و عبور سینهٔ کار از این نقطه، تغییر شکل همچنان افزایش یافته و هنگامی که جبهه کار به اندازهٔ یک و نیم برابر قطر تونل از نقطهٔ پایش فاصله می گیرد، جابجایی به حداکثر مقدار خود می رسد.

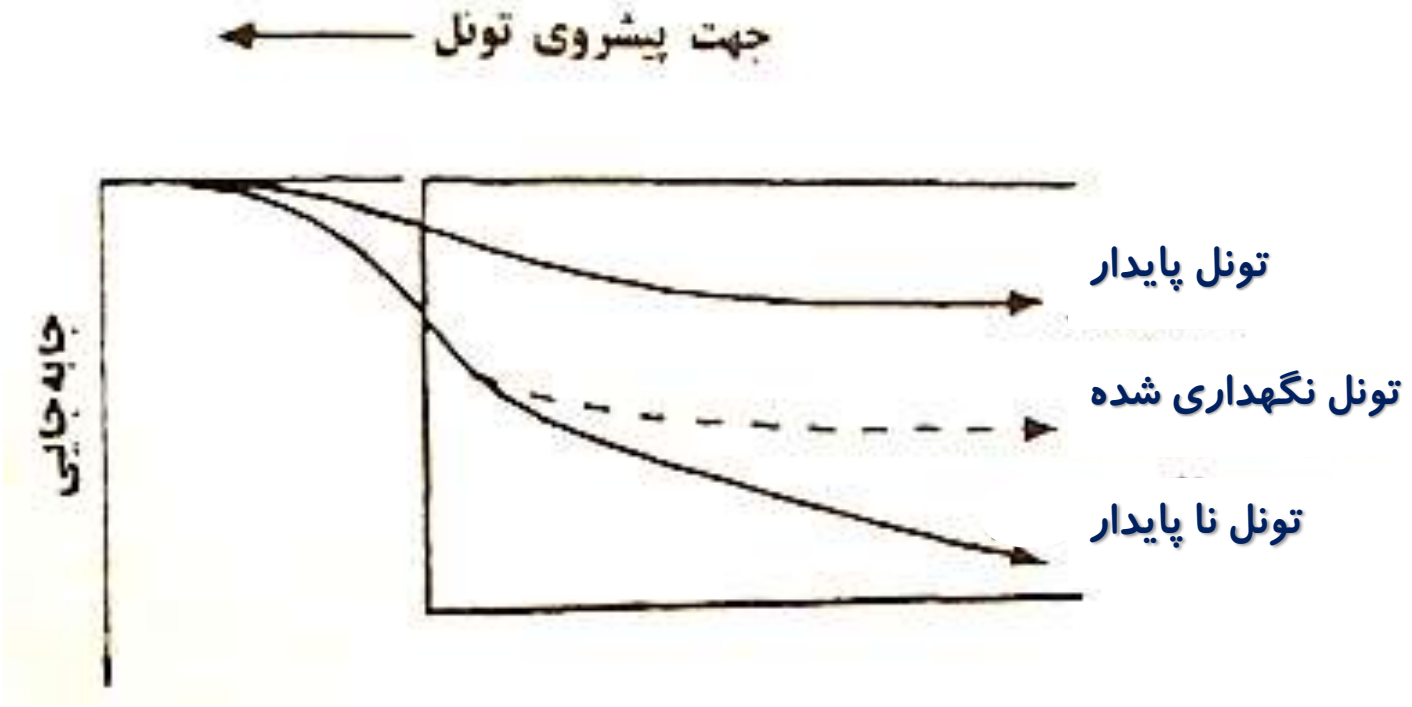
تغییر شکل یک تونل فاقد نگهداری



تغییر شکل یک تونل فاقد نگهداری

هدف اولیه از نصب سیستم نگهداری کنترل جابجایی رو به داخل دیواره های تونل و جلوگیری از سست شدن سنگ ها است که امکان دارد به ریزش تونل منجر شود.

منحنی تغییرات جابجایی سقف تونل نسبت به امتداد پیشروی در حالت های پایدار و ناپایدار در شکل زیر رسم شده است.



منحنی مشخصهٔ زمین و سیستم نگهداری
Ground Reaction Curve (GRC)

همواره در حفاری تونل به علت اینکه تغییر شکل از جلوی جبهه کار آغاز شده و نگهداری نیز همواره با فاصله از سینه کار نصب می شود، مقدار تغییر شکل اولیه (U_{so}) وجود خواهد داشت.

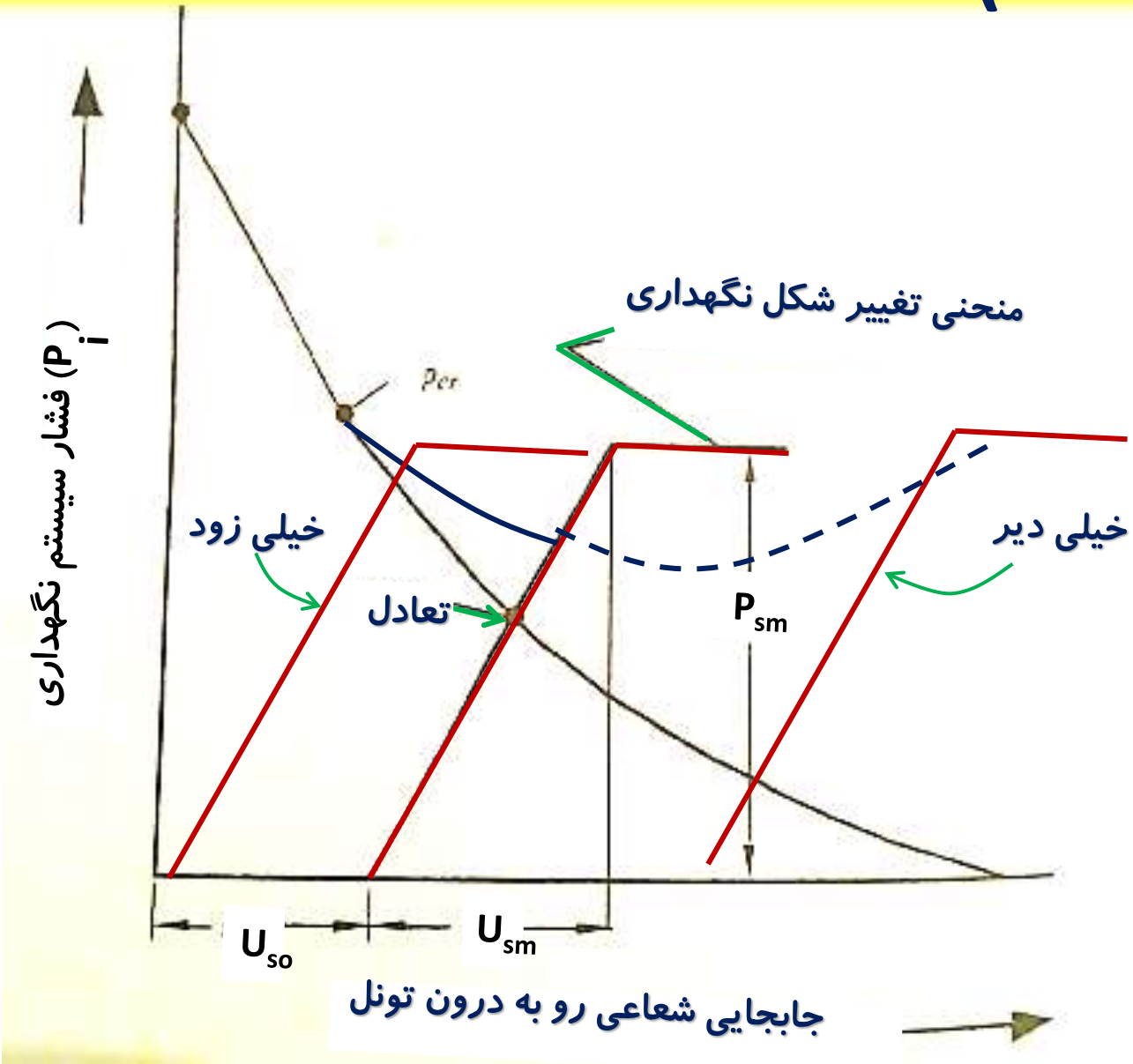
پس از نصب نگهداری تغییر شکل الاستیک نگهداری آغاز شده و حداکثر مقدار آن U_{sum} و حداکثر فشار ناشی از آن P_{sm} است.

اگر منحنی سیستم نگهداری منحنی تغییر شکل زمین را قبل از آنکه دو منحنی از هم دور شوند قطع کند، تعادل حاصل خواهد شد.

اگر نگهداری خیلی دیر نصب شود (U_{so} خیلی زیاد شود) توده سنگ دچار تغییر شکل پیشرونده شده و فشار وارده بر نگهداری آنقدر زیاد می شود که نگهداری تسلیم می شود. اگر خیلی زود هم نصب شود فشار زیادی بر نگهداری وارد شده و احتمال تسلیم وجود دارد.

اگر صلبیت نگهداری کافی نباشد نیز منجر به ریزش تونل می شود.

منحنی مشخصهٔ زمین و سیستم نگهداری
Ground Reaction Curve (GRC)



بارهای وارده بر تونل

عمده بارهای وارده بر ساختمان تونل ها فشار آب های زیرزمینی و فشار توده سنگ در بر گیرند است.

بارهای زندهٔ ناشی از عبور و مرور وسایل نقلیه را بدون این که خدشه ای به پایداری تونل وارد شود می توان نادیده گرفت. البته بجز در مواردی که تونل در عمق بسیار کم و به روش کند و پوش حفر می شود.

در کل میتوان گفت که ابعاد مقطع تونل بایستی طوری باشد که هم بار روباره (Geostatic Pressure) را تحمل کند و هم وزن مواد ناحیهٔ شل شده (Protective Zone) را تحمل کند.

بارهای وارده بر تونل

اندازه گیری بار وارده بر تونل از طرف توده سنگ کار بسیار پیچیده ای است.

این پیچیدگی از دشواری محاسبهٔ تنش های اولیهٔ توده سنگ ناشی نمی شود بلکه عامل اصلی این پیچیدگی توزیع تنش های القایی است که پس از حفر تونل در توده سنگ ایجاد می شوند

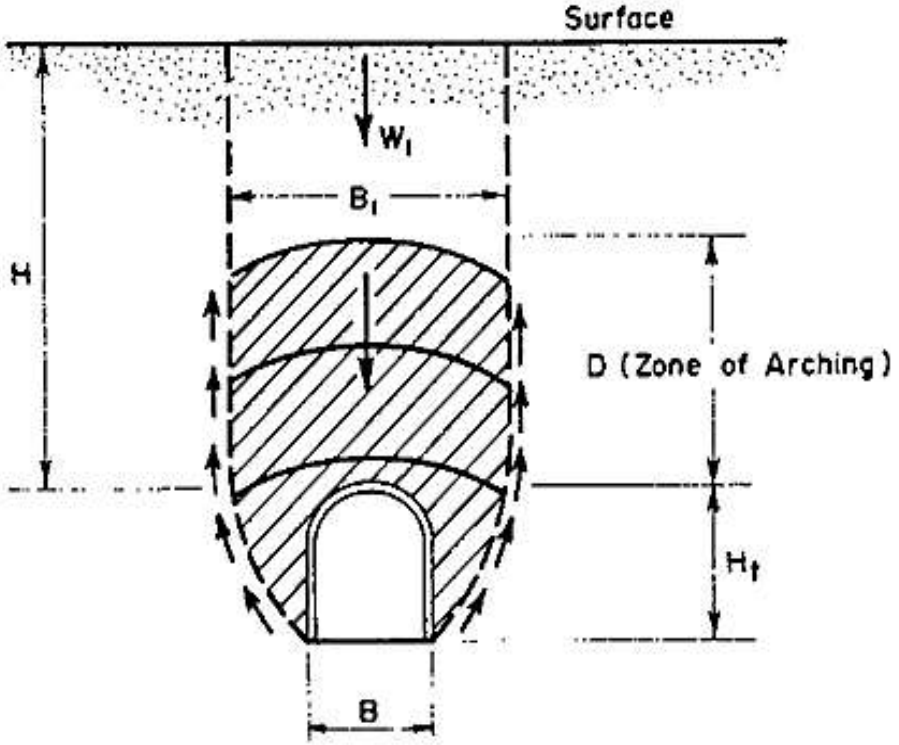
زیرا مقدار و راستای این تنش ها تحت تاثیر عوامل متعددی از قبیل جنس سنگ، ابعاد فضای حفاری، روش حفاری، صلبیت نگهداری، مدت زمانی که حفریه بدون نگهداری می ماند و... قرار دارد.

طبق نظر ترزاقی بار وارده بر تونل برابر است با وزن مردهٔ ارتفاع مشخصی از مصالح بالاسر تونل است که اگر نگهداری نصب نشود به داخل حفریه ریزش می کنند. این مصالح خرد شده خود به خود قوسی در بالای تونل ایجاد می کنند و توده سنگ بالای آن پایدار است.

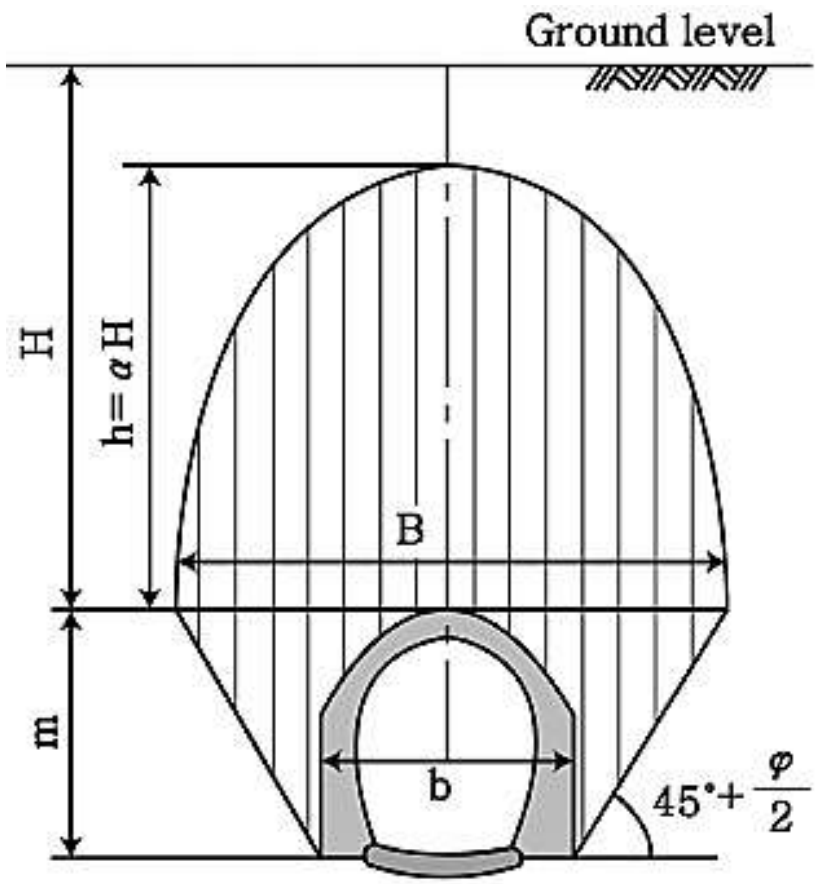
بارهای وارده بر تونل

طبق نظر ترزاقی:

ردیف	رده سنگ در رده‌بندی ترزاقی	بار سنگ برحسب متر	سیستم نگهداری
۱	سنگ بکر (محکم و یکپارچه)	۰	در حالت کلی سیستم نگهداری موردنیاز نیست. در صورت پوسته پوسته شدن و یا پوکیدن، نگهداری مختصری موردنیازاست.
۲	سنگ محکم دارای لایه‌بندی یا شیستوزیته	۰ تا ۰/۱۵ B	برای مقابله با پوسته‌پوسته شدن ممکن است به نگهداری مختصری نیاز باشد. بار مؤثر ممکن است به‌طور نامنظم از نقطه‌ای به نقطه دیگر تغییر کند.
۳	توده‌ای، نسبتاً درزه‌دار	۰ تا ۰/۷۶ B	
۴	ستاً بلوکی و رگه‌ای	$(0/1)(B+H_t)$ تا $(0/076)$	فشار جانبی وجود ندارد.
۵	خیلی بلوکی و رگه‌ای	$(0/33)(B+H_t)$ تا $(0/1)$	فشار جانبی وجود ندارد یا مقدار آن کم است.
۶	کاملاً خردشده	$0/33\ (B+H_t)$	فشار جانبی قابل توجه است. سیستم نگهداری همراه با پایه کناری موردنیاز است.
۷	سنگ فشارنده (لهیده) با عمق متوسط	$(0/64)(B+H_t)$ تا $(0/33)$	فشار جانبی زیاد است. سیستم نگهداری همراه باپایه‌های کناری قوی موردنیازاست.
۸	سنگ فشارنده با عمق زیاد	$(1/37)(B+H_t)$ تا $(0/64)$	حلقه‌های دایره‌ای کامل توصیه می‌شود.
۹	سنگ آماس‌پذیر	تا ۷۶ متر بدون‌توجه به $(B+H_t)$	سیستم نگهداری به صورت حلقه‌های دایره‌ای‌کامل موردنیاز است. درموارد شدید، سیستم نگهداری انعطاف‌پذیر و تسلیم‌شونده موردنیاز است.



بارهای وارده بر تونل



طبق نظر بیربامر (Bierbäumer's Theory):

طبق نظر ایشان بار وارده بر تونل برابر است با وزن مردهٔ مواد بالاسر تونل به ارتفاع $h=\alpha H$

برای تونل های بسیار کم عمق مقدار α به ۱ میل می کند.

در اعماق $H>5B$ مقدار α با استفاده از رابطهٔ زیر بدست می آید:

$$\alpha_1 = \tan^4(45^\circ - \varphi/2)$$

الزامات طراحی سیستم نگهداری

- استفاده از تجارب و یافته های بدست آمده در مورد خصوصیات زمین و چگونگی رفتار با زمین از پروژه های اجرا شدهٔ مشابه پیشین.

- انطباق اصول استفاده از روش های تجربی، تحلیلی یا عددی ساده یا پیچیده با وضعیت موجود زمین.

- مشاهدهٔ رفتار تونل حین اجرا و انجام اصلاحات لازم در خصوص روش های اجرا و نگهداری تونل به کمک مانیتورینگ و پایش سیستماتیک تونل

برخی سیستم های مقاوم سازی رایج در تونل سازی

- بتن پاشی یا شاتکریت

- پیچ سنگ یا راک بولت

- قاب فولادی یا نگهداری فلزی

- لاینینگ بتنی یا قالب گیری درجا

شاتکریت

تعریف شاتکریت

• شاتکریت ، بتن یا ملاتی است که از طریق یک شلنگ تحت فشار هوا با سرعت زیاد روی سطوح حفاری شده سنگ یا خاک پاشیده می‌شود و به دو روش تر و خشک اجرا می‌شود و دارای روش عمل آوری و اجرای خاصی است.

• از شاتکریت معمولاً بعنوان قسمتی از سیستم نگهداری و در موارد معدود به عنوان پوشش دائمی استفاده می‌شود.

• برای اجرای صحیح عملیات شاتکریت ، سطوح دیواره‌ها و سقف تونل که نیاز به بتن پاشی دارند را بایستی از ذرات ریز، قطعات لق، گردو خاک، گل و هر گونه مواد خارجی پاکسازی نمود

ویژگی ها و مزیت های شاتکریت

- به طور کلی شاتکریت نسبت به بتن معمولی دارای نسبت پایین‌تری از آب به سیمان است
- از شاتکریت می‌توان مقاومت‌های فشاری بالا را با نسبت آب به سیمان پایین و چگالی بالا و با سرعت کار بالا انتظار داشت
- اجرای تحت فشار ، باعث ایجاد فشردگی خوب و چگالی بالا با نفوذ پذیری و جذب آب پایین می‌شود . این نتایج – ماده‌ی هموژن با دوام – مقاومت یخ زدن/ آب شدن عالی ، تجزیه سطحی کم و درجه ی بالایی از مقاومت سایشی را موجب می‌شوند
- شاتکریت می‌تواند حجم‌های زیادی را به سرعت و به طور اقتصادی اجرا کند .
- در مقایسه با بتن ریزی معمولی ، شاتکریت قالب بندی بسیار کمتری را نیاز دارد .
- سهولت کاربرد شاتکریت به این معنی است که مواد می‌توانند در مناطق محصور و اغلب در فواصل دور از دسترس هم به کار روند، بدون احتیاج به حمل و نقل و نصب قالب‌های حجیم
- استفاده از شاتکریت چند لایه ای می‌تواند تولید تنش حرارتی در سازه را کاهش دهد .

انواع شاتکریت

دو روش برای اجرای شاتکریت وجود دارد که تفاوت آنها در نحوه‌ی آماده‌سازی و زمان اضافه کردن آب هیدراتاسیون به مخلوط است

❑ شاتکریت تر

- فرآیند شاتکریت تر شامل مخلوط سیمان و سنگدانه است ، که پیش از اینکه از طریق لوله یا شلنگ و نازل از پمپ خارج شود ، با آب مخلوط شده باشد .
- هوای با سرعت بالا برای حرکت دادن مخلوط در لوله به کار می‌رود که این مورد نیازمند هوای با فشار بالاست که این فشار و سرعت باعث فشرده شدن بتن در محل اجرا می‌شود .
- با فرایند تر نسبت می‌تواند به دقت کنترل شود و با پلاستیسایزرهای کاهنده آب ، نسبت پایین‌تر از ۰.۴۵ به راحتی قابل دسترسی است .

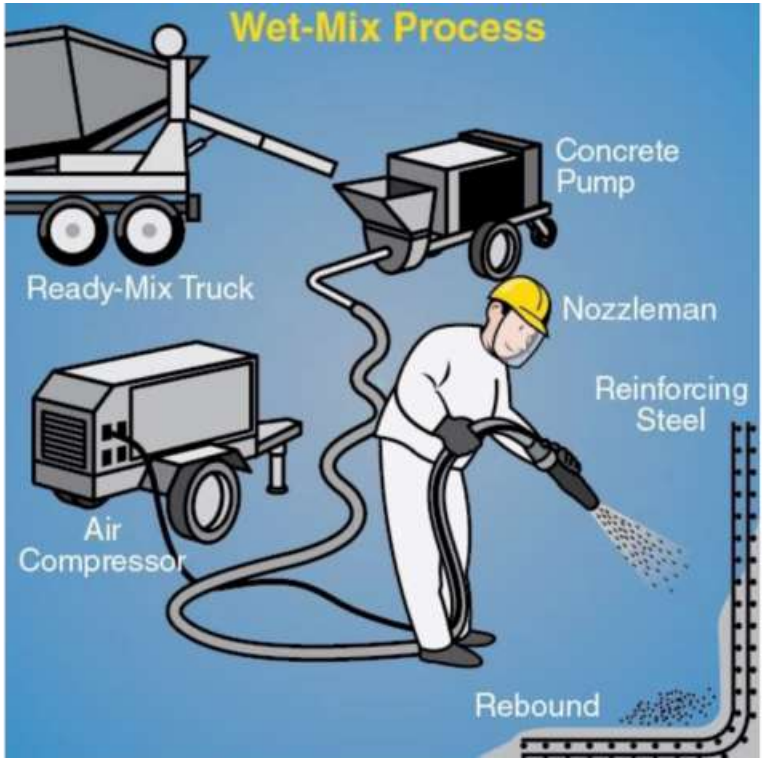
❑ شاتکریت خشک

- در این حالت اجزای شاتکریت به صورت خشک یا کمی‌مرطوب (به منظور کاهش گرد و غبار) با سرعت یکنواخت به داخل قیفی ریخته می‌شود که به طور مداوم مخلوط را بهم می‌زند
- هوای فشرده از طریق یک بشکه دوار یا منبع تغذیه دمیده می‌شود تا مواد را به صورت یک جریان پیوسته به شلنگ تغذیه انتقال دهد.
- آب نیز از طریق افشانه انتهای شلنگ به این مخلوط اضافه می‌شود .
- افزودنی‌ها می‌توانند مثل پودر به مخلوط خشک و در حالت مایع ، با آب اضافه شده در نازل یا مثل تزریق در نازل به مخلوط اضافه شود . فایبرهای فولادی و سایر فایبرها می‌توانند در پیش اختلاط اضافه شوند .

انواع شاتکریت

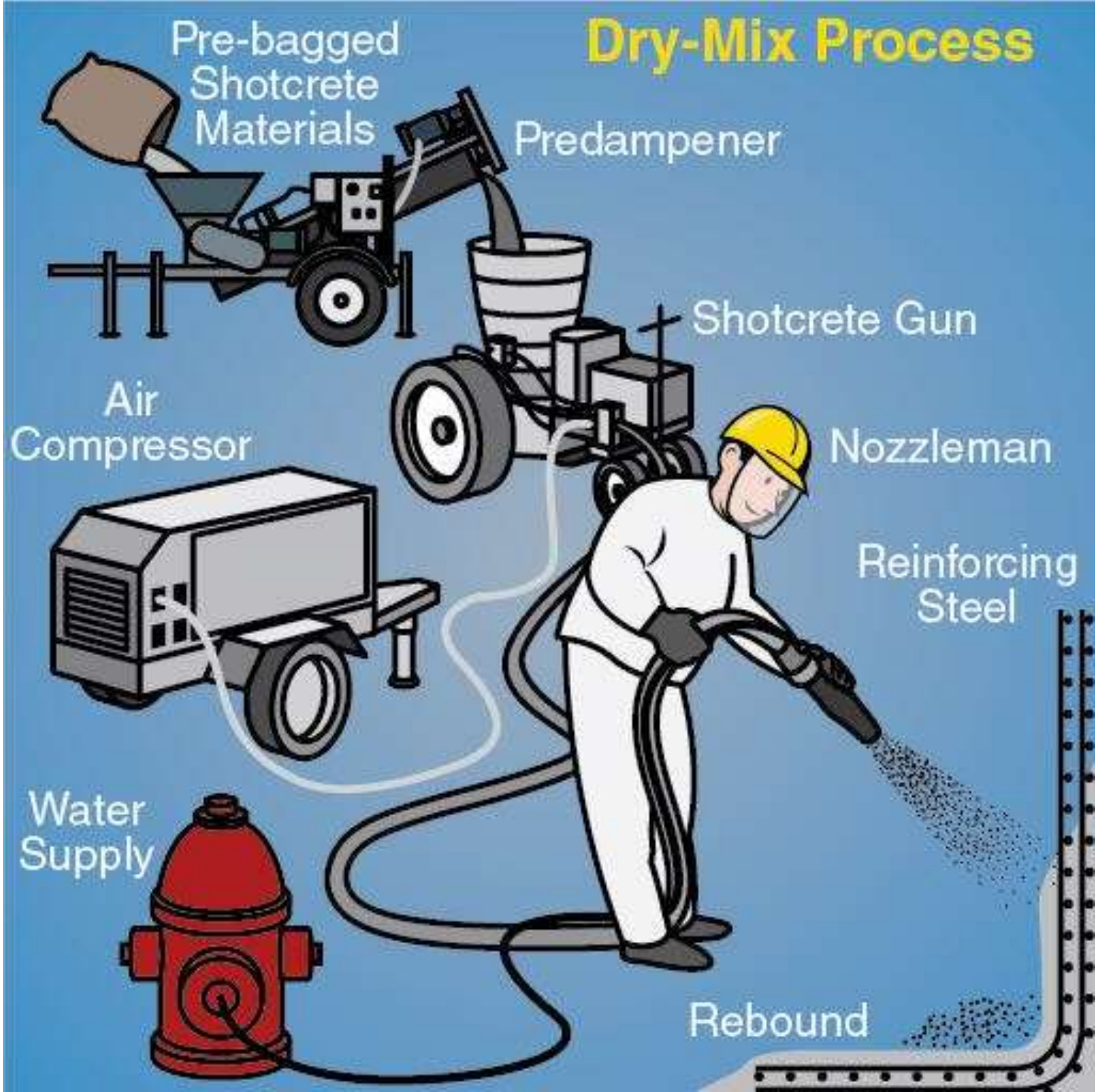
دو روش برای اجرای شاتکریت وجود دارد که تفاوت آنها در نحوه‌ی آماده‌سازی و زمان اضافه کردن آب هیدراتاسیون به مخلوط است

❑ شاتکریت تر



❑ شاتکریت خشک

Wet-Mix Process
Concrete Pump
Ready-Mix Truck
Nozzleman
Reinforcing Steel
Air Compressor
Rebound


Dry-Mix Process
Pre-bagged Shotcrete Materials
Predampener
Shotcrete Gun
Air Compressor
Nozzleman
Reinforcing Steel
Water Supply
Rebound

اجرای مکانیزهٔ شاتکریت- تونل نیایش (تهران)

برخی سیستم های مقاوم سازی رایج در تونل سازی

- بتن پاشی یا شاتکریت

- پیچ سنگ یا راک بولت

- قاب فولادی یا نگهداری فلزی

- لاینینگ بتنی یا قالب گیری درجا

سیستمهای تقویت بولتی

(Bolt reinforcement systems)

سیستمهای تقویت بولتی

سیستمهای تقویت بولتی یا میل مهار

- بولتها همانند شاتکریت در زمره سیستمهای تقویتی (Reinforcement system) سنگ می باشند و هدف از بکارگیری آنها خودنگهدار کردن توده است.
- بولت ها پس از نصب به بخشی از توده سنگ تبدیل شده و مقاومت داخلی و ذاتی توده سنگ را بهبود می بخشند.
- از بولتها هم می توان بعنوان سیستم نگهداری موقت و هم به عنوان سیستم نگهداری دائم استفاده کرد.
- بولت ها متداولترین سیستم نگهداری مورد استفاده در تونل سازی می باشد.

از جمله دلایل کاربرد زیاد و همه گیر بودن این سیستم عبارتست از:

- ✓ انعطاف پذیری بالا در شرایط مختلف
- ✓ بکارگیری آسان
- ✓ نسبتاً ارزان هستند.
- ✓ روش نصب آنها را می توان بصورت مکانیزه انجام داد.

انواع بولت ها

الف- میل مهارهای مکانیکی (Mechanically rockbolts)

این دسته از میل مهارها تنها از طریق یک نقطه با سنگ درگیر می شوند. علاوه بر این، عامل این اتصال یک عضو تکیه گاهی مکانیکی است.

ب- میل مهارهای اصطکاکی (Friction rockbolts)

دیواره چالهایی که در سنگ های سست حفر شده اند غالباً نمی توانند میل مهار ها را در یک نقطه درگیر کنند. برای رفع این مشکل میل مهارهای اصطکاکی ایجاد شده است. در این نوع میل مهارها نیروی اصطکاکی ایجاد شده در سطح تماس میل مهار و دیواره چال ناشی از نیروهای فشاری اعمال شده در جهت شعاعی (و در سرتاسر چال) باعث فراهم کردن قابلیت نگهداری می شود.

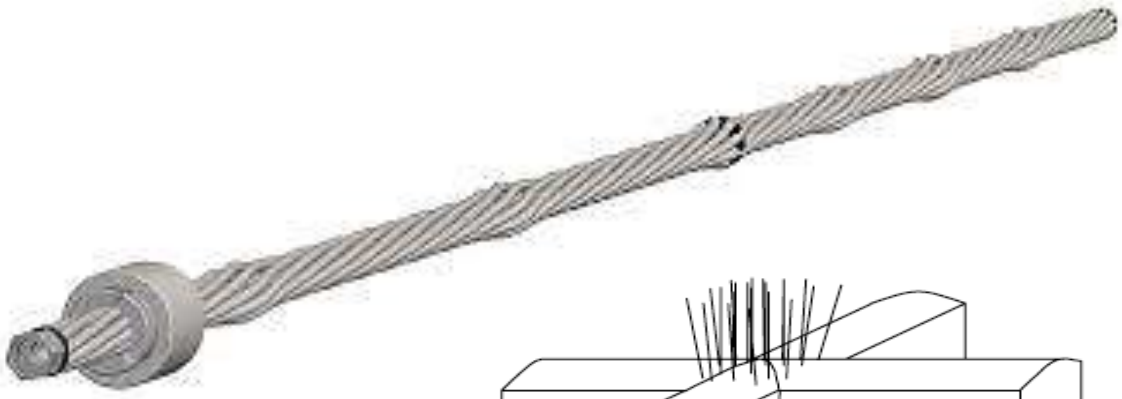
ج- میل مهارهای تزریقی (Fully grouted rockbolts)

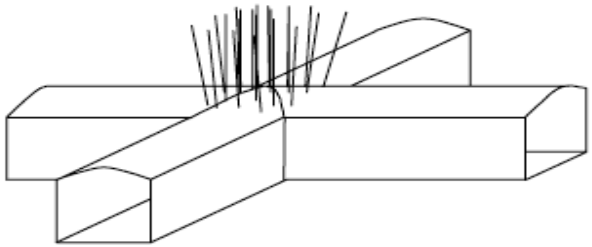
در این نوع میل مهارها با استفاده از خاصیت چسبندگی دوغاب سیمانی و رزین های مصنوعی درگیری میل مهار با سنگ و خاک حاصل می شود. درگیر کردن میل مهار در طول چال در طول کافی (معمولاً ۱ تا ۱۰ متر) انجام می شود بطوریکه تنش های اعمال شده روی خاک یا سنگ کوچک تر شود. این شیوه ی مهار کردن، مخصوصاً در سنگ های نرم و خاک ها مؤثر می باشد و از آن برای انتقال نیروهای کششی بزرگ در سنگ های سخت نیز می توان استفاده کرد.

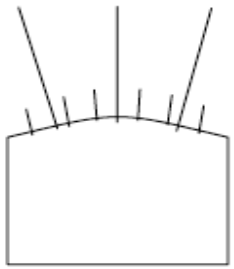
کابل های مهاری

- عمدتاً استفاده از کابلهای مهاری (Cable bolts) در مواردی انجام می گیرد که بار وارده از تحمل پیچ سنگ ها و داولها تجاوز کند.

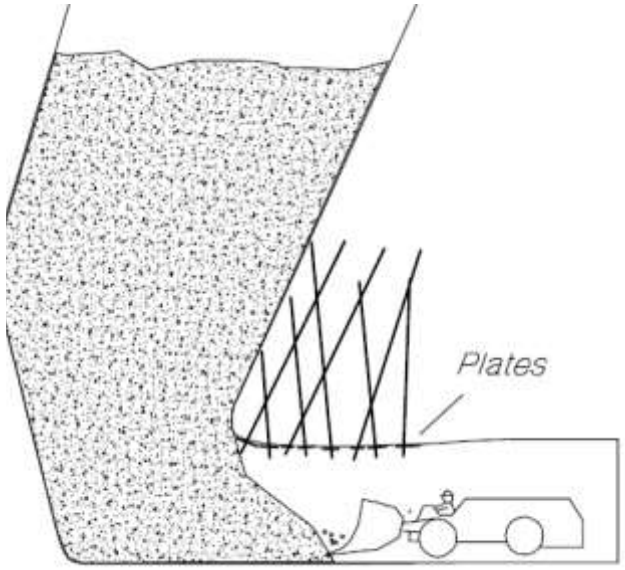
- کابل مهاری فولادی از یک مفتول صاف مرکزی با ۶ مفتول پیرامونی تشکیل شده که همه به دور رشته مرکزی تابیده شده اند. پس از تابیدن مفتولها، کابل باید تا دمای ۳۵۰ درجه سانتیگراد تحت عملیات حرارتی قرار گیرد تا تنش های محبوس در آن آزاد شوند.







تونلها و محل تقاطع آنها



نقاط تخلیه مواد معدنی

برخی سیستم های مقاوم سازی رایج در تونل سازی

- بتن پاشی یا شاتکریت

- پیچ سنگ یا راک بولت

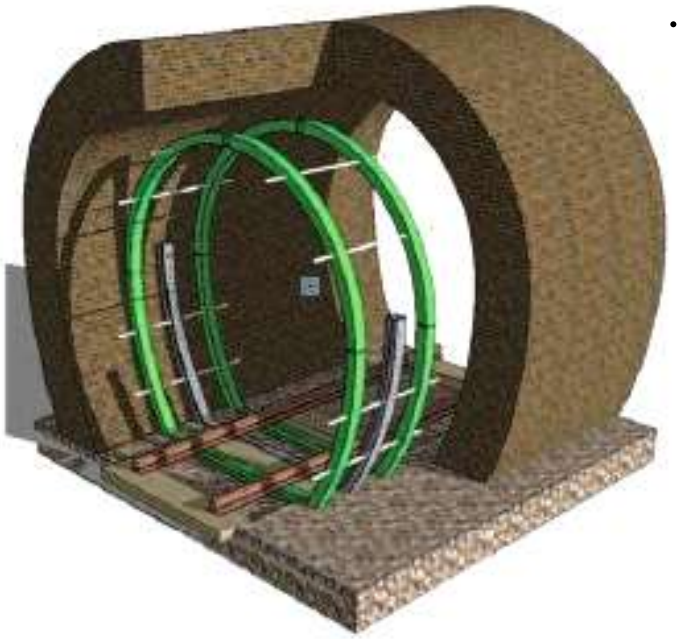
- **قاب فولادی یا نگهداری فلزی**

- لاینینگ بتنی یا قالب گیری درجا

نگهداری های فلزی

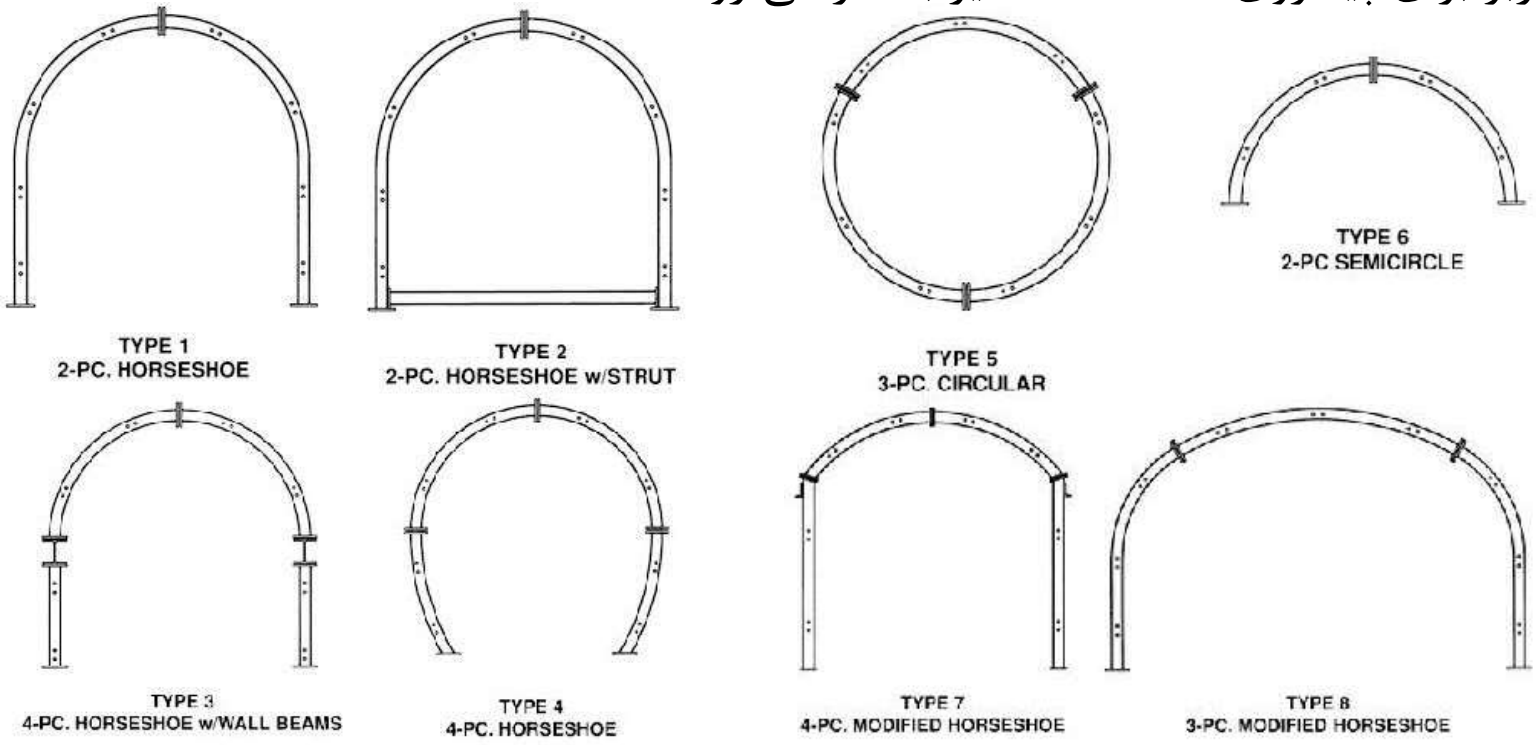
نگهداری فلزی: قاب های فلزی (Steel Rib)

- قاب های فلزی در واقع نسل دوم وسایل نگهداری محسوب می شوند. هرچند امروزه در بسیاری موارد جای خود را به میل مهارها داده است اما هنوز در شرایط پیچیده که میل مهارها جوابگو نیستند جهت اعمال فشار محصورکننده یکنواخت به جداره تونل استفاده می شود.
- همچنین از آنجا که قاب ها تحمل تغییر شکل های زیاد را دارند، می توانند شرایط نامساعد احتمالی را نشان داده تا مسئولین تمهیدات لازم را به موقع بکار گیرند.
- قاب ها از دو نوع قوسی و ذوزنقه ای تشکیل شده اند.



نگهداری فلزی: قاب های فلزی (Steel Rib)

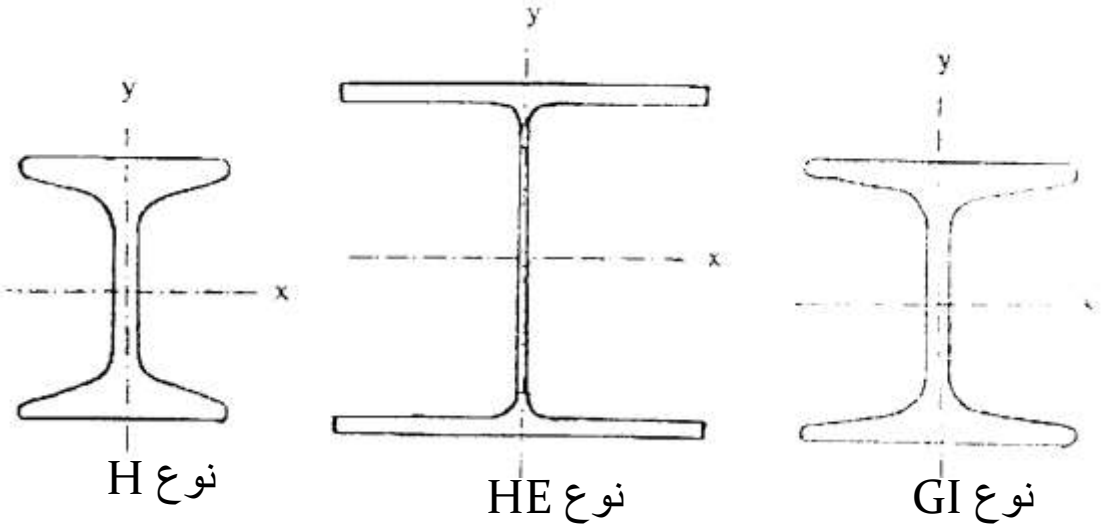
- قاب های فلزی معمولاً از پروفیل های صاف یا خم شده I یا **H** که با پیچ به هم متصل شده اند و به شکل هایی مانند قوس دایروی یا خمیده با پایه های مستقیم عمودی یا به شکل نعل اسبی با پایه های خمیده و بعضی اوقات با کفبندهای صاف یا خمیده ساخته می شوند.
- قاب های فلزی معمولاً به منظور نگهداری در نزدیکی پرتال ها، تقاطع ها، اتاقک شروع حفاری TBMو در سنگ های سست که به روش چال زنی و آتش باری حفاری می شوند، به کار می روند. قاب های فلزی در زمین های سستی که توسط TBM حفاری می شود و نیاز به یک تکیه گاه و صفحه باربر برای پیشروی TBM است نیز به کار می روند.



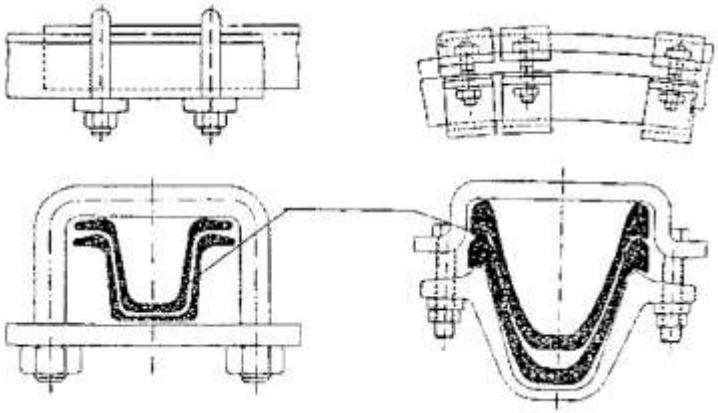
نگهداری فلزی: قاب های فلزی (Steel Rib)

قاب های صلب:

متداول ترین مقاطع این قاب ها مقطع H است



قاب های کشویی:



متداول ترین این قابها، قابهای TH(برگرفته از نام مخترع آن) می باشد. این قاب ها طوری طراحی شده اند که دو قطعه در ضمن این که به هم چسبیده اند،می توانند در داخل یکدیگر بلغزند.

نگهداری فلزی: لتیس (Lattice girder)

- لتیس ها با ظرفیت تحمل یکسان با قاب های فولادی، از وزن کمتری نسبت به آنها برخوردارند و حمل و نصب آنها نیز آسان تر است. فضاهای باز بین خرپای آنها به شاتکریت اجازه می دهد که همه جا را بپوشاند و فضایی خالی پشت آنها باقی نگذارند و لذا یک سازه مرکب به وجود می آید. آنها همچنین همراه با انواع مهارها، میخ ها و شبکه (توری)جوشی به عنوان تحکیمات نهایی به کار می روند.

برخی سیستم های مقاوم سازی رایج در تونل سازی

- بتن پاشی یا شاتکریت

- پیچ سنگ یا راک بولت

- قاب فولادی یا نگهداری فلزی

اجرای لاینینگ و بتن ریزی درجا

- لاینینگ بتنی یا قالب گیری درجا

اجرای لاینینگ و بتن ریزی درجا

نگهداری بتنی

از حسن توجه شما متشکرم