جزوه باما

دانشجویان و اساتید توجه داشته باشید جزوه موجود به صورت اختصاصی توسط وب سایت جزوه باما تهیه گردیده است و تمامی حقوق مادی و معنوی آن برای این وب سایت محفوظ می باشد.

Jozvebama.ir

جزوه باما

دانلود جزوات ، نمونه سوالات
و پاورپوینت‌های دانشگاهی

Jozvebama.ir

به نام خدا

مهندسی تونل

مراجع اصلی:

۱– فصل هایی از کتاب تونل سازی، حسن مدنی، (جلد سوم و چهارم)، تحلیل پایداری، طراحی و اجرای سیستم نگهداری

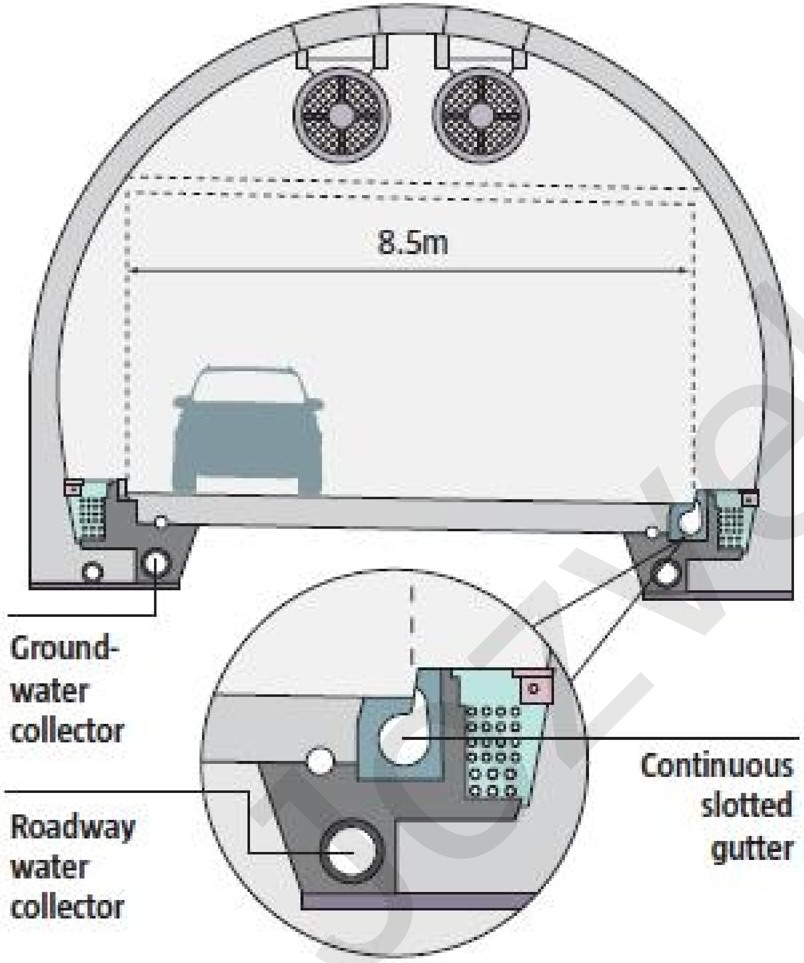
۲– نشریه تونل سازی ارتش آمریکا

۳– مطالب کلاس

مقدمه

مطالعات لازم در یک پروژه تونل سازی:

Standard tunnel cross section


8.5m
Ground-water collector
Roadway water collector
Continuous slotted gutter

۱– طراحی هندسی تونل (ابعاد، طول، امتداد و جهت آن)

۲– زمین شناسی مهندسی

۳– مطالعات ژئوتکنیک

۴– مطالعات لرزه خیزی

۵– طراحی پوشش (سازه) اولیه، روش ساخت و پوشش نهایی

۶– طراحی روشنایی

۷– طراحی سیستم تهویه

۸– طراحی سیستم زهکشی

۹–تامین ایمنی در برابر آتش سوزی

سرفصل مطالب:

فصل اول: روشهای حفاری تونل ها
فصل دوم: پوشش و نگهداری تونل ها
فصل سوم: رده بندی توده های سنگی
فصل چهارم: تخمین و طراحی تجربی پوشش تونل ها
فصل پنجم: مقاومت توده های سنگی
فصل ششم: تنش در اطراف تونل ها
فصل هفتم: اثر زلزله بر تونل ها

فصل اول: روشهای حفاری تونل ها

تونل: سازه ای است زیرزمینی که با اهداف مختلف مانند رفت و آمد وسایل نقلیه، قطار، مترو، انتقال آب و غیره احداث می گردد.

انواع تونل (Tunnel) یا سازه های زیر زمینی Underground Structures

- تونل راه
- تونل راه آهن
- تونل انتقال آب
- تونل مترو
- ریز تونل ها (Micro Tunnel)
- ایستگاه مترو
- نیروگاهها و مغارهای زیر زمینی
- پناهگاهها
- انبارهای زیرزمینی
- معادن زیرزمینی
- شهرهای زیرزمینی
- و غیره

فرق اساسی این تونل ها یا سازه ها در شکل هندسی، ابعاد واشکال و شرایط محیط ساخت آنها به لحاظ سخت و نرم بودن محیط است.

بخش ۱: روشهای حفاری تونل ها

روشهای سنتی:
۱– روش دستی
۲– گرم و سرد کردن سنگ
۳– روش چال زنی و انفجار

روشهای مکانیزه:
۱– لودر و بیل مکانیکی
۲– چکش مکانیکی
۳– ماشین حفار کله گاوی
۴– ماشین حفار تونل (TBM)

در کل تونل ها به دو صورت تمام مقطع و چند مقطع (چند مرحله ای) حفاری می شوند.

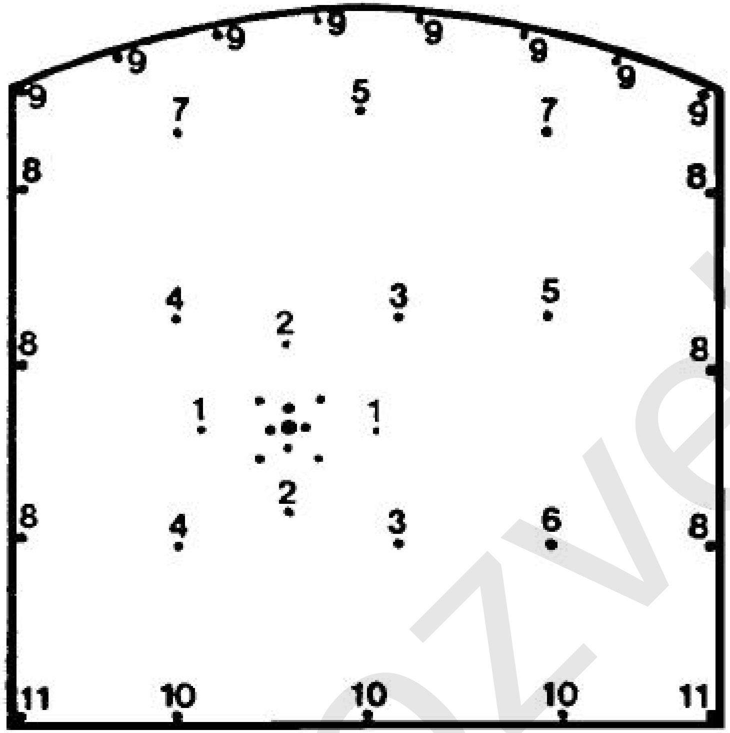
۱– روش دستی

در این روش تونل به صورت دستی و با استفاده از بیل و کلنگ، دیلم و چکش حفاری می گردد.
عیب این روش سرعت حفاری کم آن می باشد و امروزه تقریبا منسوخ شده است.

۲– روش گرم و سرد کردن سنگ

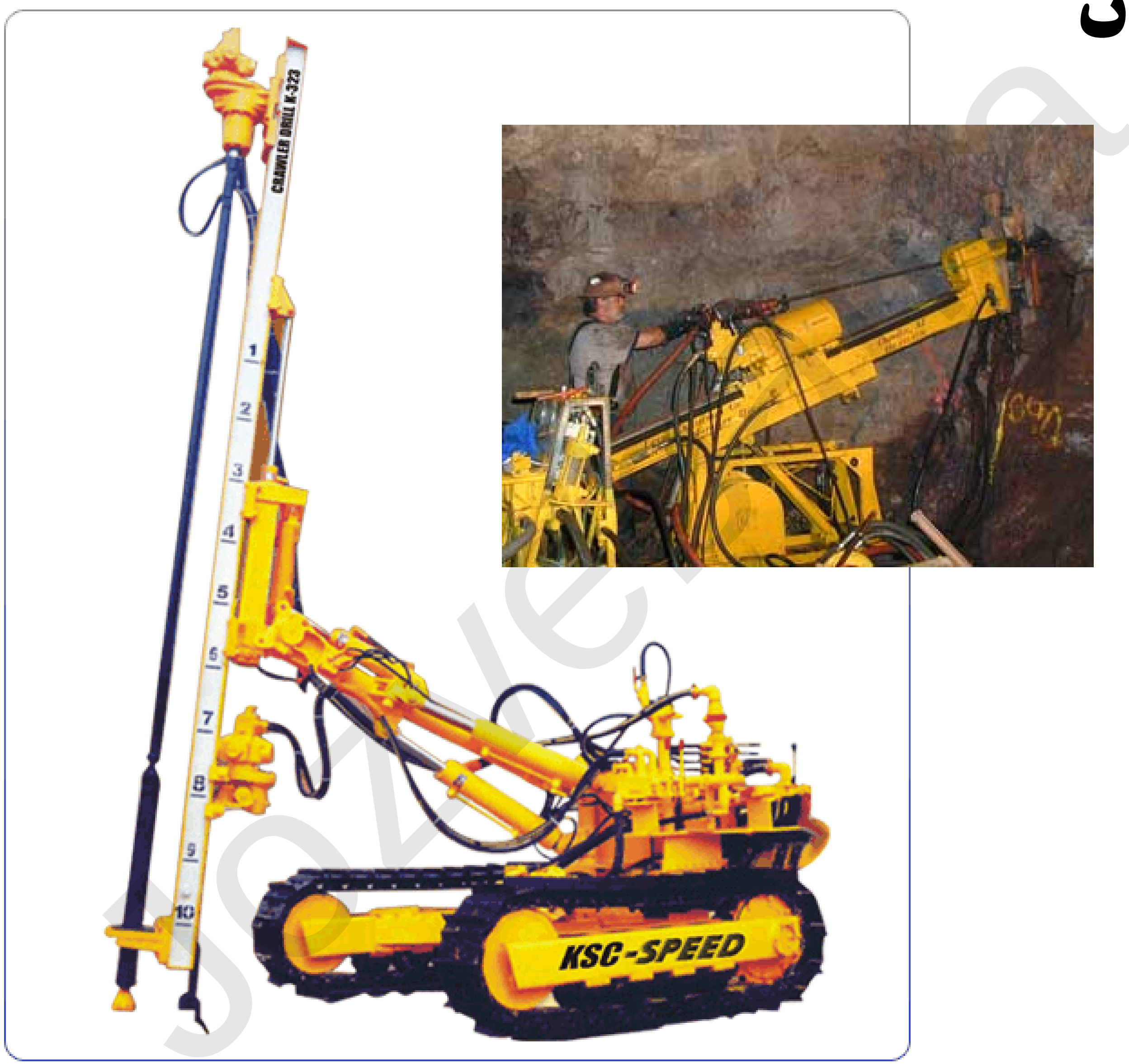
در این روش در اثر انقباض و انبساط، سنگ در جای خودش سست و خرد شده و آماده حفاری می گردد.

۳– روش چال زنی و انفجار


9
9
9
9
9
9
9
9
7
5
7
8
8
4
2
3
5
8
8
1
1
2
8
4
3
6
8
11
10
10
10
11

ناحیه ای که قرار است حفاری شود به کمک دستگاهی به نام چال زن حفاری شده و ماده منفجره در چال قرار داده شده و منفجر می گردد. در اثر انفجار، توده سنگ و خاک اطراف سست شده و به کمک ماشین و یا دست تخلیه می گردد.

ماشین چالزن


CRAWLER DRILL K-323
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
KSC-SPEED

مراحل کار:

۱– تهیه نقشه چال (محل، قطر، عمق، امتداد، فاصله، تعداد چال و ترتیب انفجار)

۲– چالزنی (دستی و مکانیزه: برقی، بادی و هیدرولیکی)

۳– خرج گذاری (قرار دادن ماده منفجره در چال بر حسب مقدار محاسبه شده)

۴– انفجار یا آتشباری (معمولا به کمک الکتریسیته انجام میشود)

۵– تخلیه دود یا تهویه

۶– لق گیری (خارج نمودن سنگ های لق شده از جای خودشان)

۷– تخلیه نخاله

۸– نگهداری یا پایدار سازی (اجرای پوشش)

۹– ادامه تاسیسات فنی

عملکرد انفجار:

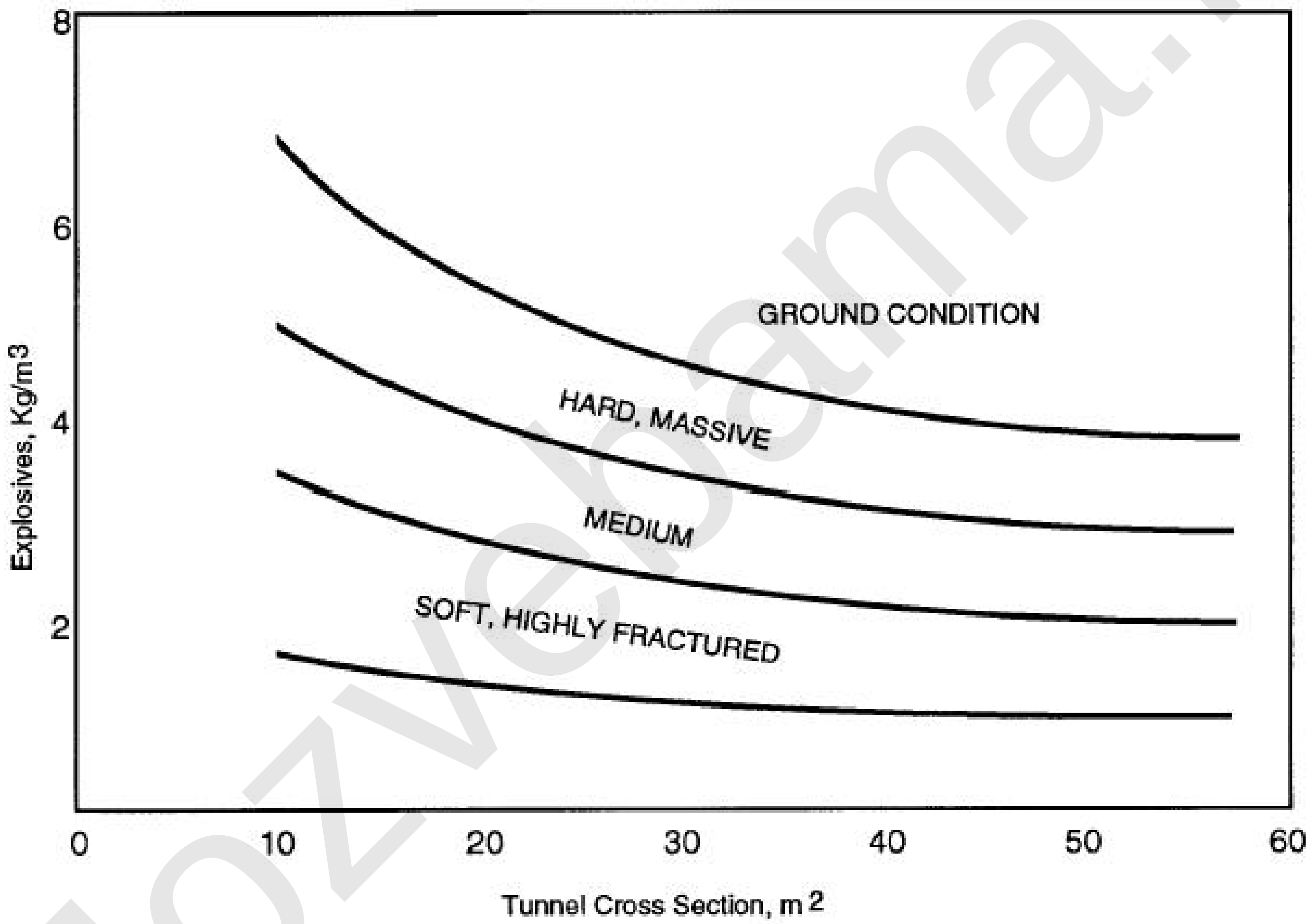
۱– در اثر تغییر ترکیب شیمیایی انفجار یک سری گاز ایجاد می شود.

۲– موج تولید می شود.

ترکیب دو عامل فوق باعث خرد شدن سنگ می گردد.

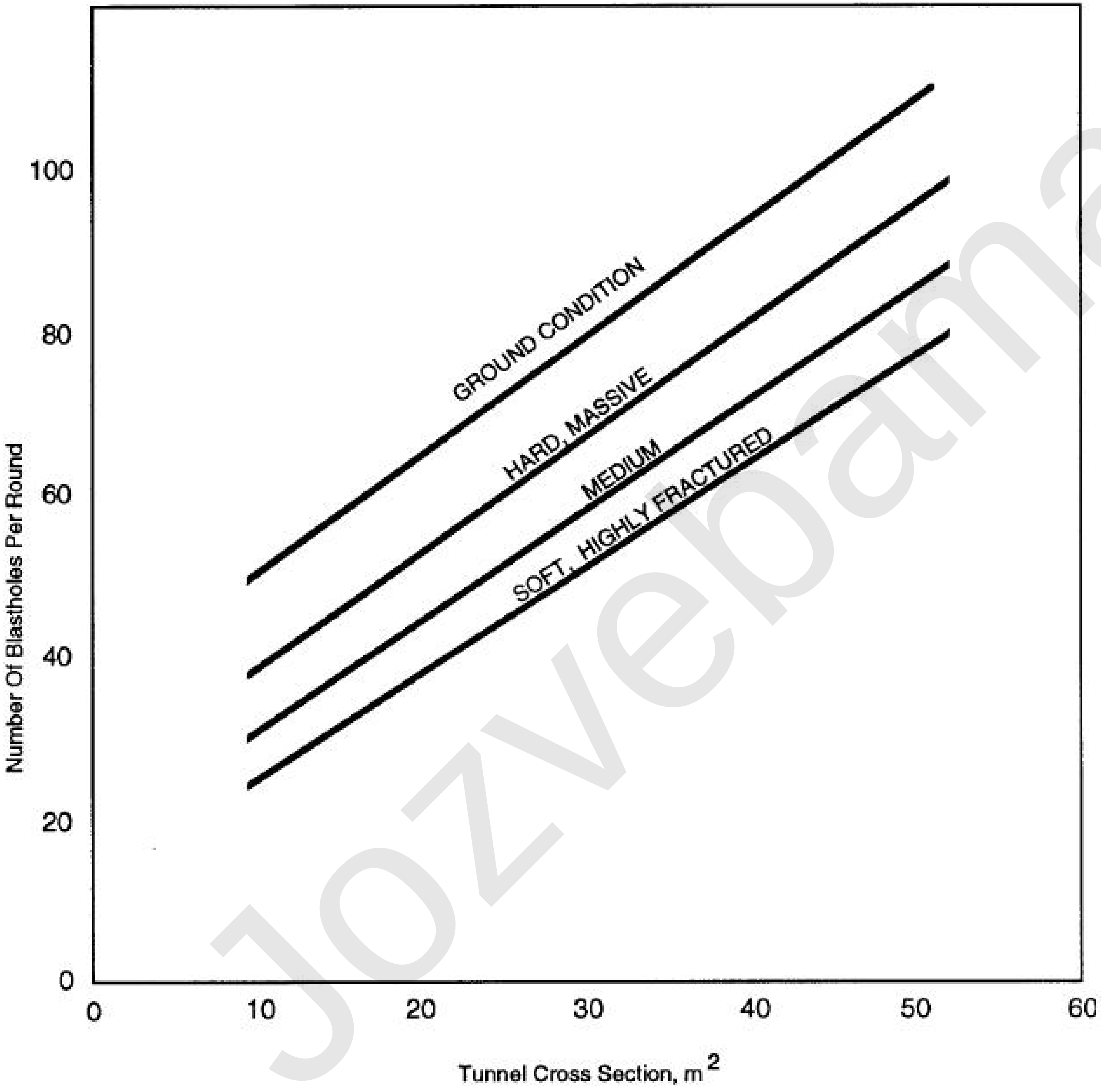
عیب این روش این است که سطح حفاری شده دچار دستخوردگی زیادی شده و سطح ایجاد شده دارای ناهمواری زیادی است. نا همواریهای مذکور باعث ایجاد تمرکز تنش در سطح تونل شده و حتی در عمق زمین هم ممکن ادامه پیدا کند که خود این امر باعث ضعیف تر شدن خاک و سنگ اطراف تونل می گردد.

تخمین مقدار ماده منفجره برای حفاری تونل

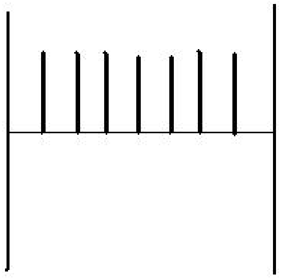


خرج ویژه: مقدار ماده منفجره ای که برای انفجار یک متر مکعب از سنگ نیاز است.

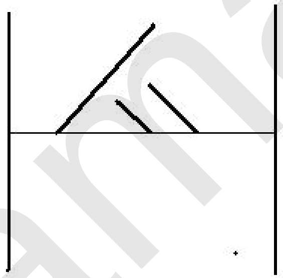
تعیین تعداد چالهای انفجار



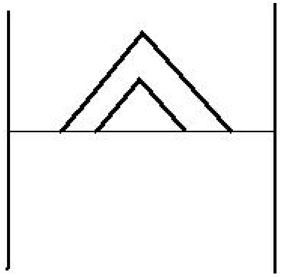
الگوهای چال زنی در سینه کار (جبهه حفاری)



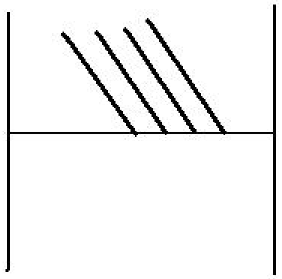
موازی



گوه ای



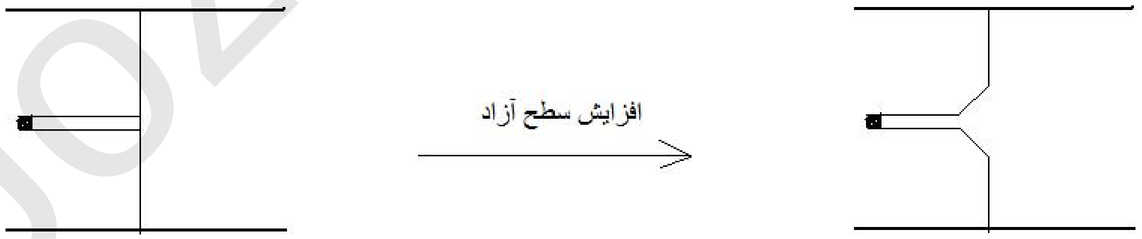
شکل V



بادبزنی

اکر تنشهای انفجاری نتوانند به محیط آزاد راه پیدا کنند می گویند انفجار خفه شده است.

همچنین با افزایش سطح آزاد مقدار خرج گذاری کمتر می شود.



عوامل موثر در الگوی چالزنی

۱– ابعاد تونل
۲– هندسه تونل
۳– قطر چال (کوچک یا بزرگ)
۴– کیفیت نهایی
۵– شرایط زمین شناسی
۶– نوع ماده منفجره و چاشنیها
۷– نوع تجهیزات چالزنی
۸– محدودیتهای ارتعاش

برای محیط از انفجار آرام و خرج و تعداد چال کمتری نسبت به بخش مرکزی استفاده می شود. تا سطح حفاری شده همرارتر گردد.

انواع مواد منفجره تولیدی در ایران

نوع دینامیت	قطر (mm)	طول (mm)	وزن (gr)	مقاومت در آب	سرعت انفجار (m/s)	دانسیته (gr.cm3)
۲۰	۲۰	165	130	عالی	>۳۰۰۰	۱/۴۵
۳۰	۳۰	195	165	عالی	>۳۰۰۰	۱/۴۵
۵۰	۵۰	300	800	عالی	>۳۰۰۰	۱/۴۵

روشهای حفاری:

۱– تک مرحله ای (تمام مقطع)

۲– چند مرحله ای (چند مقطع):

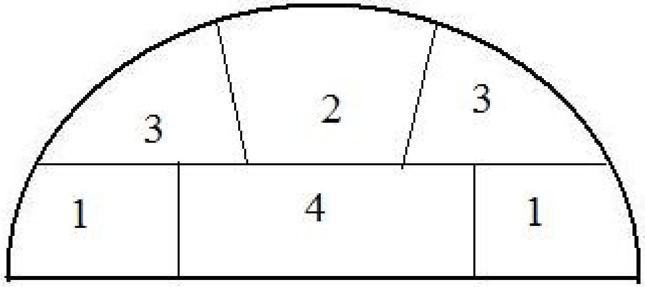
الف: آلمانی

ب: انگلیسی: بعد از اتمام حفاری تمام مقطع پوشش انجام می گردد.

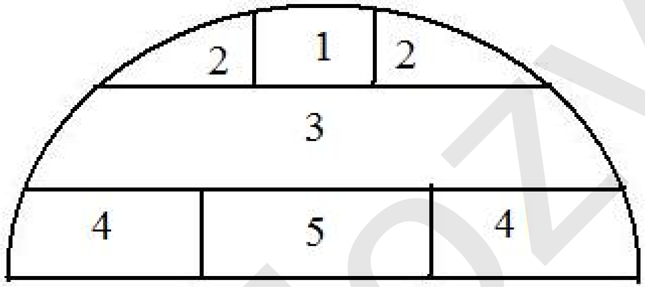
ج: بلژیکی: مثل روش انگلیسی است فقط بعد از هر مرحله حفاری پوشش صورت می گیرد.

د: اتریشی

ه: آمریکایی



روش آلمانی



روش انگلیسی

معایب روش حفاری چالزنی و انفجار:

۱– دست خوردگی تنش زیاد است.

۲– نیروی انسانی زیادی لازم است.

۳– عدم قابلیت استفاده در مناطق مسکونی.

۴– مقطع هموار ایجاد نمی شود.

۵– مواد سمی در محیط ایجاد می شود.

۶– مواد استفاده شده خطرناک است.

۷– در محیط های آبدار کار کردن مشکل است.

۸– قطعات حفاری شده یکنواخت نیستند (مشکل حمل و نقل).

مزایای روش حفاری چالزنی و انفجار:

۱– برای تونل های کوتاه مفید است.

۲– می توان تونل های منحنی احداث کرد.

۳– تونل های با قطر های مختلف حفر می شود.

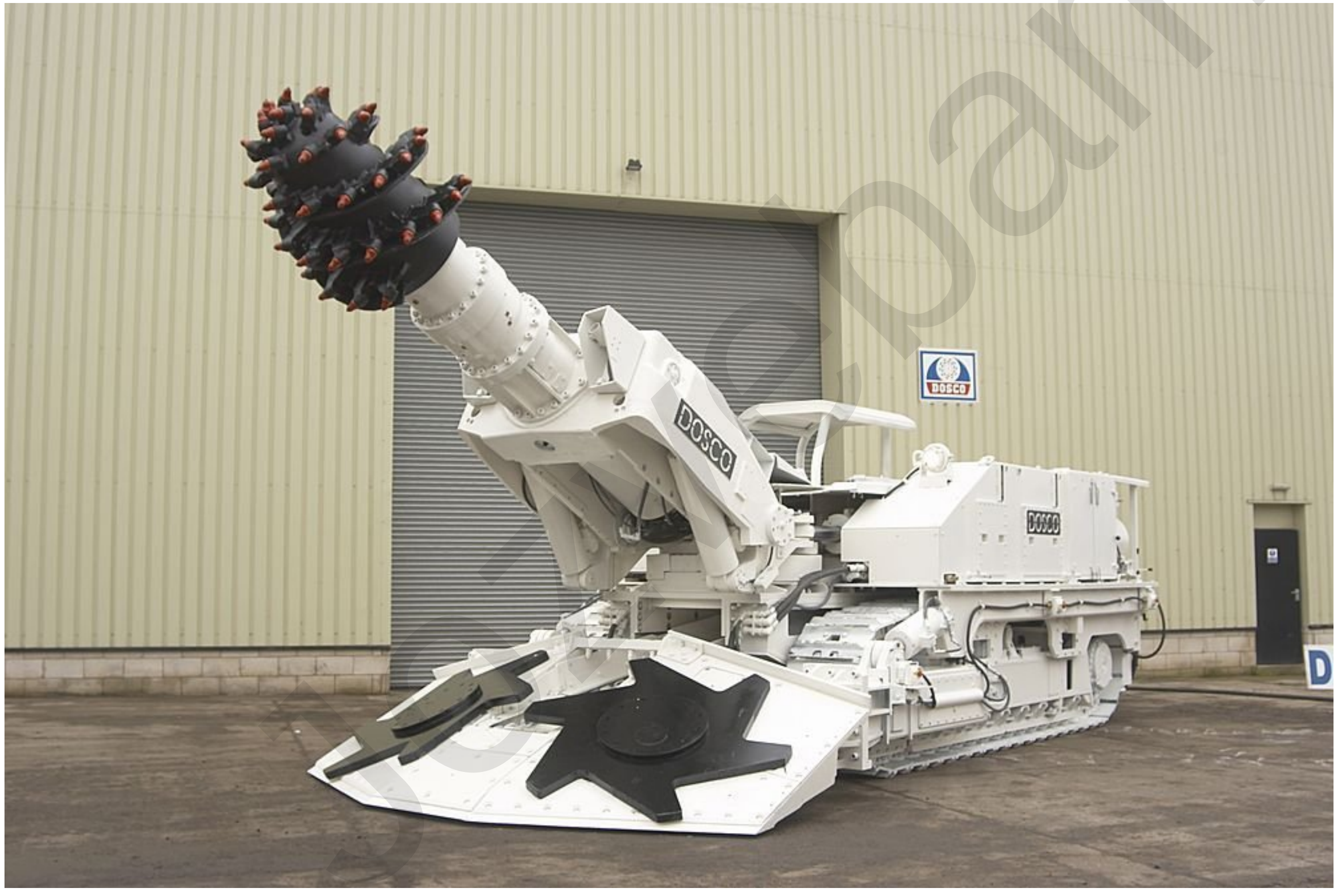
روش های مکانیزه

روش استفاده از لودر و بیل مکانیکی

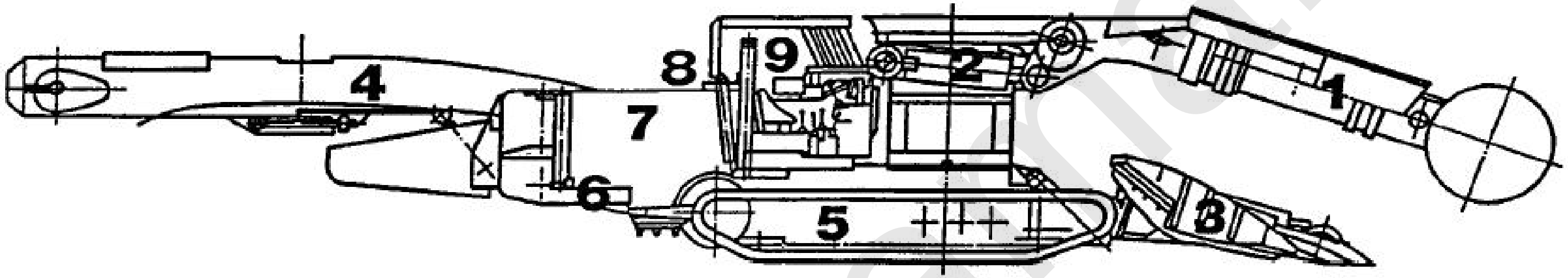
مقطع تونل با استفاده از وسایل حفاری معمولی مانند لودر، بیل مکانیلی، کمپرسور و غیره حفاری می گردد. این روش در تونل های کوچک، و زمین های نرم قابل استفاده است ولی نسبت به سایر روشهای حفاری مکانیزه درای کارایی کمی است.

روش استفاده از ماشین حفار کله گاوی (Road Header)

ناحیه ای که قرار است حفاری شود به کمک دستگاهی به نام کله گاوی حفاری می کردد.
مزیت این روش ایین است که سطح حفاری شده دچار دستخوردگی کمی می گردد.



اجزای یک Road Header برای نمونه



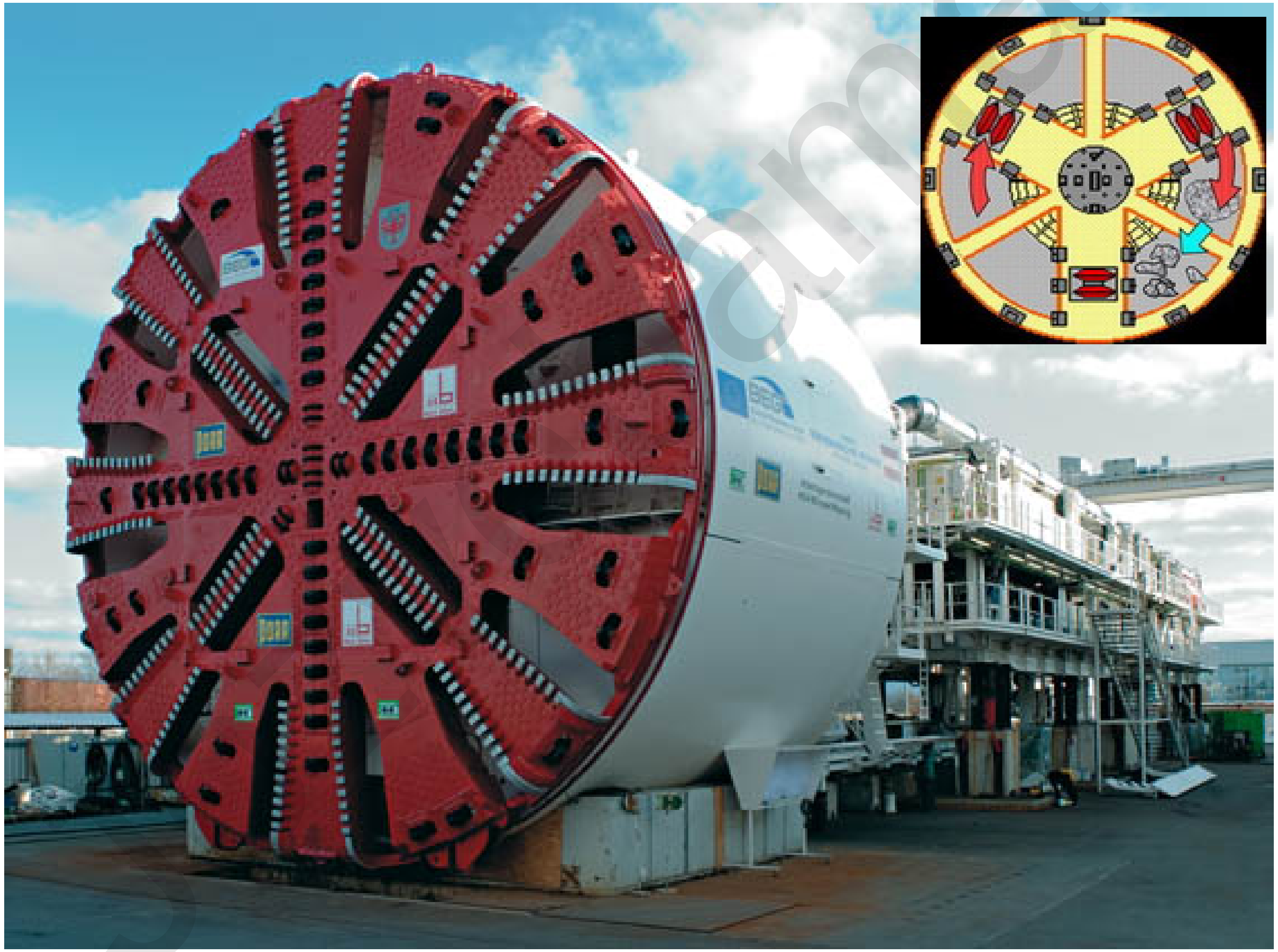
1. Cutter Boom
2. Turret
3. Loading Device
4. Chain Conveyor
5. Crawler Track Assembly
6. Base Frame
7. Electrics
8. Hydraulics
9. Operator's Cab

نمونه هایی از cutter های ماشین کله گاوی

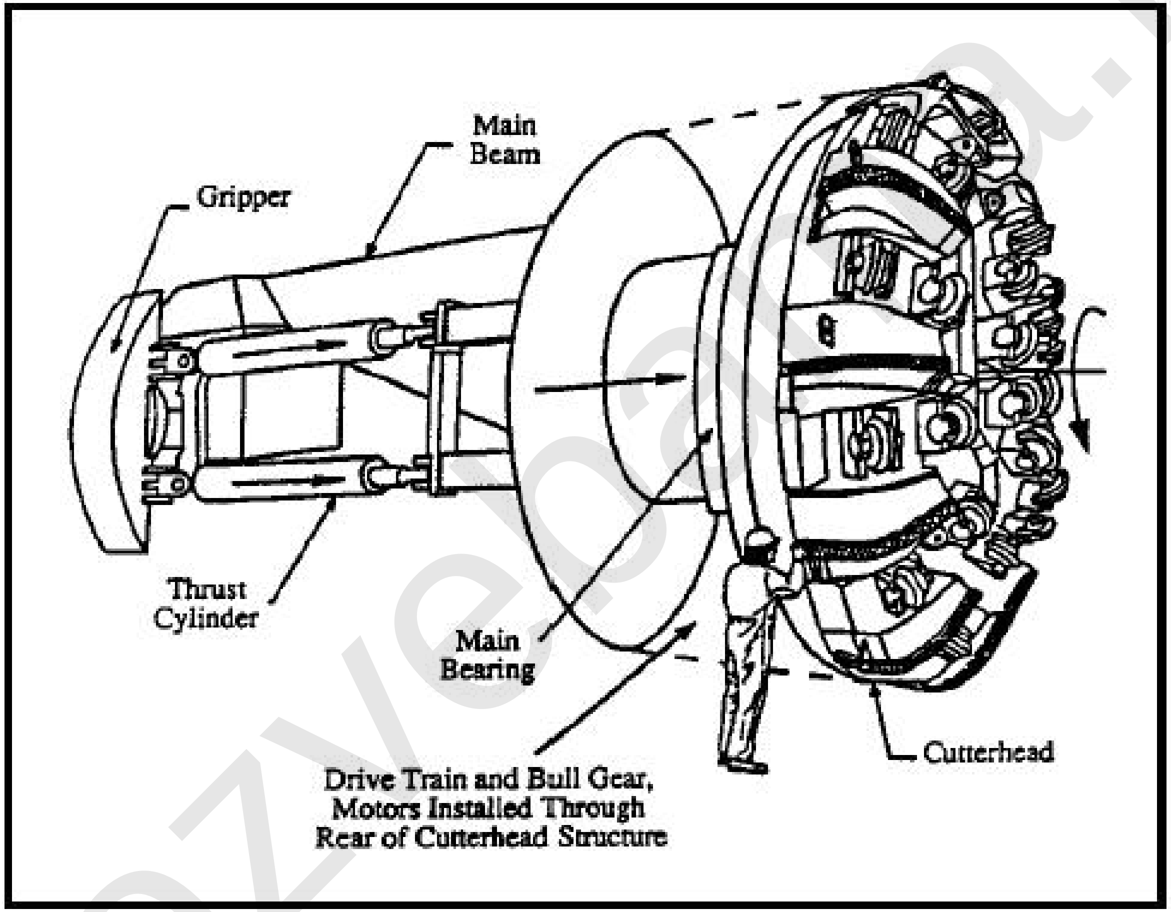
بعضی از ماشین های حفار خیلی بزرگ بوده و در معادن روباز از آنها استفاده می شود.

روش استفاده از ماشین حفار تونل (TBM)

ناحیه ای که قرار است حفاری شود به کمک دستگاهی به نام Tunnel Boring Machine حفاری می کردد.



اجزای یک دستگاه حفار تونل (TBM)

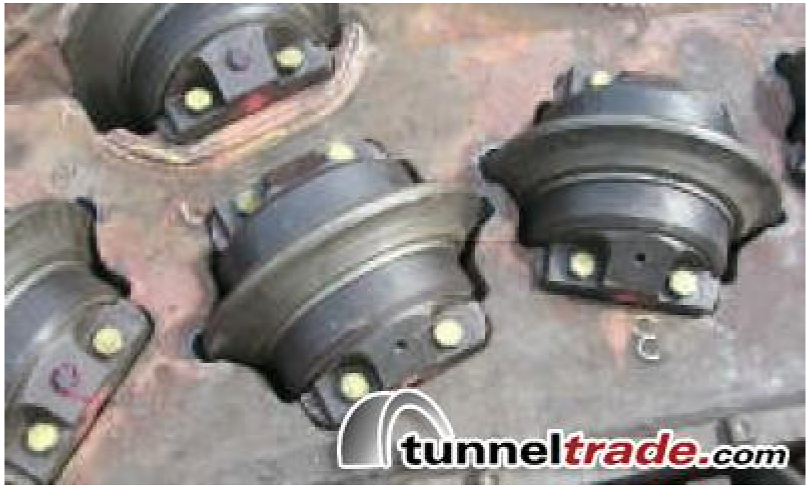

Main Beam
Gripper
Thrust Cylinder
Main Bearing
Cutterhead
Drive Train and Bull Gear, Motors Installed Through Rear of Cutterhead Structure

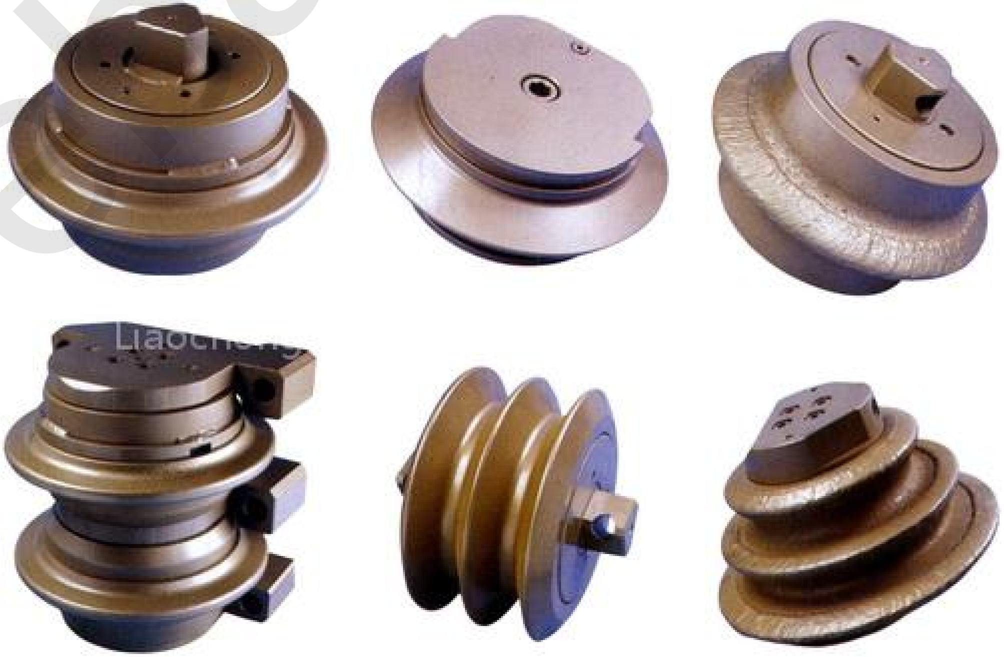
روش حفاری:

به منظور حفاری، جکهای محیطی باز می شوند و تمام وزن دستگاه بر جکهای محیطی وارد می شود. با استفاده از جکهای رانشی، سر دستگاه (کلگی) به: جلو رانده می شود. پس از اتمام هر گام حفاری، جکهای رانشی بسته می شوند و قسمت پشتی به سر دستگاه می چسبد. سپس جک تحتانی باز و جکهای محیطی بسته می شود. به این ترتیب TBM در داخل زمین حرکت می کند.

در ورودی TBM به تونل به یک start chamber نیاز است. تا دستگاه شروع به حرکت نماید. اما بعد از ورود دستگاه به تونل نیازی به این وسیله نیست.

انواع Cutter ها در ماشین TBM


tunneltrade.com



انواع روش های حفاری با TBM:

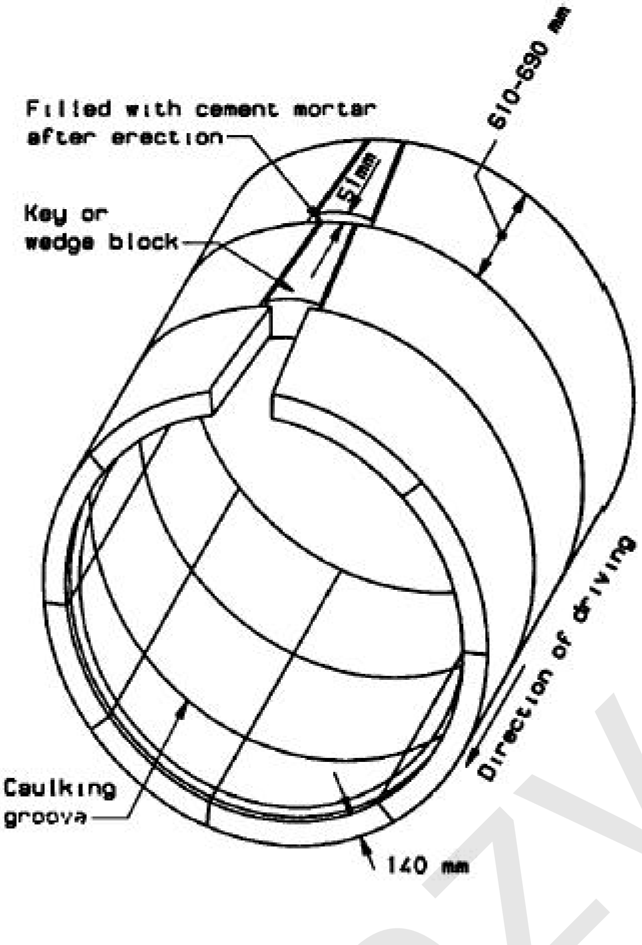
۱– روش باز (Open TBM): در زمینهای محکم و خود نگهدار استفاده می شود.

۲– تک سپری (Single Shield): در زمینهای سست و ضعیف استفاده می شود.

۳– دو سپری یا تلسکوبی (Double shield): در این دستگاه همزمان هم سگمنت گذاری شده و هم حفاری انجام می گردد و سرعتش دو برابر تک سپری است.

Segmentها قطعات بتنی پیش ساخته ای هستند که به صورت کام و زبانه در هم جفت می شوند و استوانه پوشش را می سازند.

چون segment ها داخل سپری اجرا می شوند قطر خارجی آن کوچکتر از قطر داخلی حفاری شده می باشد. لذا بین segment و جداره تونل pea gravel پر می شود. این عمل موجب یکنواخت شدن توزیع تنش در اطراف پوشش می گردد. پس از پر شدن pea gravel در آن دوغاب تزریق می گردد.


Filled with cement mortar after erection
610-690 mm
51mm
Key or wedge block
Direction of driving
Caulking groove
140 mm

WEDGE BLOCK EXPANDED CONCRETE LINING

طول هر گام حفاری در این رش به اندازه عرض سگمنت می باشد.

مزایای TBM:

۱– سطح حفاری شده دچار دستخوردگی کمی می گردد.
۲– حفاری و تخلیه مواد حفاری شده کاملا اتوماتیک می باشد.
۳– می توان حفاری را تمام مقطع انجام داد.
۴– دستگاه های با قطرهای مختلف برای تونل های با قطرهای مختلف وجود دارد.
۵– در زیر سطح آب امکان حفاری وجود دارد.
۶– در تونل های بلند اقتصادی است.
۷– نیروی انسانی کمی مورد نیاز است.
۸– سطح مقطع حفاری شده یکنواخت است.
۹– حرکت به سمت جلو به وسیله لیزر انجام می شود.

معایب TBM

۱– ممکن است گیر کند.

۲– انعطاف پذیری (شعاع انحنای مسیر حفاری شده) کم است.

اندازه TBM:

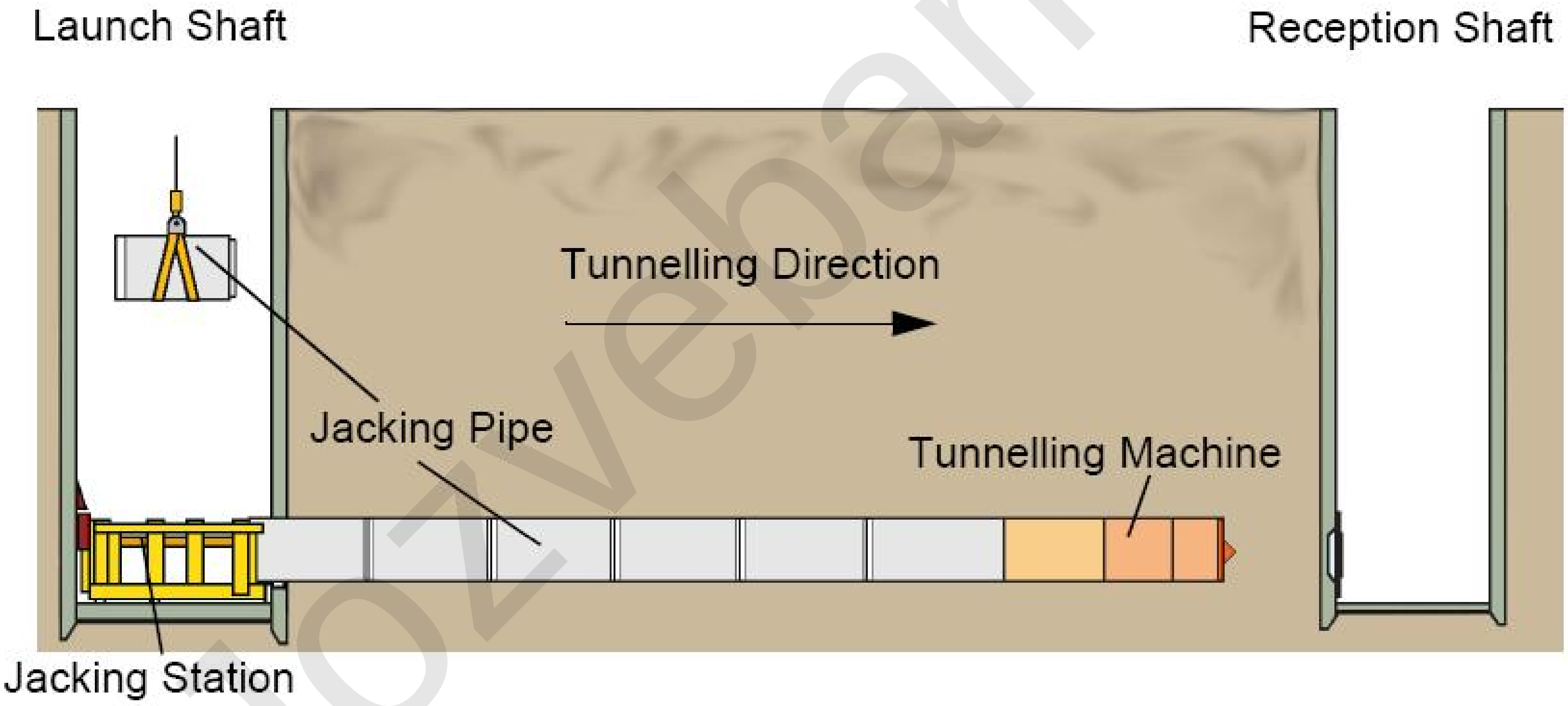
TBMها در اندازه های متنوع ساخته
و استفاده می شوند.

EURO TUNNEL
TML
Kawasaki

Micro TBM (Micro Tunneling)

استفاده از Micro TBM (Micro Tunneling)

برای حفاری در نواحی شهری و عبور هدایت آب و فاضل آب و غیره به صورت رو بسته و جلوگیری از انسداد ترافیک شهری مورد استفاده قرار می گیرد.


Launch Shaft
Reception Shaft
Tunnelling Direction
Jacking Pipe
Tunnelling Machine
Jacking Station

حمل و نقل در تونل

۱– خط آهن و واگن یا سیستم استفاده از ریل
۲– جاده و وسایل چرخ لاستیکی
۳– سیستم تسمه نقاله

خط آهن و واگن

مزایا :

۱– حداقل نیاز به تهویه
۲– سازگاری با بسیاری از روشهای حفاری
۳– سازگاری با ابعاد مختلف تونل ها
۴– استفاده همزمان از چندین منبع انرژی مانند برق و دیزل
۵– سیستم هدایت ثابت (از نظر ایجاد ایمنی و برخورد با وسایل حمل و نقل)
۶– عدم محدودیت در رابطه با طول تونل

معایب:

۱– نیاز به توسعه مداوم تا نزدیک جبهه حفاری
۲– ثابت بودن محل عبور و انعطاف پذیری کم
۳– نسبتا ثابت بودن مراکز تخلیه
۴– اشغال شدن کف تونل

محدودیتها:

۱– شیب زمین ٪۳ (حداکثر تا ٪۶)
۲– سرعت کم جابه جایی (۲۴km/h)

جاده و وسایل چرخ لاستیکی

مزایا:

۱– سرعت نسبتا زیاد
۲–بالا بودن قدرت مانور
۳– استفاده از چند وسیله در صورت زیاد بودن عرض تونل
۴– عدم تعطیل شدن کار در صورت خرابی یک وسیله
۵– قابلیت ادغام با سایر سیستم های حمل و نقل
۶– راحت بودن کار در کف تونل

معایب:

۱– مشکل کار در صورت خیس بودن کف تونل
۲– نیاز به سیستم تهویه قویتر
۳– سختی کار در تونل های باریک
۴– دیزل تنها تامین کننده نیرو

محدودیتها:

۱– شیب زمین ٪۱۵ (حداکثر تا ٪۲۵)
۲– سرعت جابه جایی (۴۰km/h تا ۸۰ km/h)

نوار نقاله یا تسمه نقاله

مزایا:

۱– ظرفیت جابه جایی مواد با هر سرعت
۲– قابل انتقال به هر اندازه از تونل
۳– نیاز به فضای آزاد نسبتا کم
۴– قابلیت انتقال، تعمیر و نگهداری
۵– حمل مواد به صورت پیوسته

معایب:

۱– هزینه اولیه زیاد
۲– از کار افتادن کل سیستم در صورت خرابی یک نقطه
۳– محدود بودن اندازه مواد قابل حمل
۴– احتیاج به سیستم سازه ای پیوسته
۵– نیاز به توسعه تا نزدیکی کار
۶– نیاز به طراحی خاص در صورت انحنا داشتن تونل

محدودیتها:

۱– شیب زمین ٪۱۸ (حداکثر تا ٪۲۰)
۲– حداکثر قطر قابل حمل ۴۵cm

فصل دوم: پوشش و نگهداری تونل ها

انواع پوشش تونلها:

۱– پوشش اولیه: سازه ای است که در حین حفاری و یا بلافاصله بعد از حفاری برای نگهداری وزن لایه های خاک و سنک و تنش های ناشی از آن ساخته می شود.

۲– پوشش نهایی یا دایمی: سازه ای است که بعد از اتمام حفاری و اجرای پوشش اولیه احداث می شود. وظیفه آن تحمل نیروهای زلزله و تنش های ناشی ازً تغییر مقاومت مصالح خاک و سنگ اطراف تونل می باشد.

۳– ترکیب دو مورد فوق (اولیه و نهایی)

انواع پوشش اولیه:

۱– بدون نیاز به پوشش
۲– چوب بست (داربست چوبی)
۲– شاتکریت (بتن پاشی)
۳– سنگ دوزها (پیچ سنگ) و کابل ها (داول ها)
۴– قاب های فولادی (هلالی)
۵– لاتیس گیردر
۶– ترکیبی از موارد فوق

در واقع پوشش اولیه برای جلوگیری از توسعه منطقه پلاستیک در اطراف تونل ساخته می شود.

۱- بدون نیاز به پوشش

در مواردی که توده خاک و سنگ اطراف محل حفاری شده دارای مقاومت خوب و کافی باشد می توان بدون استفاده از سازه نگهدارنده، تونل حفاری شده را مورد بهره برداری قرار داد.

۲– شاتکریت (بتن پاشیدنی)

شاتکریت (بتن پاشیدنی) مانند بتن ترکیبی است از سیمان، آب و شن و ماسه.

که بعد از ترکیب بر سطح حفاری شده پاشیده می شود.

روشهای ساخت:

۱– روش تر: ابتدا همه اجزای آن باهم مخلوط شده و بتن آماده به سطح مورد نظر پاشیده می شود.

۲– روش خشک: مواد به صورت خشک مخلوط شده و در محل پاشیدن آب به آن اضافه می گردد.

نسبت اختلاط شاتکریت:

سیمان: ۲۰–۱۵ درصد

مصالح درشت دانه: ۴۰–۳۰ درصد

مصالح ریزدانه: ۵۰–۴۰ درصد

نسبت آب به سیمان:

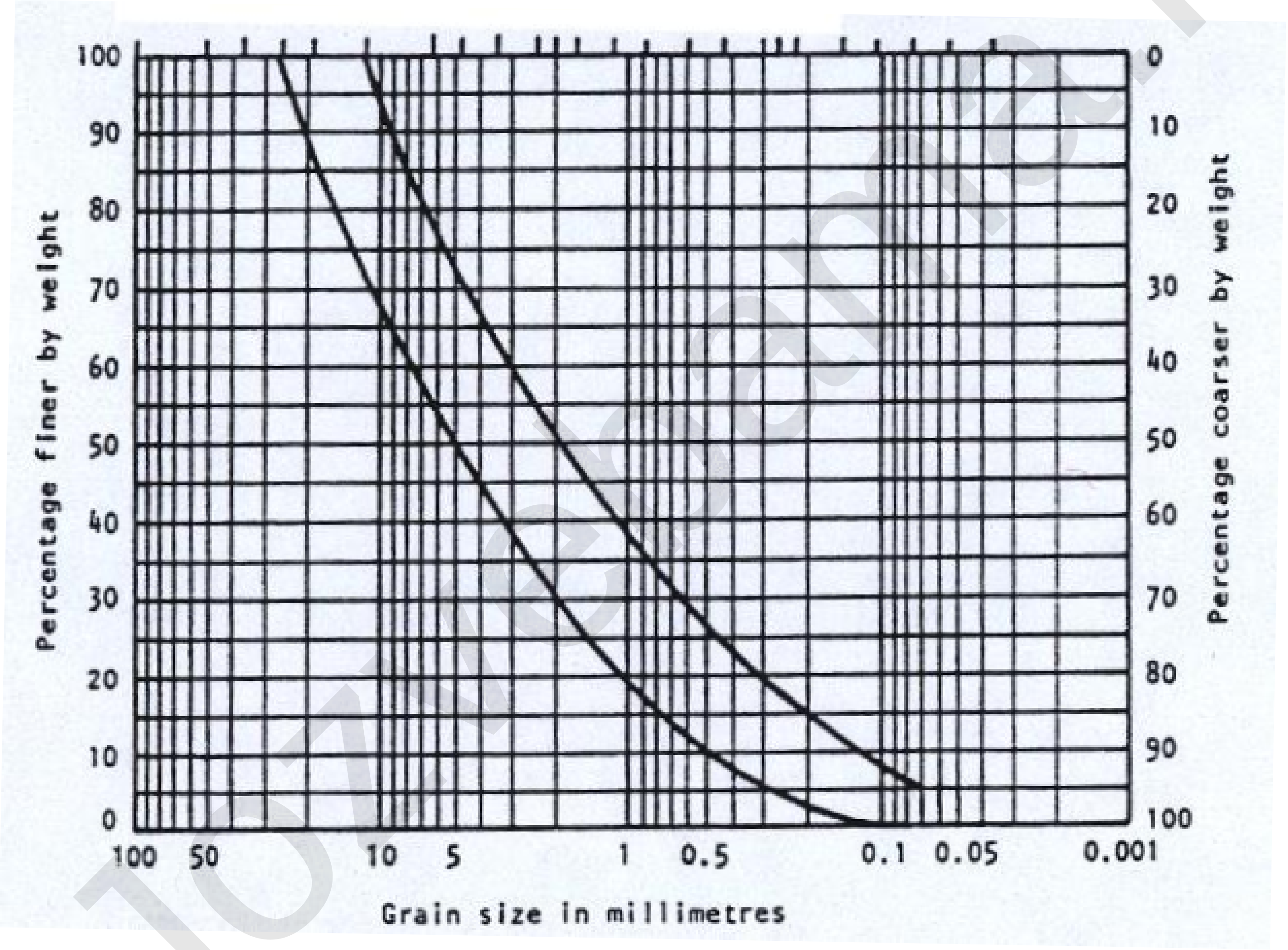
۰,۵–۰,۳ روش خشک

۰,۶–۰,۴ روش تر

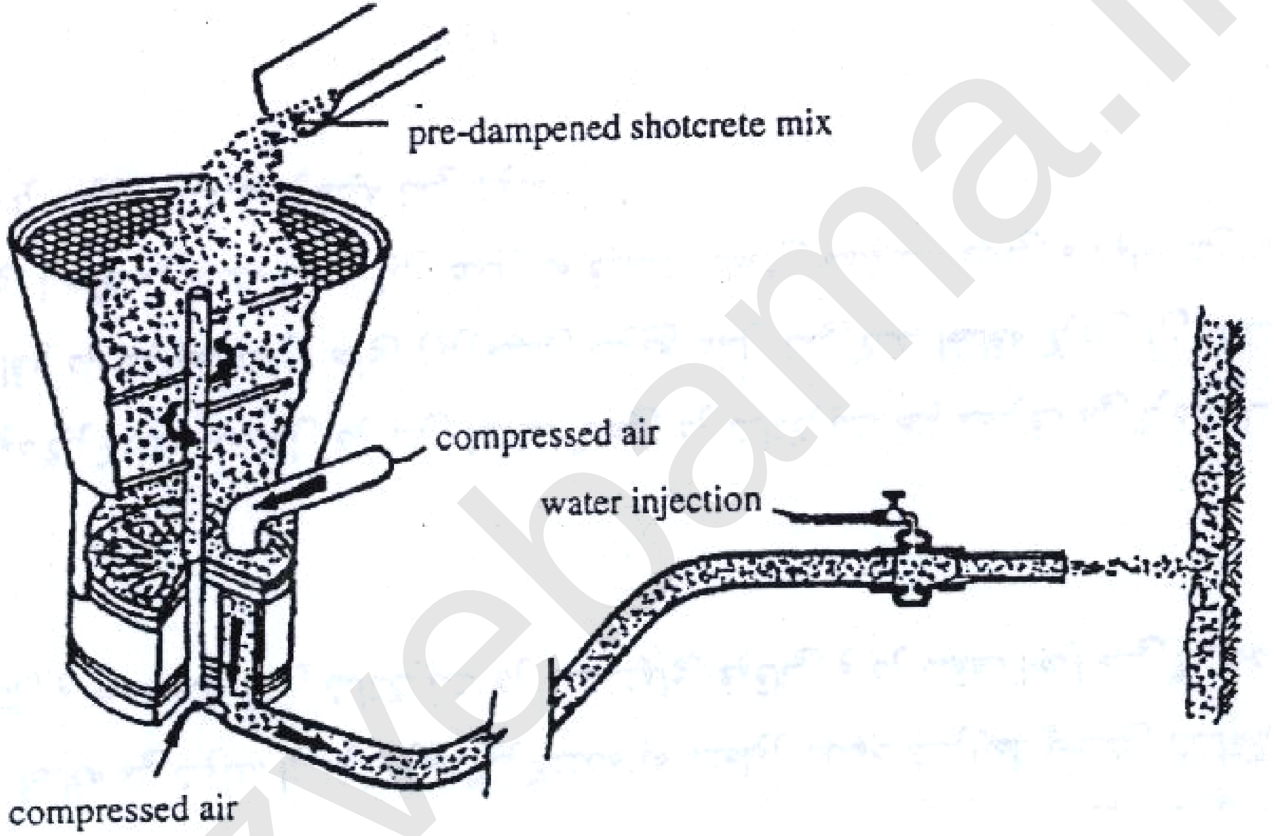
همانند بتن می توان از مواد افزودنی برای زودگیر نمودن، کندگیر نمودن، کاهش آب و غیره استفاده نمود.

معمولا موارد مطرح در مورد تکنولوژی بتن برای شاتکریت ها نیز صادق است.

منحنی دانه بندی مصالح شاتکریت



اجرای شاتکریت: روش خشک

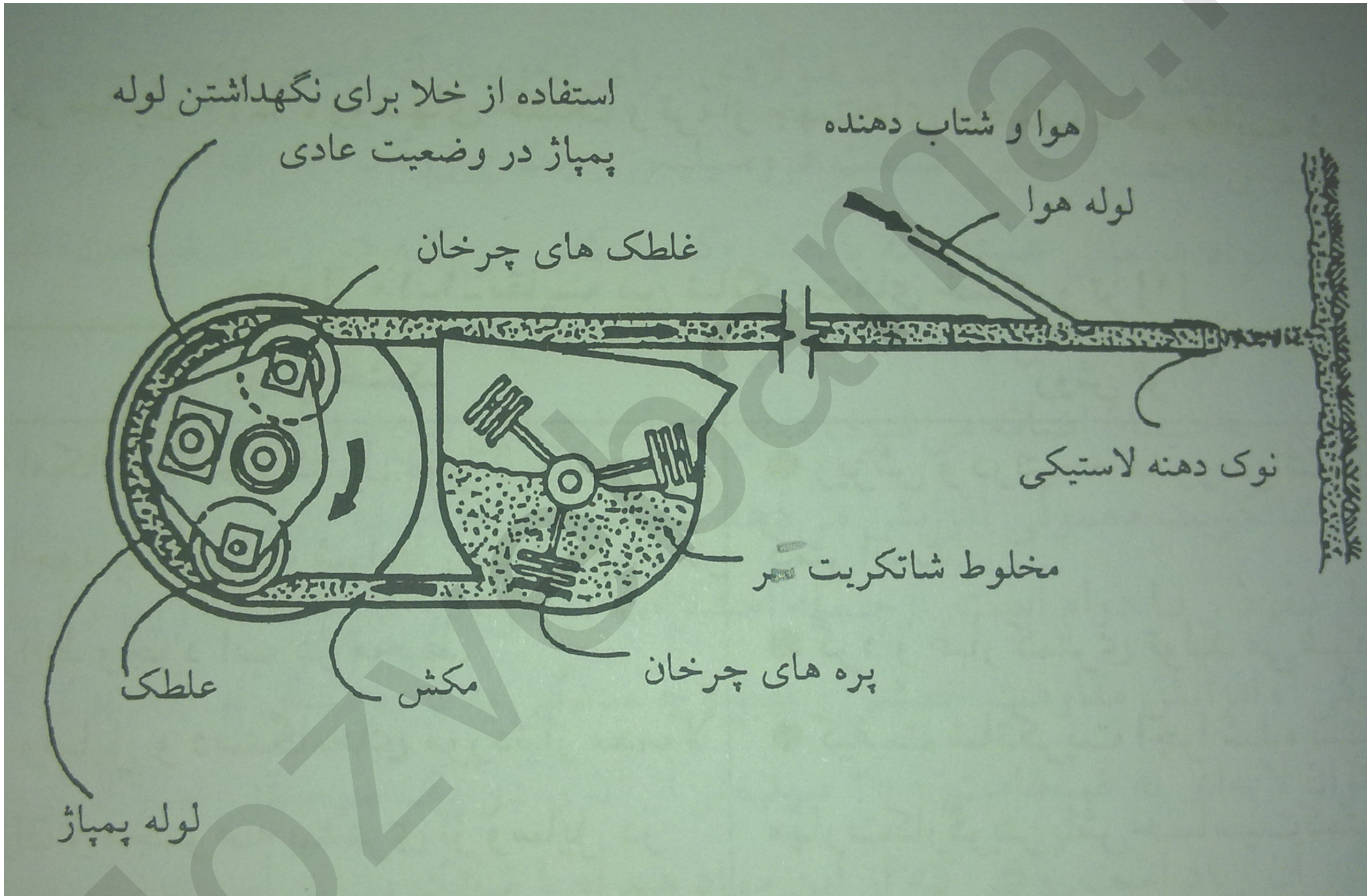

pre-dampened shotcrete mix
compressed air
water injection
compressed air

اجزای دستگاه شاتکریت خشک (Hoek et al., 1995)[2]

بتنی که ساخته شده به وسیله فشار هوا به سطح مورد نظر پاشیده می شود.

بهتر است زاویه بتن پاش عمود برسطح باشد تا ریخت و پاش کمتری صورت گیرد.

اجرای شاتکریت: روش تر


استفاده از خلا برای نگهداشتن لوله پمپاژ در وضعیت عادی
هوا و شتاب دهنده
لوله هوا
غلطک های چرخان
نوک دهنه لاستیکی
مخلوط شاتکریت تر
پره های چرخان
مکش
غلطک
لوله پمپاژ

شکل ۱۰-۳- دستگاه تهیه شاتکریت تر [۱۰]

مقایسه دو روش:

- در روش خشک دستگاهها کوچک و ارزان هستند.
- روش خشک در فضاهای کوچک قابل استفاده است.
- روش تر برای پروژه های بزرگ بهتر است.
- در روش خشک کیفیت کار بستکی به مهارت اپراتور دارد .
- در روش خشک از شیلنگ های بلند می توان استفاده نمود.
- در روش تر کنترل نسبت آب به سیمان راحت تر است.
- در روش تر پمپاژ مخلوط های سفت با نسبت آب به سیمان مشکل است.
- در روش خشک امکان کنترل آب در مواجه با شرایط متفاوت زمین قابل انجام است.
- در روش تر ریزش مصالح (بازگشت مصالح) کمتر است.
- در روش تر گرد و غبار کمتری تولید می شود.
- در روش تر کیفیت شاتکریت اجرا شده بهتر است.
- در روش تر هزینه نگهداری کمتر است.
- در روش تر سرعت بالاتر است.
- در روش تر به دلیل شباهت با بتن و تجربه کافی در این زمینه کنترل کیفی راحت تر است.

انواع شاتکریت:

- شاتکریت میکروسیلیس:
- دوده سیلیسی یا میکروسیلیس که یک پوزولان ریز است به میزان ۸ تا ۱۳ درصد وزنی به سیمان اضافه شده و باعث افزایش ۲ تا ۳ برابری مقاومت شاتکریت می گردد. همچنین باعث افزایش نفوذناپذیری، دوام، کاهش برگشت مصالح و افزایش چسبندگی شاتکریت به توده سنگ می گردد.

- شاتکریت با الیاف فولادی:

به شاتکریت الیاف کوچک فولادی اضافه شده و باعث افزایش شکل پذیری آن می گردد که نقش زیادی در پایداری پوشش دارد.

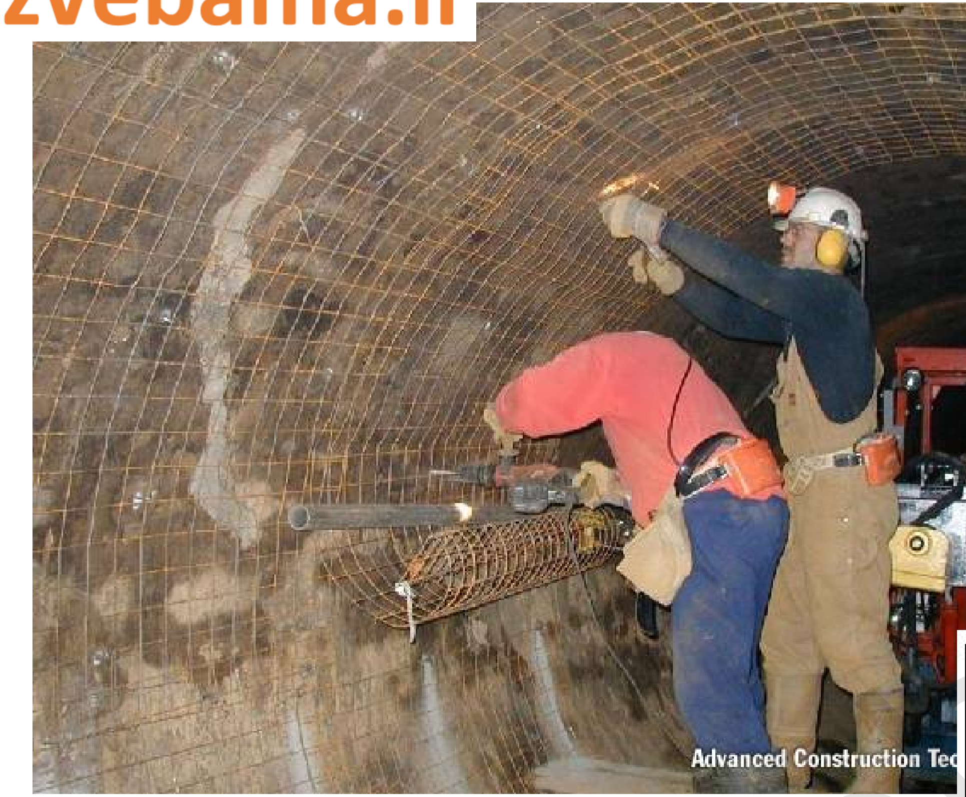
- شاتکریت با توری فلزی:

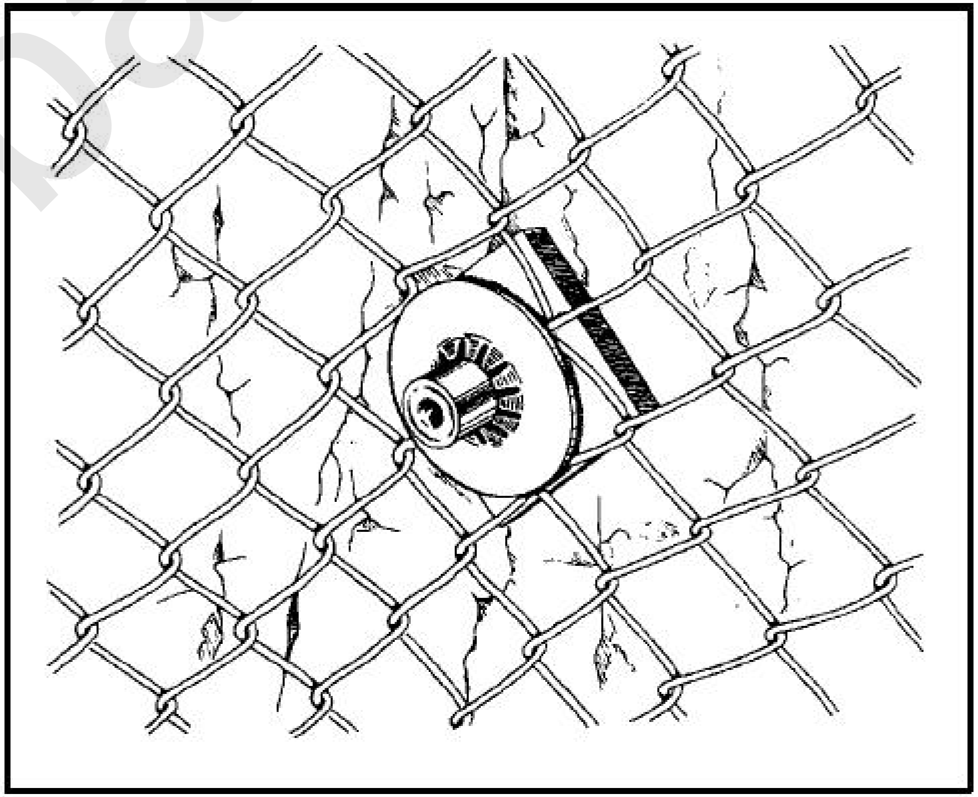
از شبکه های فولادی برای مسلح کردن شاتکریت استفاده می گردد. شبکه ها در دو حالت بافته شده و جوش داده شده موجود هستند که نوع جوش داده شده آن به لحاظ نفوذ شاتکریت به لابه لای آن راحت تر است.

اندازه شبکه ها نباید به اندازه ای باشد که سنگ دانه ها از آنها عبور نکنند.

معمولا اندازه شبکه ها ۱۰cm*۱۰ می باشد.

شبکه به وسیله مهارها به دیواره متصل می گردند

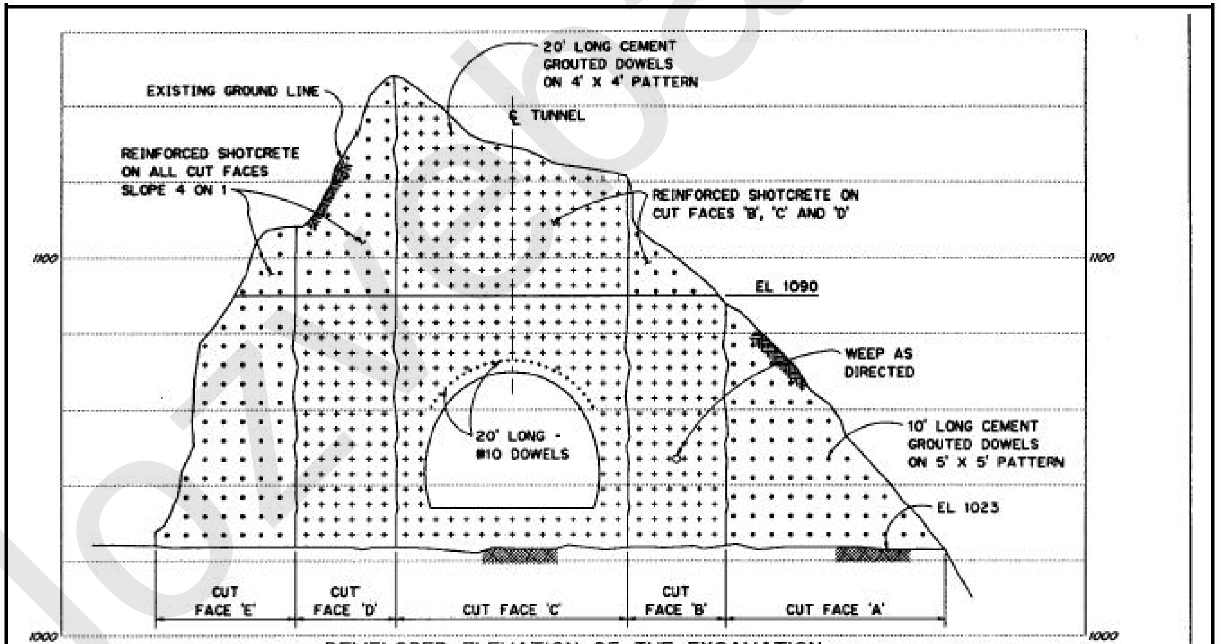

Advanced Construction Tec



معمولا شاتکریت به صورت ترکیبی با سایر نگهدارنده ها استفاده می شود. استفاده تنها از آن توصیه نمی شود.

موارد کاربرد شاتکریت

- نگهداری زمین (موقت، دائمی، تعمیر و یا مکمل) به عنوان سازه نگهدارنده وزن و نیروهای وارده از طرف خاک و سنگ اطراف بر آن
- حفاظت از سطوح آسیب پذیر در مقابل هوازدگی: بعضی از سنک ها و خاک ها به محض قرار گرفتن دربرابر آب و هوا دچار کاهش مقاومت می شوند.
- آب بندی و کنترل نشت در موارد نشت کم آب
- کاربرد های ویژه مانند پرتال های تونل و غیره


20' LONG CEMENT
GROUTED DOWELS
ON 4' X 4' PATTERN
EXISTING GROUND LINE
℄ TUNNEL
REINFORCED SHOTCRETE
ON ALL CUT FACES
SLOPE 4 ON 1
REINFORCED SHOTCRETE ON
CUT FACES 'B', 'C' AND 'D'
1100
1100
EL 1090
WEEP AS
DIRECTED
20' LONG -
#10 DOWELS
10' LONG CEMENT
GROUTED DOWELS
ON 5' X 5' PATTERN
EL 1023
CUT
FACE 'E'
CUT
FACE 'D'
CUT FACE 'C'
CUT
FACE 'B'
CUT FACE 'A'
1000
1000

DEVELOPED ELEVATION OF THE EXCAVATION

اجرای شاتکریت با ماشین (رباتیک)

Expect the Best
SPEC MIX
U.S. PATENT 4,956,821
630-557-8252

بعد از اتمام بتن پاشی، شبکه فولادی کاملا داخل بتن مدفون می گردد. این کار از خوردگی فولاد جلوگیری می نماید.

معمولا پوشش شاتکریت تحت نیروی محوری فشاری و لنگر خمشی است.

عملکرد شاتکریت

- در اثر فشار ناشی از پاشیدن باعث چسبیدن و یکپارچه شدن قطعات به هم می شود.
- با پرکردن شکافها، درزه ها و گوشه ها باعث کم شدن و از بین رفتن تمرکز تنش در نقاط تیز گوشه می گردد.
- با ایجاد چسبندگی و یکپارچه نمودن سنگ های ضعیف و بالقوه ناپایدار به سنگ های قوی و پایدار می چسبد.
- به صورت یک پوسته نقش سازه ای داشته و در برابر نیروهای وارده مقاومت می نماید.
- از نشت آبهای جاری در لابه های سنگ ها و شسته شدن مواد ریزدانه در اثر نیروی زه آب جلوگیری می نماید.

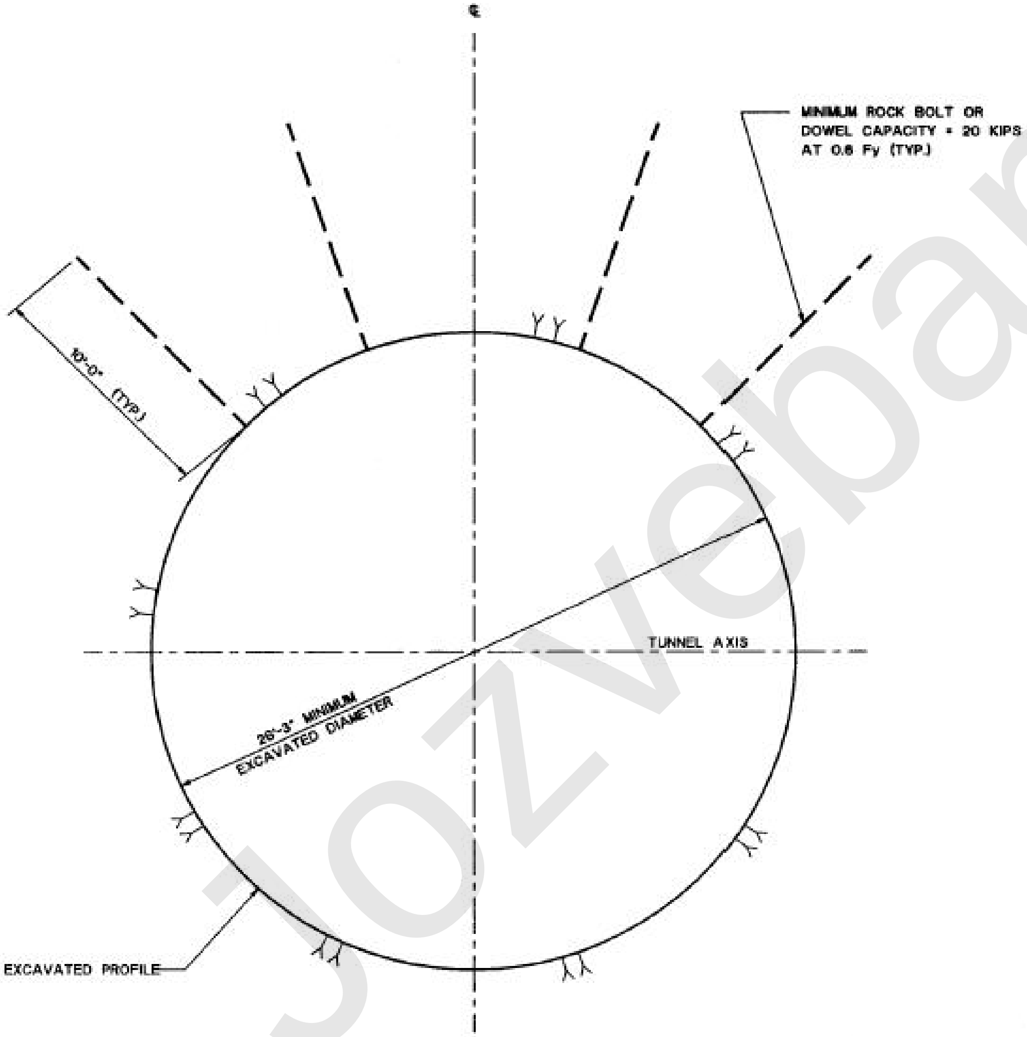
نمونه گیری از شاتکریت در حین اجرای آن

برای نمونه گیری از شاتکریت و تعیین مقاومت آن، قبل از بتن پاشی، قالب فلزی نمونه را به کمک مفتول های سیمی بر روی شبکه آرماتور بسته و سپس بتن پاشی صورت می گیرد. قالب پر از بتن را از جای خود برداشته و بعد از عمل آوری تحت آزمایش قرار می دهند.

موارد مندرج در آیین نامه بتن در باره شاتکریت

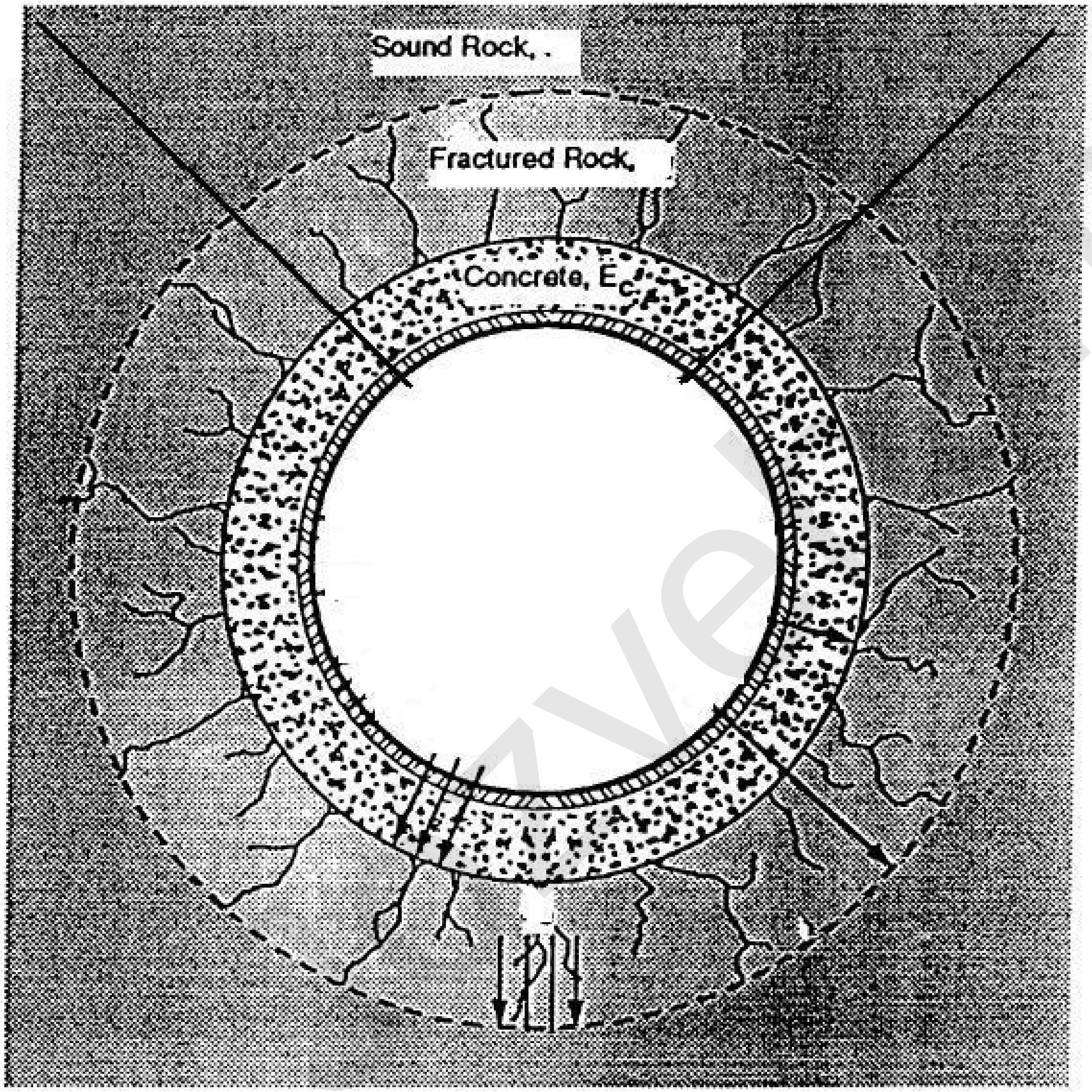
- نسبت آب به سیمان بین ۰/۳۵ الی ۰/۵
- حداکثر اندازه سنگ دانه ۲۰mm
- افزودن مواد ریزدانه مانند پود سنگ، پوزولانهای دوده سیلیسی و سرباره موجب کاهش کمانش و برگشت سنگدانه ها می گردد.
- کمانش و برگشت سنگدانه ها باعث تغییر ترکیب اولیه می گردد.
- به دلیل برگشت سنگ دانه ها باید مراقب ایمنی بود.

۳– پیچ سنگ و میل مهارها (Rock Bolts and Dowels)


℄
MINIMUM ROCK BOLT OR
DOWEL CAPACITY = 20 KIPS
AT 0.6 Fy (TYP.)
10'-0" (TYP.)
TUNNEL AXIS
26'-3" MINIMUM
EXCAVATED DIAMETER
EXCAVATED PROFILE

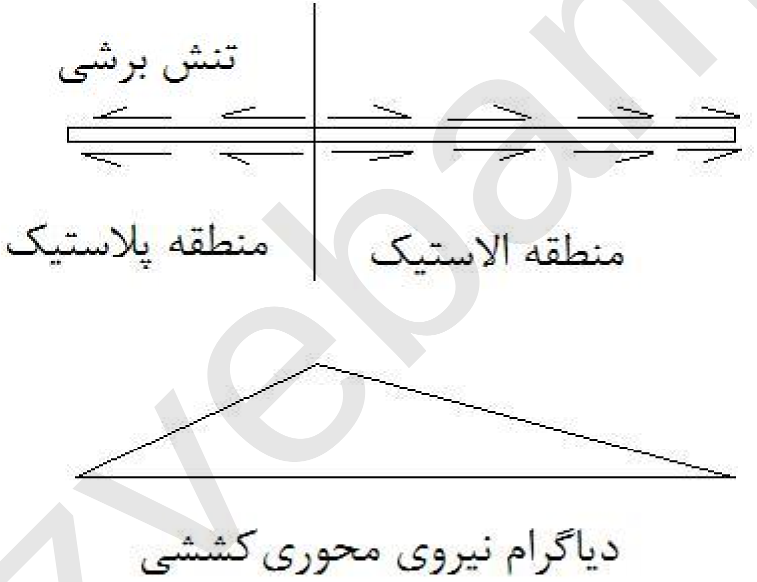
پیچ سنگ (سنگ دوزها) و مهار ها عملکردی همانند میلگرد در بتن دارند. یعنی همواره در کشش کار می کنند. این المان ها با دوختن مصالح خاک و سنگ به یکدیگر باعث یکپارچه شدن آنها می شوند.

عملکرد پیچ سنگ و مهارها


Sound Rock, .
Fractured Rock,
Concrete, E_c

پیچ سنگ و مهارها با
دوختن بخش خرد شده
به بخش سالم باعث
پایداری تونل می شود.

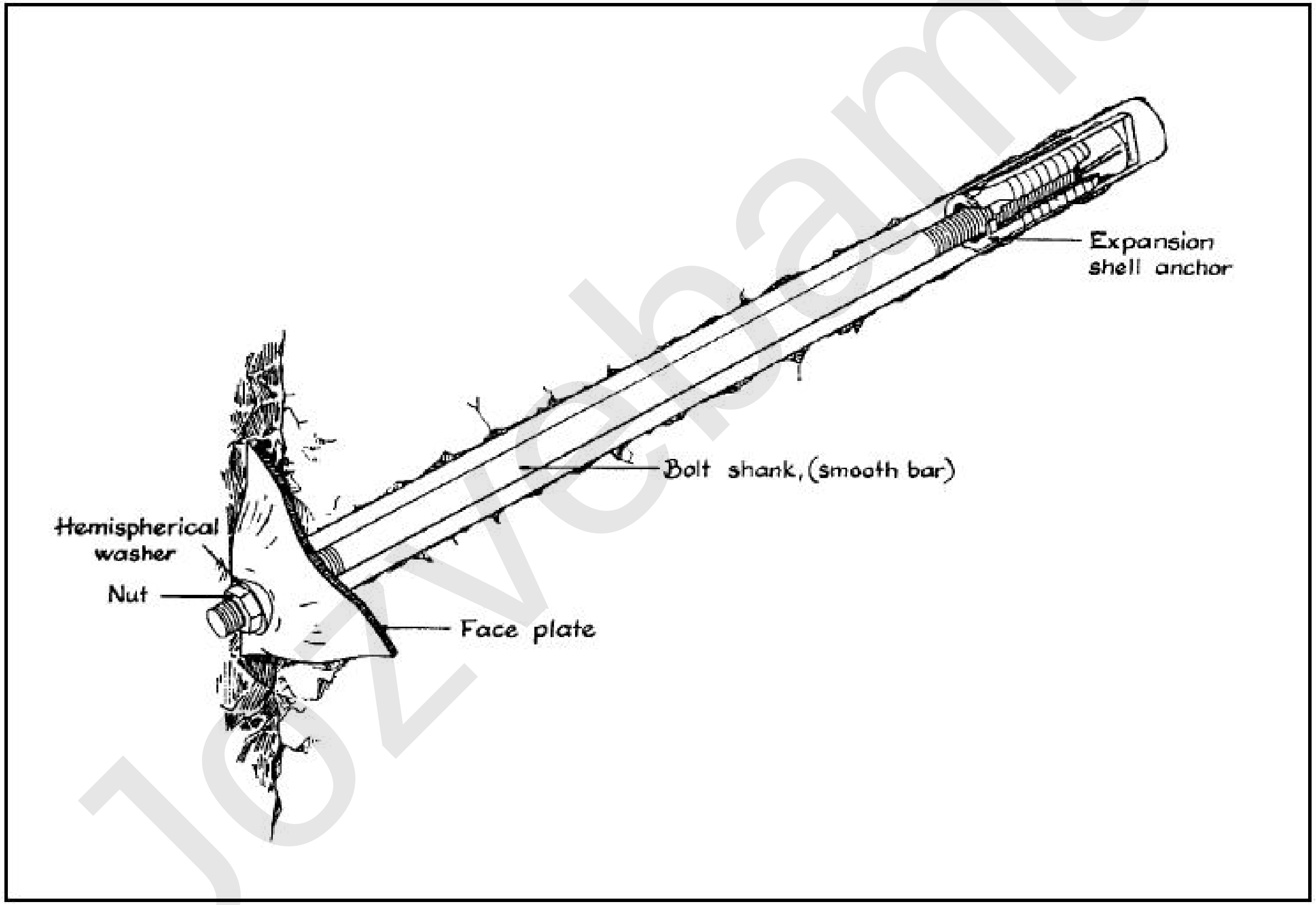
پیچ سنگ ها معمولا به صورت نقطه ای در سنگ و خاک مهار می شوند ولی مهارها در طول خود درگیر هستند.


تنش برشی
منطقه پلاستیک
منطقه الاستیک
دیاگرام نیروی محوری کششی

عملکرد مهار در تونل

نصب پیچ سنگ:

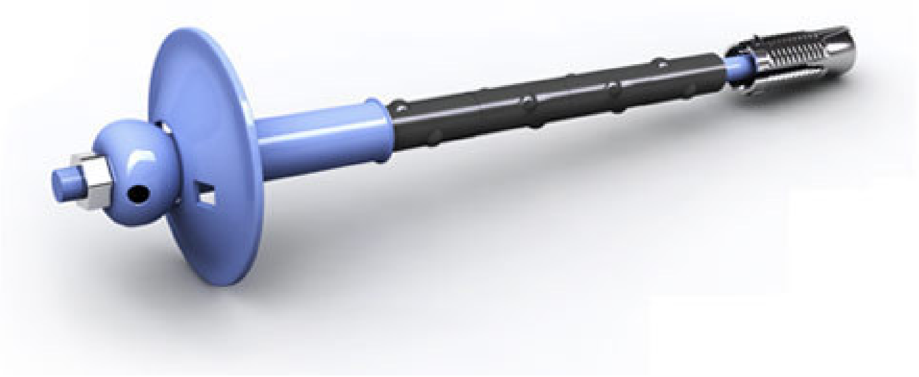
ابتدا محل سنگ دوز به کمک وسیله ای به نام چال زن حفاری شده سپس سنگ دوز در محل خود قرار گرفته و بعد از نصب یک صفحه در سر آن با چرخاندن آن انتهایش باز شده و در محل خود به صورت مکانیکی سفت و محکم می گردد.


Expansion shell anchor
Bolt shank, (smooth bar)
Hemispherical washer
Nut
Face plate

پیچ سنگ را می توان به صورت پیش تنیده و یا پس تنیده نیز اجرا نمود.

چال زنی و نصب پیچ سنگ

پیچ سنگ



انواع مهار ها (Dowels)

۱– مهارهای تزریقی با سیمان پرتلند

۲– مهارهای تزریقی با رزین

۳– مهارهای شکاف دار

۴– مهارهای منبسط شونده

۵– مهارهای کششی (پس تنیده)

۶– مهارهای چوبی

۷– مهارهای چند بار مصرف

۸– مهار مشبک

۹– مهار کششی (پس تنیده)

مهارها به کمک دو عامل چسبندگی و اصطکاک به مصالح خاک و سنگ اطراف متصل می شوند.

مراحل نصب مهارهای تزریقی:

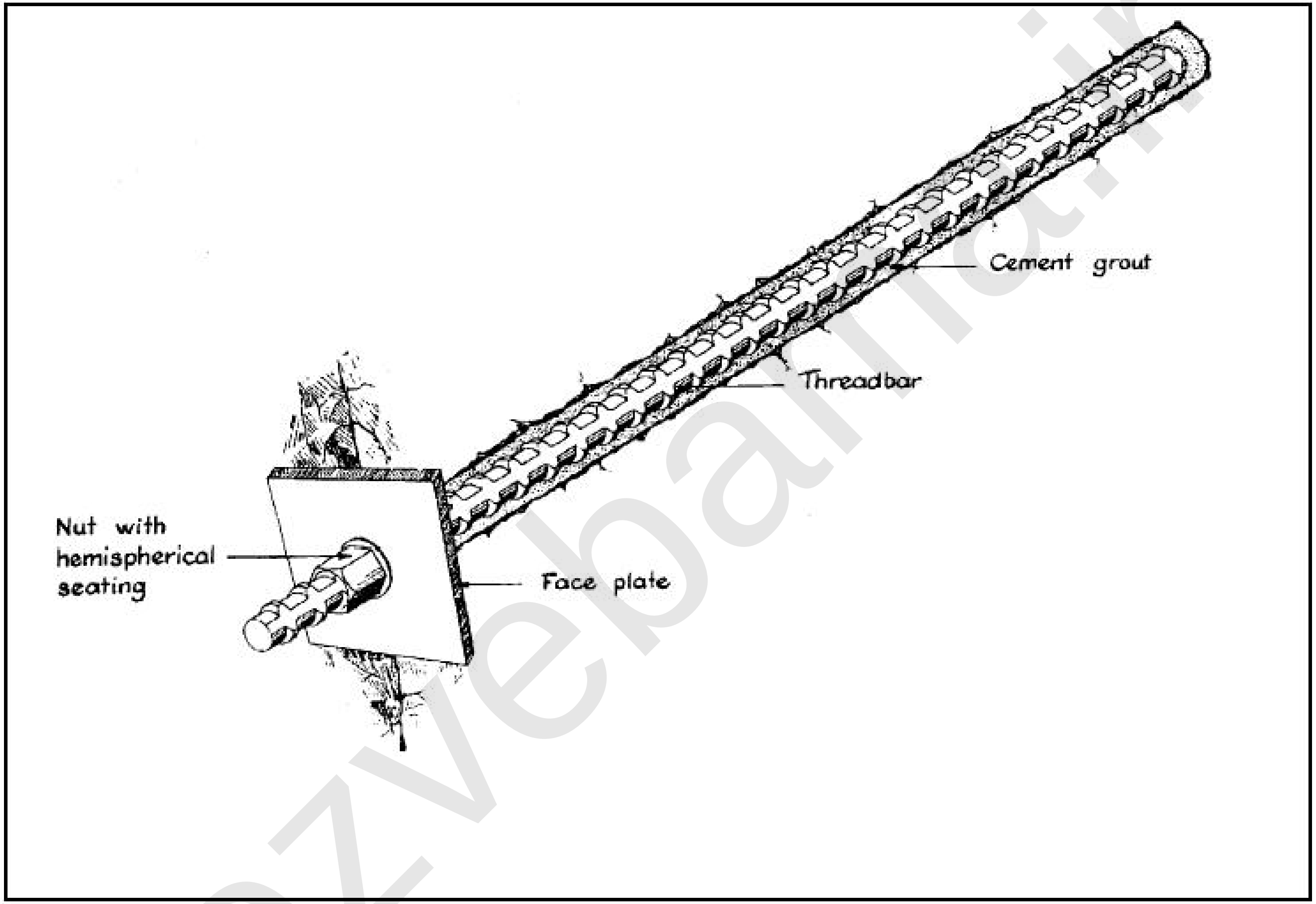
۱– حفر چال

۲– تعبیه مهار

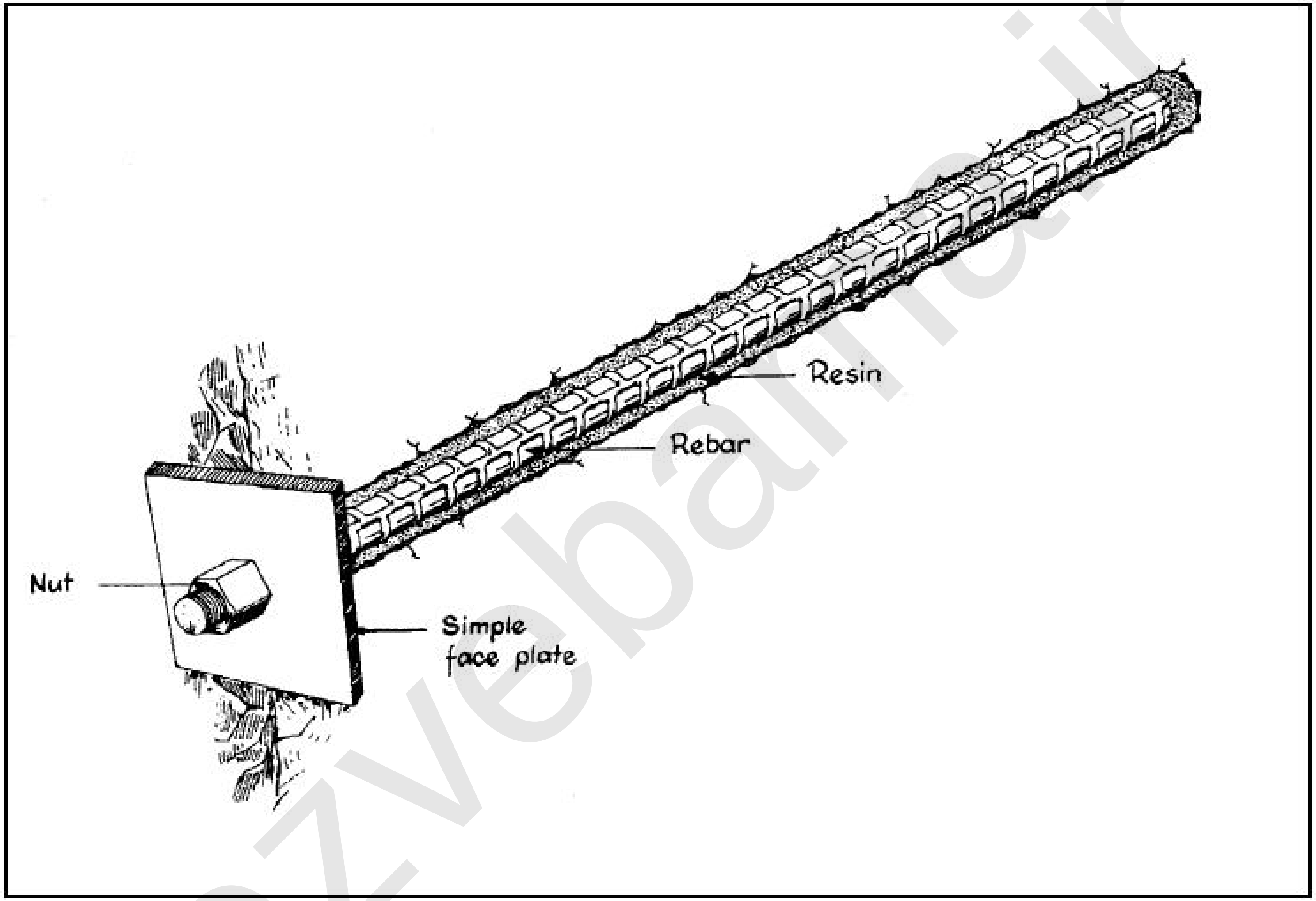
۳– تزریق دوغاب یا رزین به کمک یک شیلنگ باریک ازانتهای چال

۴– نصب صفحه سر مهار

رزین و دوغاب باعث عایق شدن میلگرد و
جلوگیری از زنگ زدگی آن می شود.

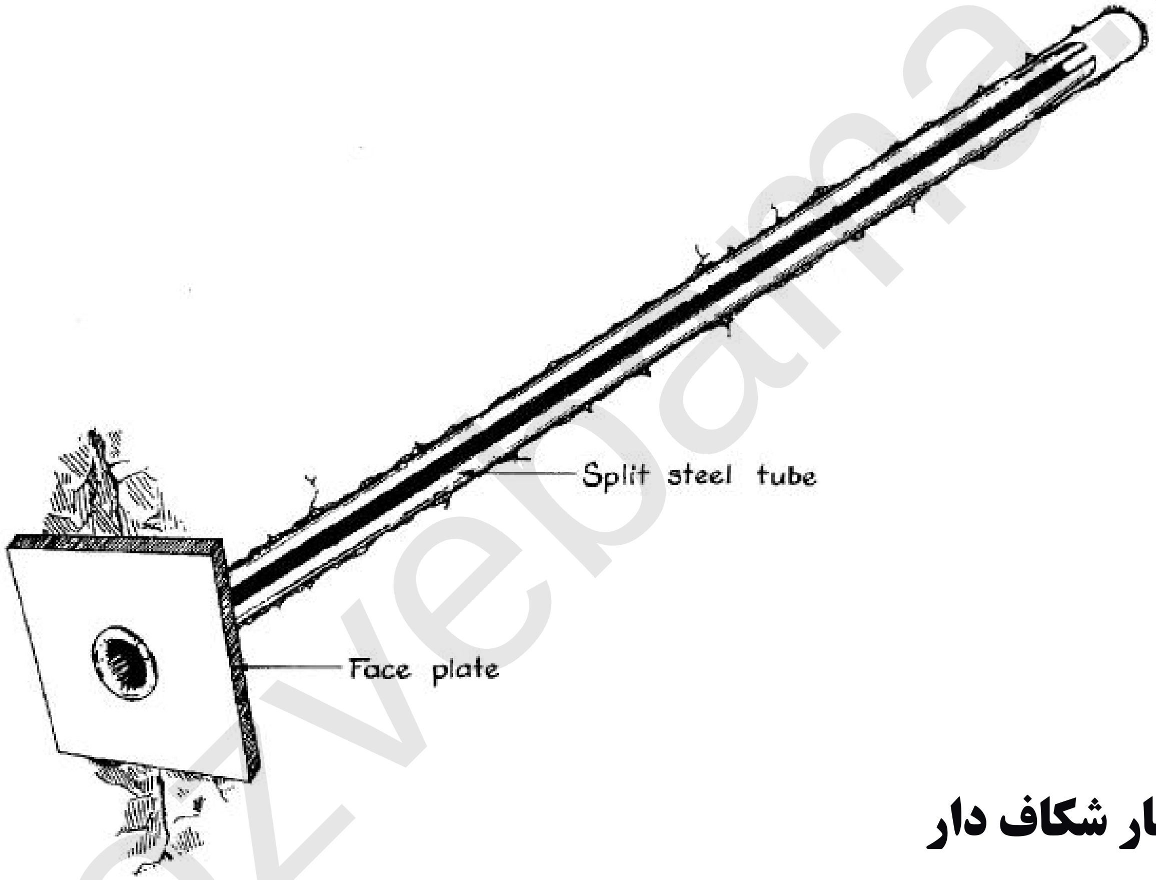

Cement grout
Threadbar
Nut with
hemispherical
seating
Face plate

مهار تزریقی با دوغاب سیمان با عملکرد چسبندگی


Resin
Rebar
Nut
Simple
face plate

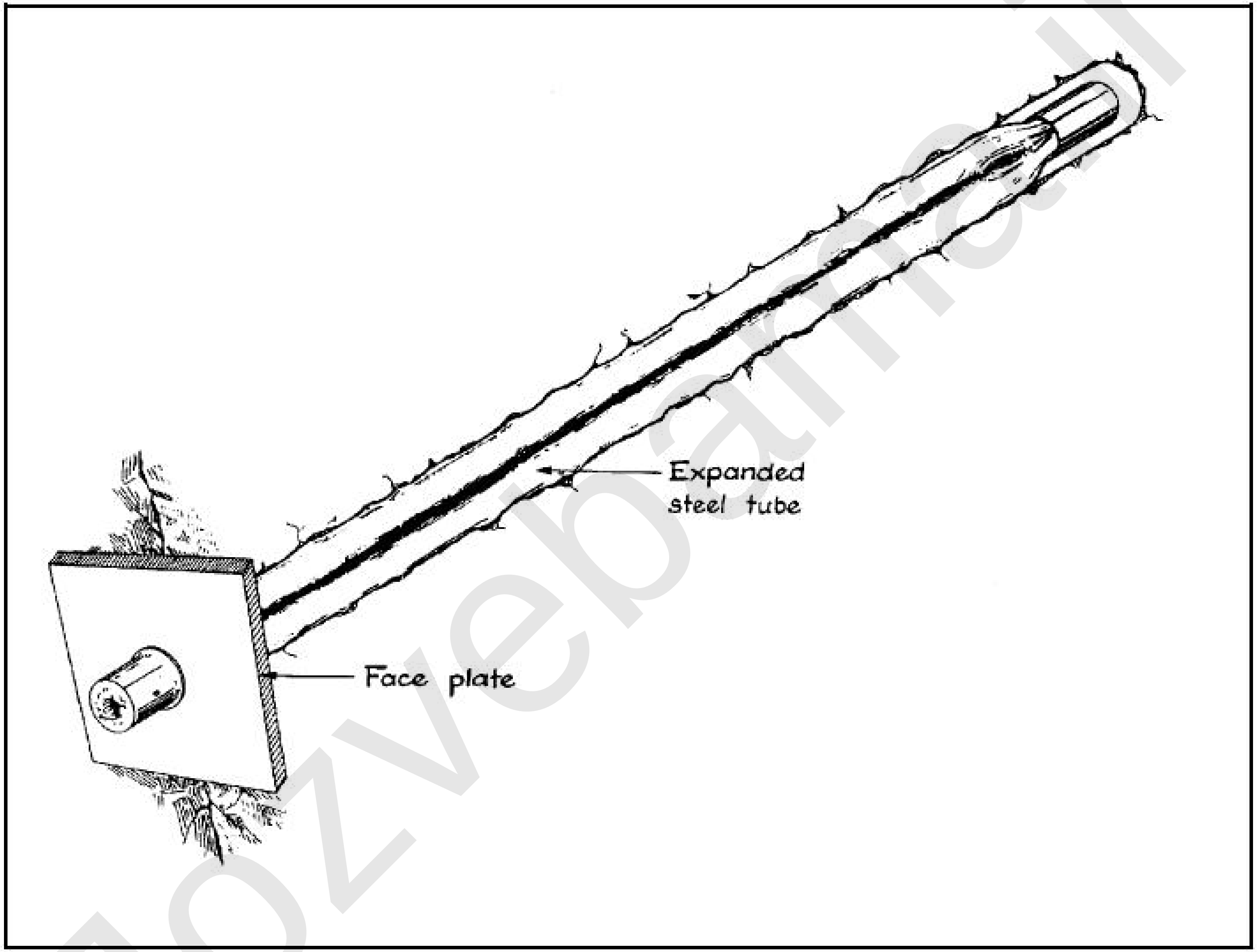
مهار تزریقی با رزین با عملکرد چسبندگی

مهارهای اصطکاکی


Split steel tube
Face plate

مهار شکاف دار

اجرای سریعی دارد. خوردگی از معایب اصلی این مهار است و قطر چال خیلی مهم است. برای افزایش باربری می توان اطراف آن را با دوغاب پر نمود.


Expanded
steel tube
Face plate

مهار منبسط شونده

مزایای مهار منبسط شونده (Swellex)

۱– امکان استفاده از سوراخهای با قطرهای مختلف

۲– قابلیت انطباق با حرکات زمین

۳– عدم حساسیت به لرزشهای ناشی از انفجار

۴– قابلیت نصب سریع و آسان

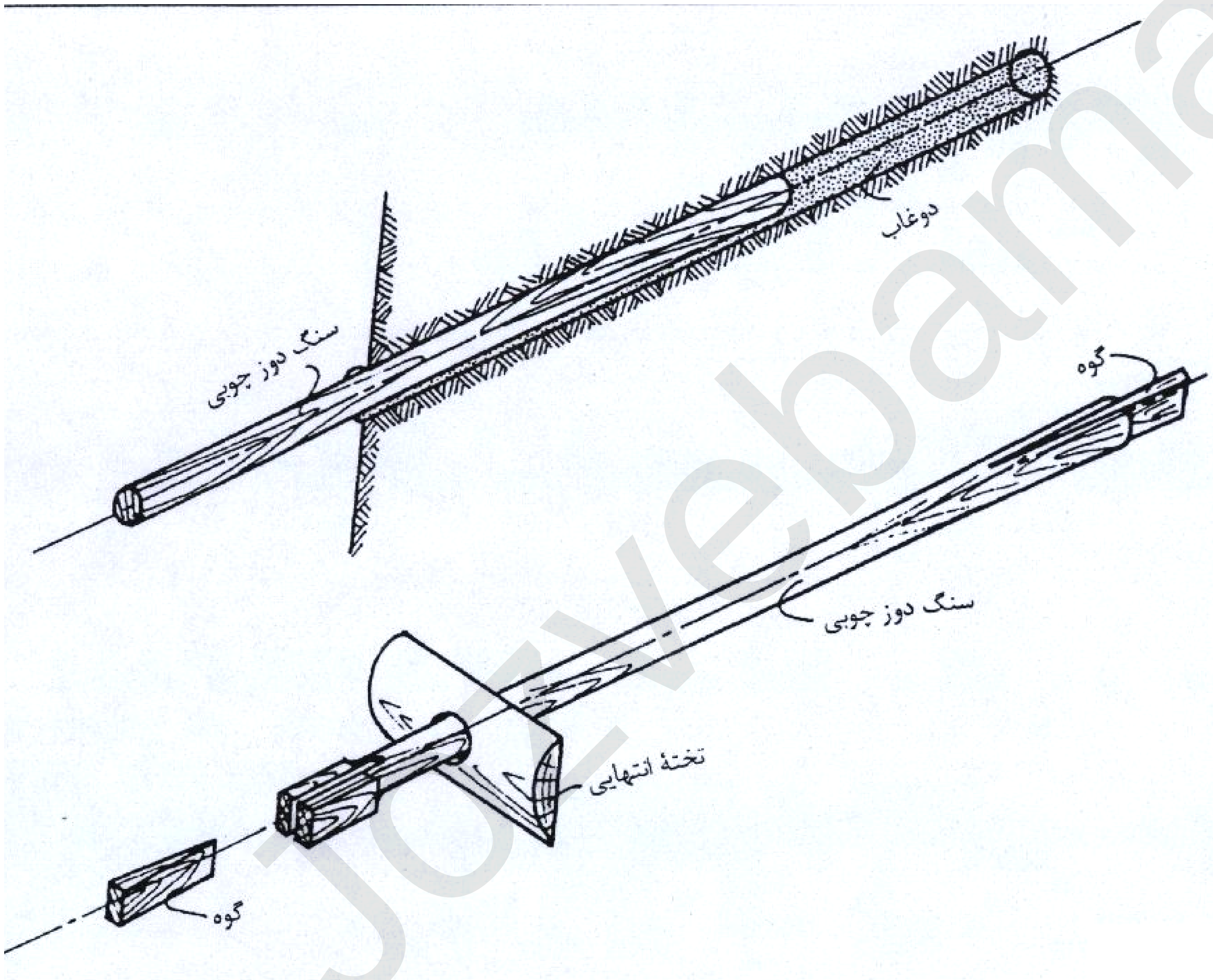
۵– ظرفیت بابری بالا (تا ۱۹۰kN)

۶– انواع بسیار زیاد آن (با طولهای مختلف) و امکان استفاده از آنها در نواحی باریک و کوچک

۷– امکان محافظت از آنها در برابر خوردگی

۸– عدم احتیاج به مواد شیمیایی زیان آور

مهارهای چوبی


دوغاب
سنگ دوز چوبی
گوه
سنگ دوز چوبی
تخته انتهایی
گوه

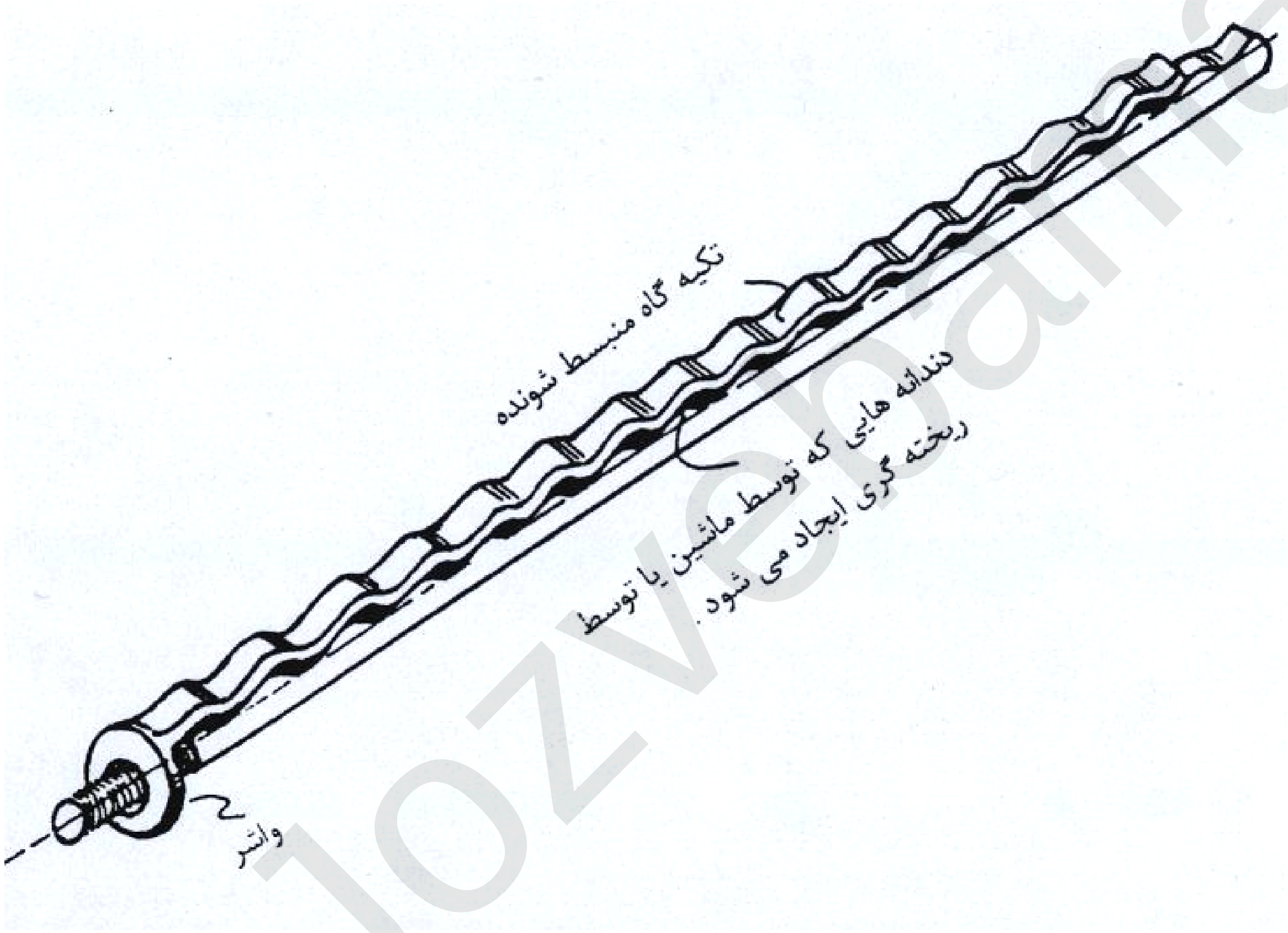
معمولا در معادن و با استفاده موقت مورد استفاده قرار گرفته است.

در اثر جذب آب متورم شده و در چال محکم می گردد.

ارزانی از مزایای آن است.

خیلی ضعیف بوده و برای فشارهای کم قابل استفاده است.

مهارهای چند بار مصرف


تکیه گاه منبسط شونده
دندانه هایی که توسط ماشین یا توسط ریخته گری ایجاد می شود.
واشر

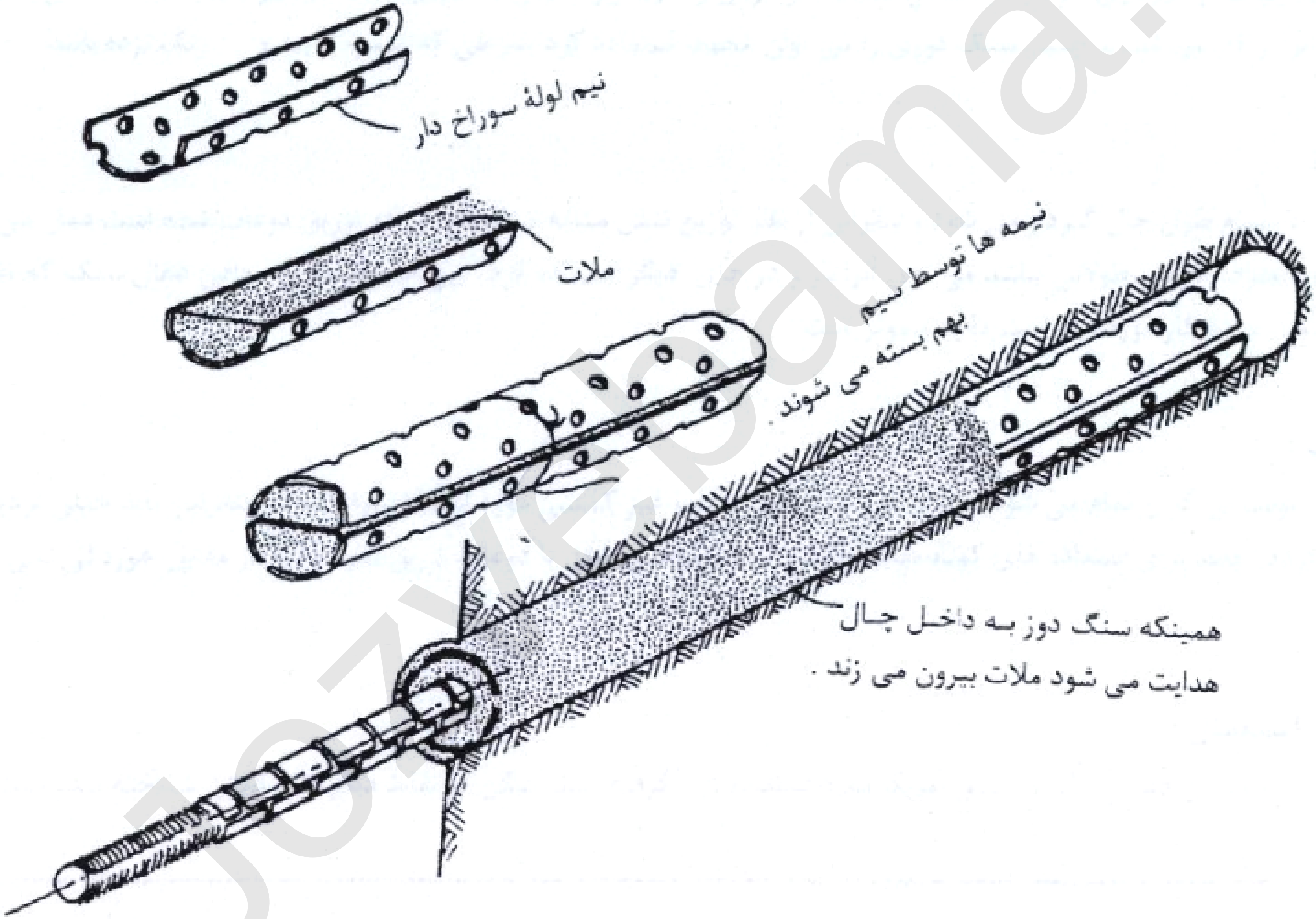
کل مهار در داخل چال قرار گرفته و با سفت کردن مهره، در جای خود محکم می گردد.

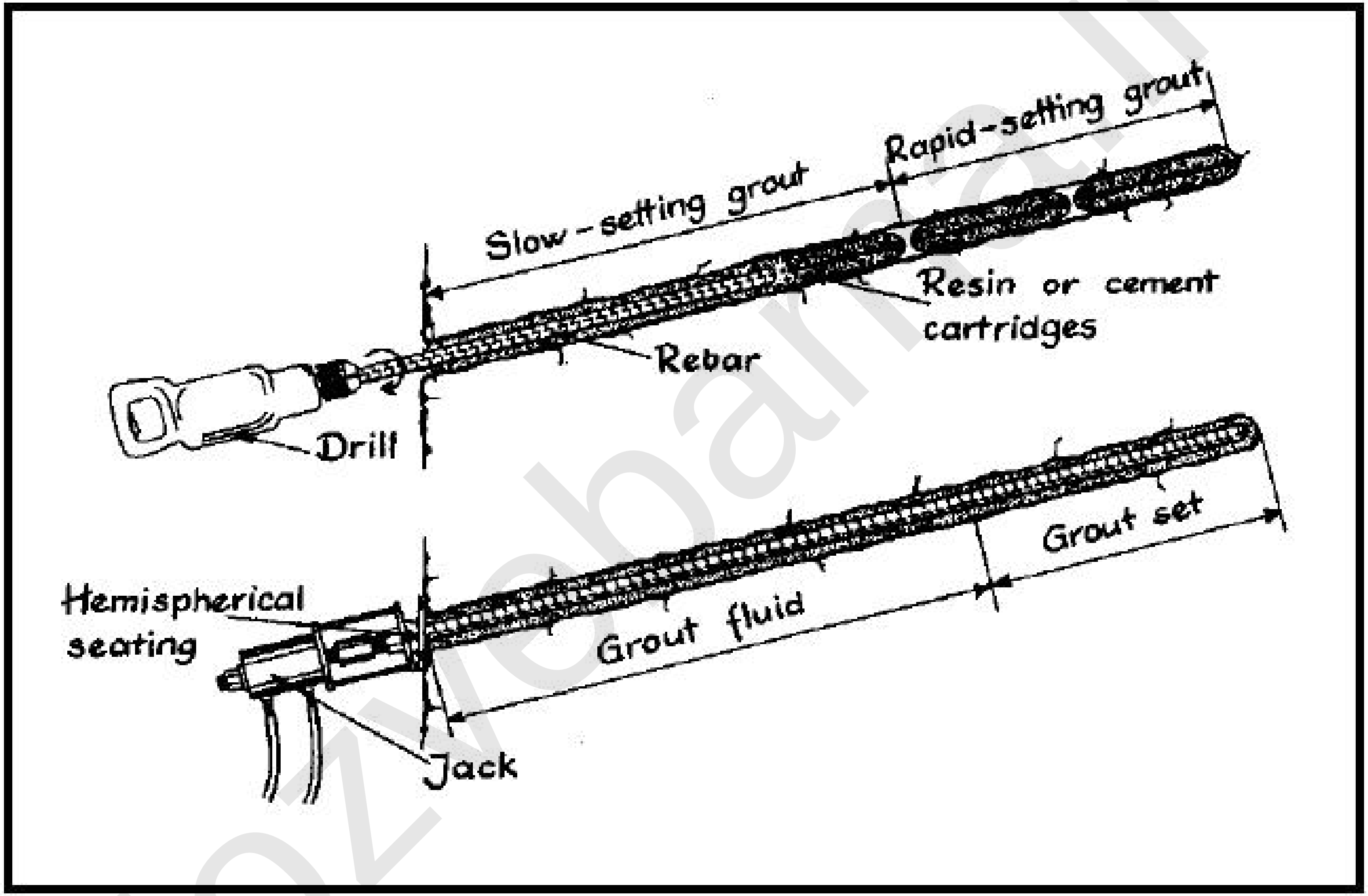
می توان از آن در جای دیگر استفاده کرد.

تولید آن گران تمام می شود.

دچار خوردگی می گردد.

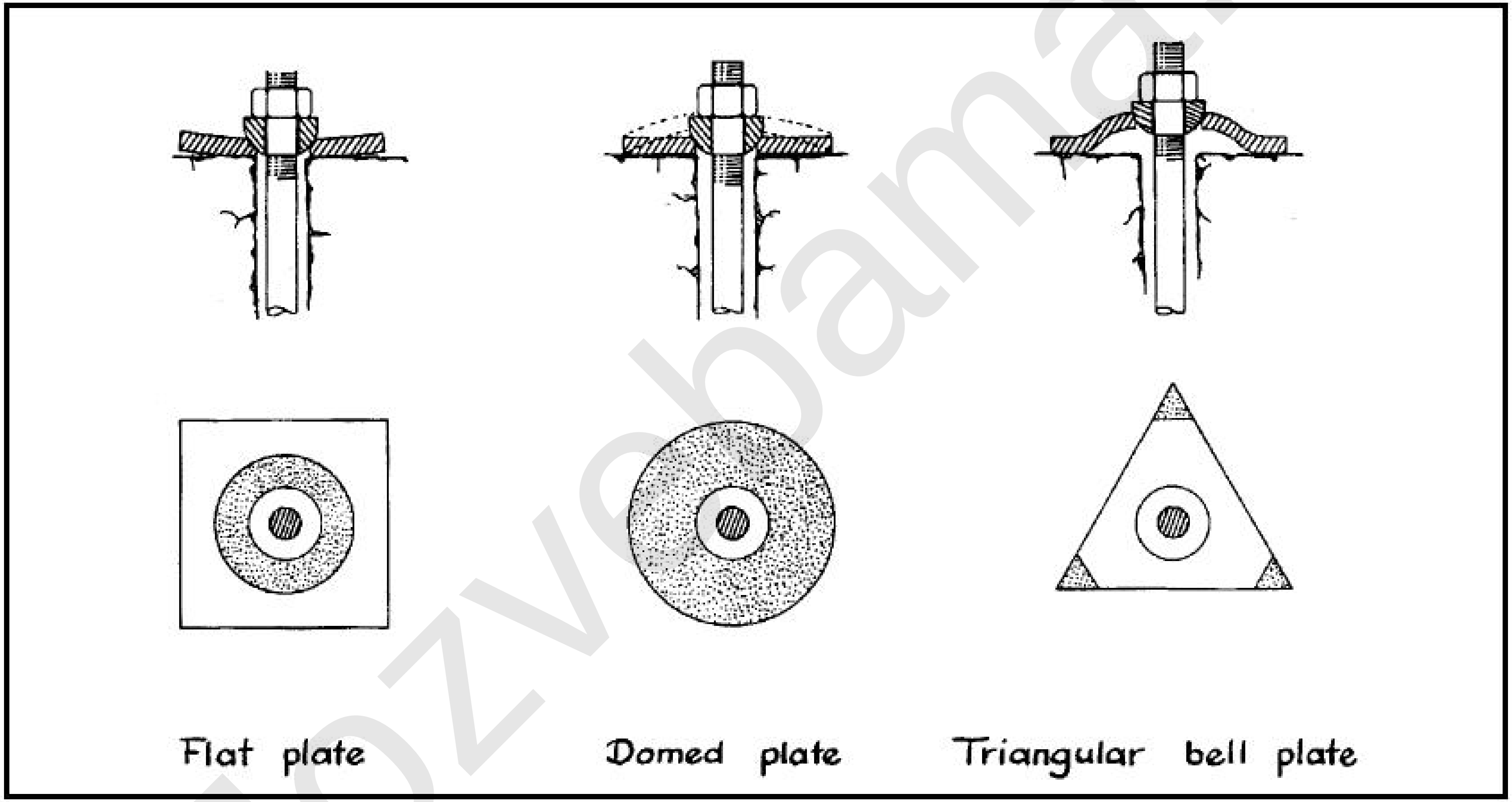
مهار مشبک


نیم لولهٔ سوراخ دار
ملات
نیمه ها توسط سیم بهم بسته می شوند.
همینکه سنگ دوز به داخل چال هدایت می شود ملات بیرون می زند.


Slow-setting grout
Rapid-setting grout
Resin or cement cartridges
Rebar
Drill
Hemispherical seating
Grout fluid
Grout set
Jack

مهار کششی (پس تنیده)

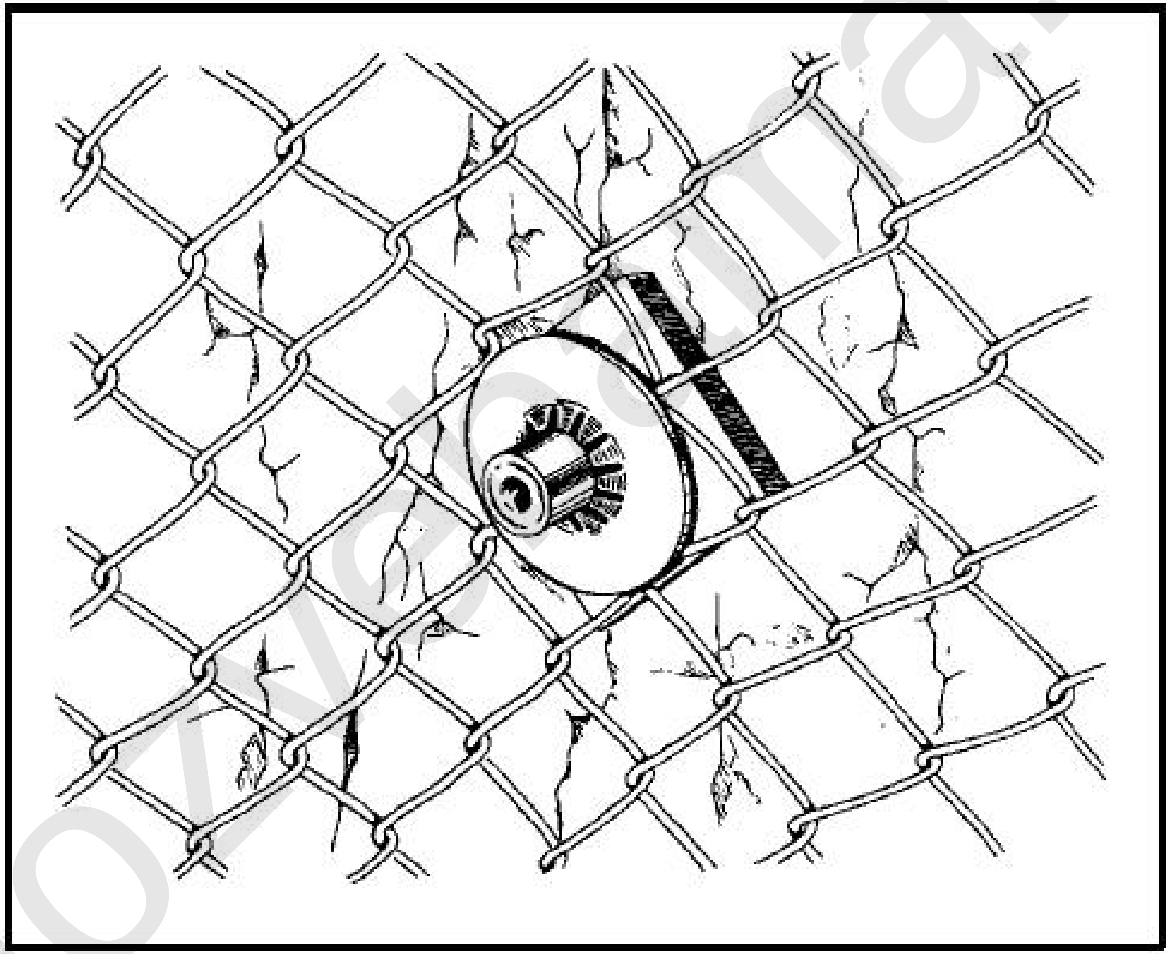
صفحات انتهای پیچ سنگ و مهار ها می تواند دارای اشکال متفاوتی باشد.


Flat plate
Domed plate
Triangular bell plate

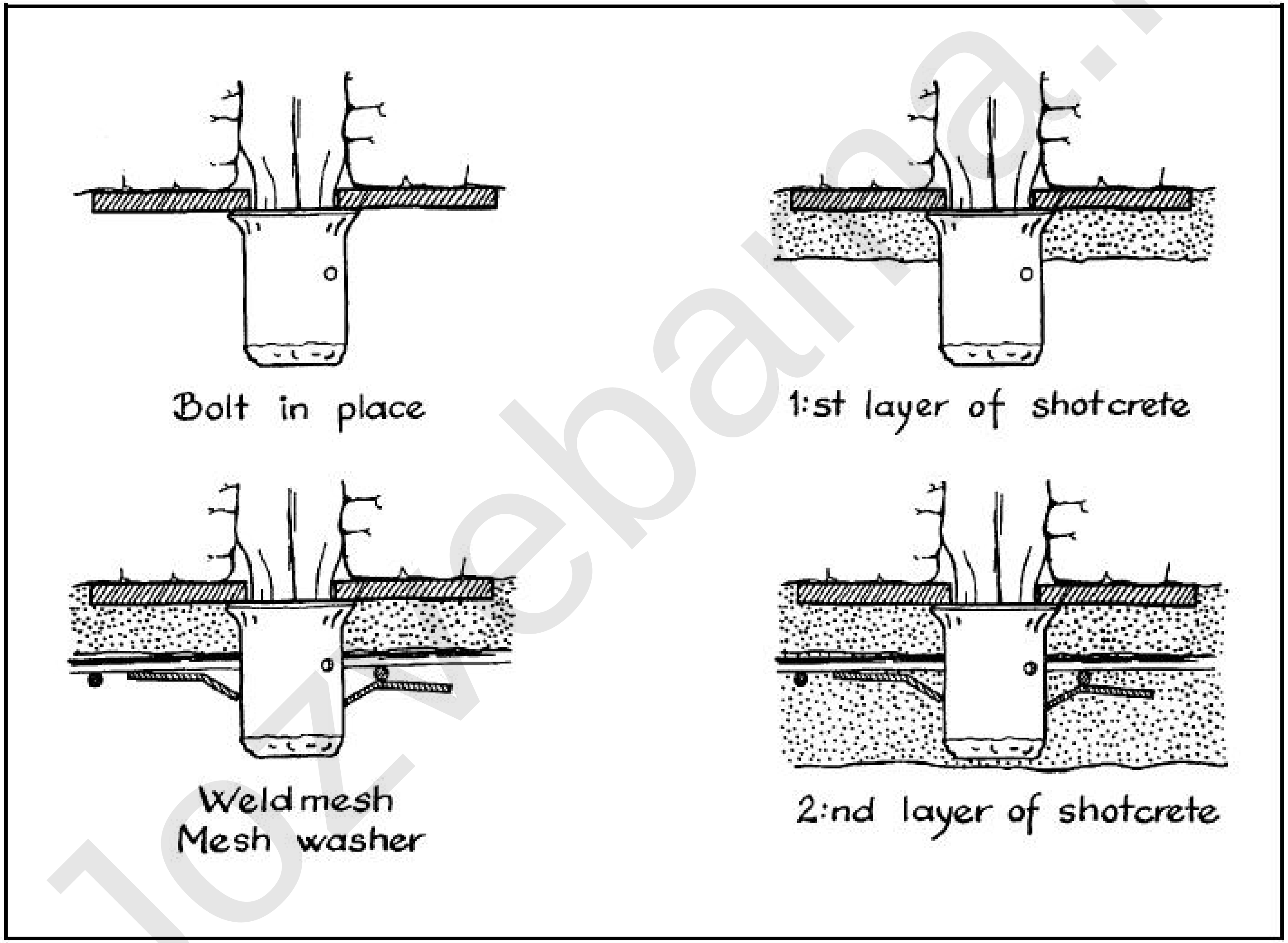
چند نمونه از صفحات انتهای پیچ سنگ

در شرایطی که انتظار تغییرات تنش در مراحل بعدی حفاری وجود دارد می توان به جای پیچ سنگ، میل مهار استفاده نمود. تفاوت اصلی این دو سیستم این است که پیچ سنگها پس از کشیده شدن نیروی فشاری به سنگ اعمال می کنند ولی میل مهارها برای به وجود آمدن نیرو در آنها و موثر واقع شدنشان نیاز به حرکت سنگ (تغییر شکل تونل) دارند

ترکیب شاتکریت و پیچ سنگ



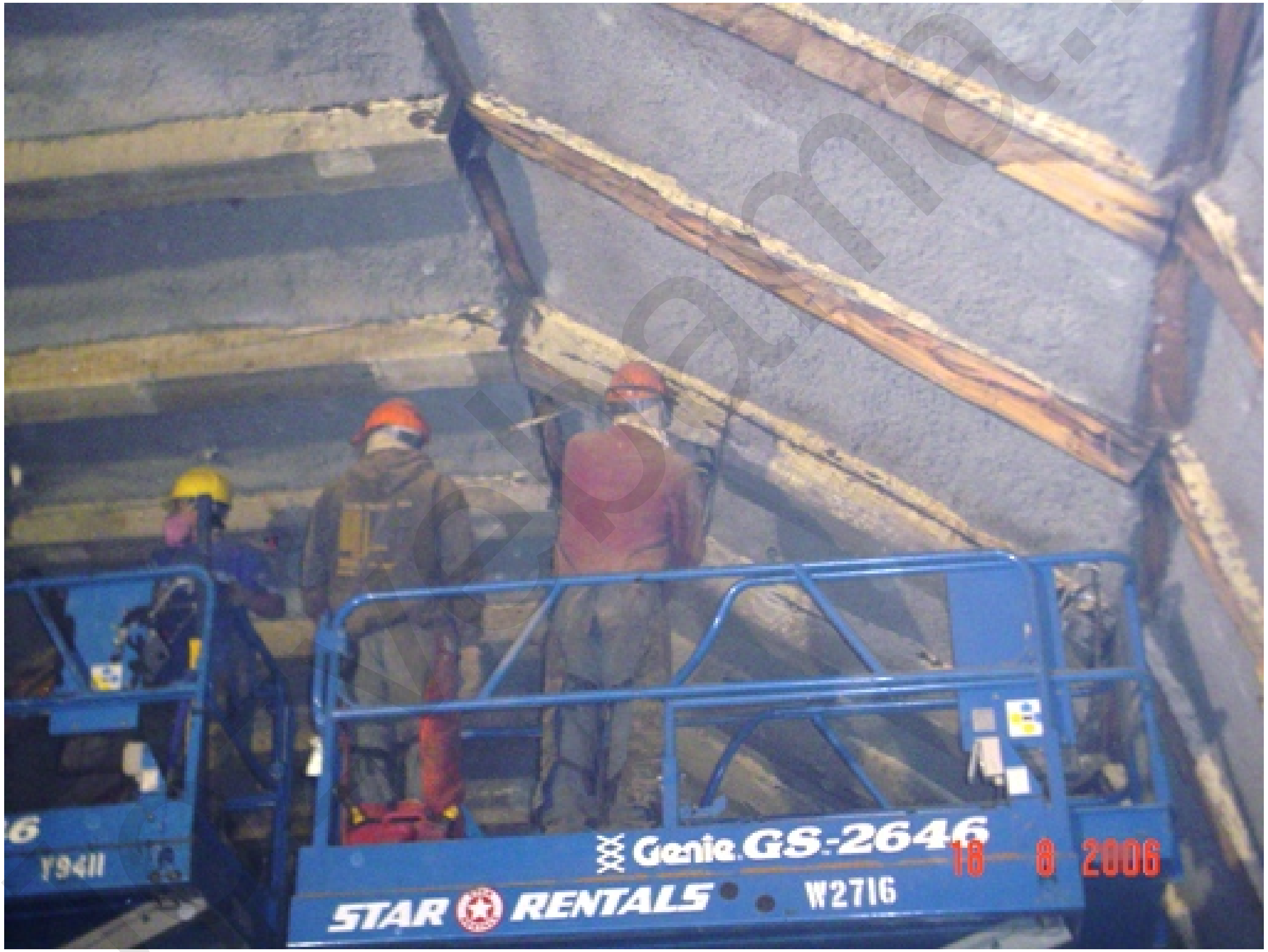
بسته به ضخامت پوشش، شاتکریت در چند لایه اجرا می شود.


Bolt in place
1:st layer of shotcrete
Weld mesh
Mesh washer
2:nd layer of shotcrete

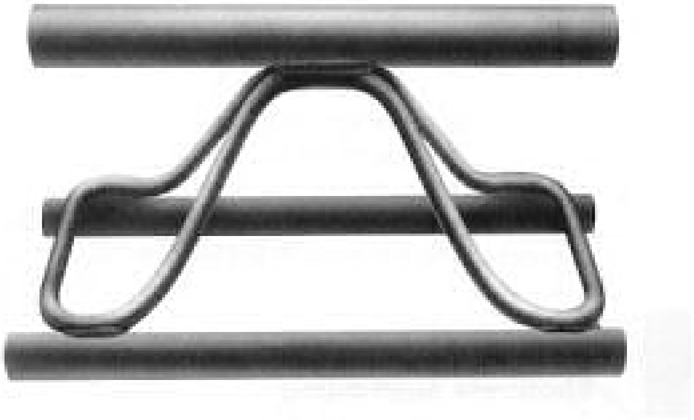
۴– قاب های فولادی (هلالی)

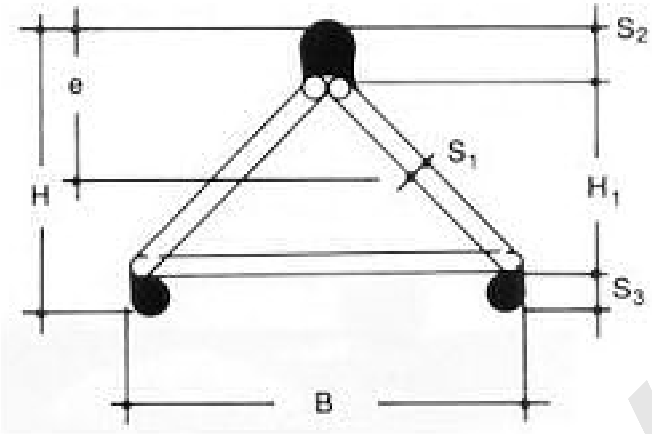
قاب ها برای تثبیت شدن و تامین سختی کافی در جهت طولی به یکدیکر مهار می شوند.

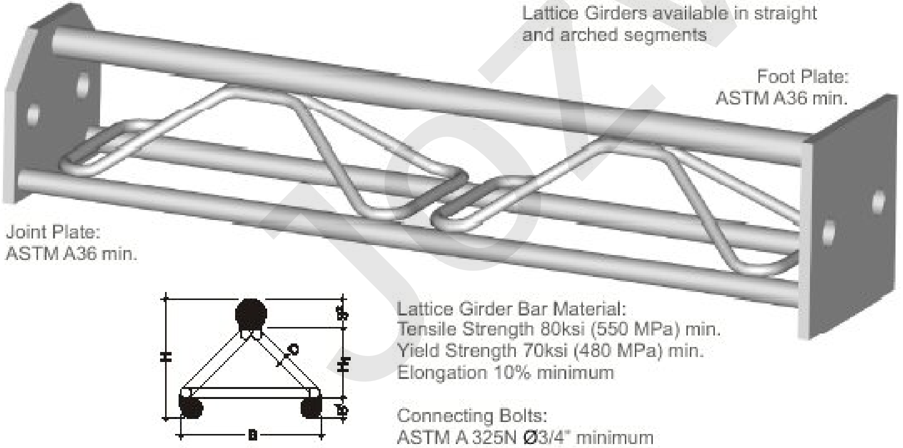
ترکیب قابهای فولادی و شاتکریت


Genie GS-2646
STAR RENTALS
W2716
Y94II
18 8 2006

۵– لاتیس گیردر (Lattice Girder)







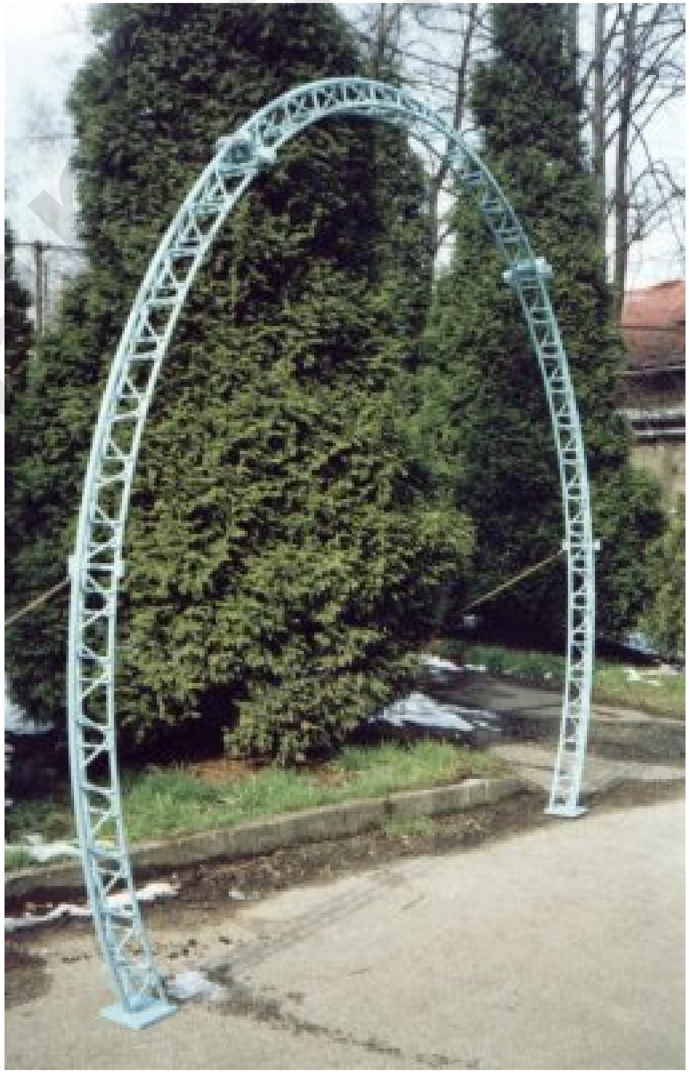
Lattice Girders available in straight and arched segments

Foot Plate:
ASTM A36 min.

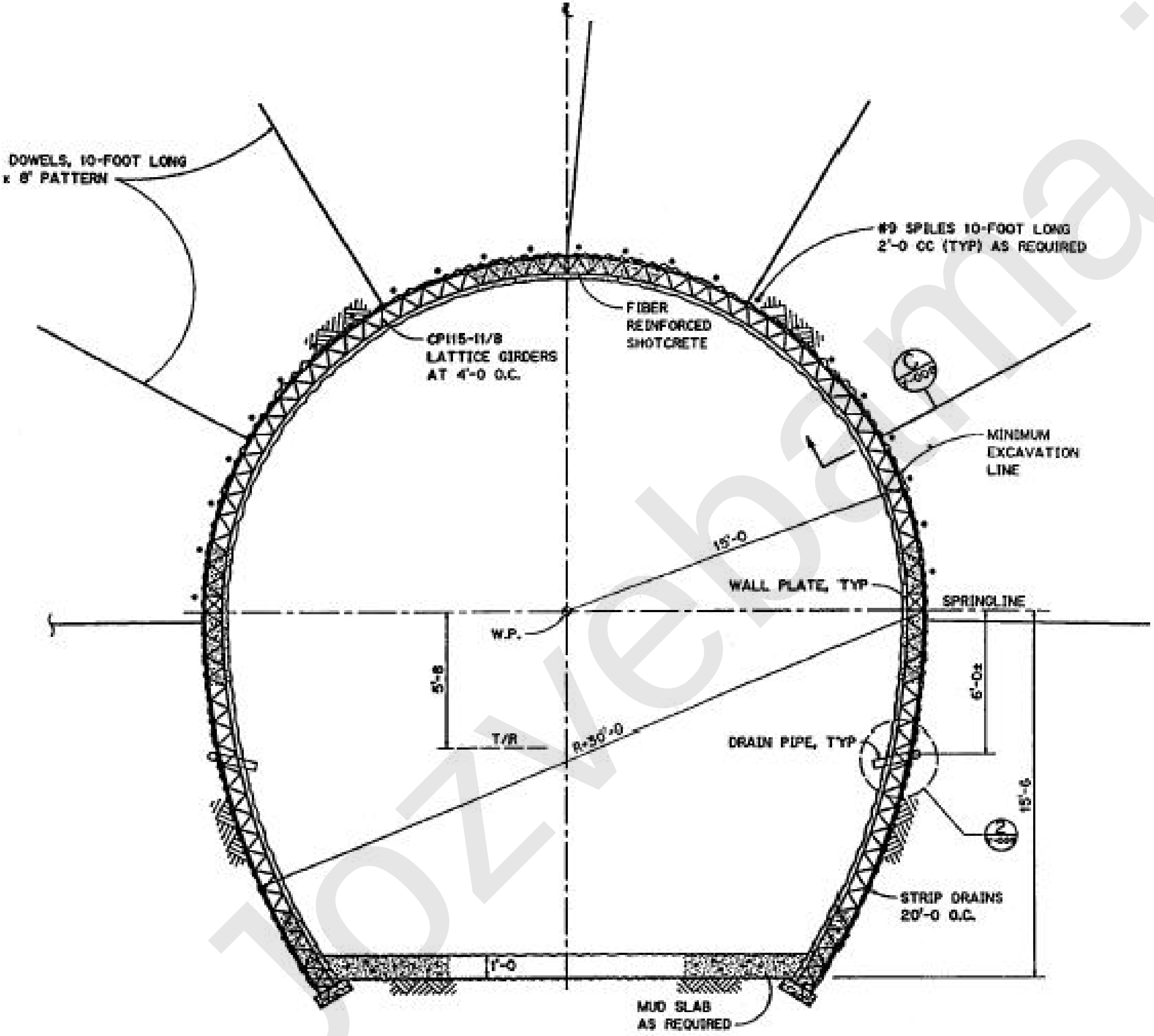
Joint Plate:
ASTM A36 min.

Lattice Girder Bar Material:
Tensile Strength 80ksi (550 MPa) min.
Yield Strength 70ksi (480 MPa) min.
Elongation 10% minimum

Connecting Bolts:
ASTM A 325N Ø3/4" minimum

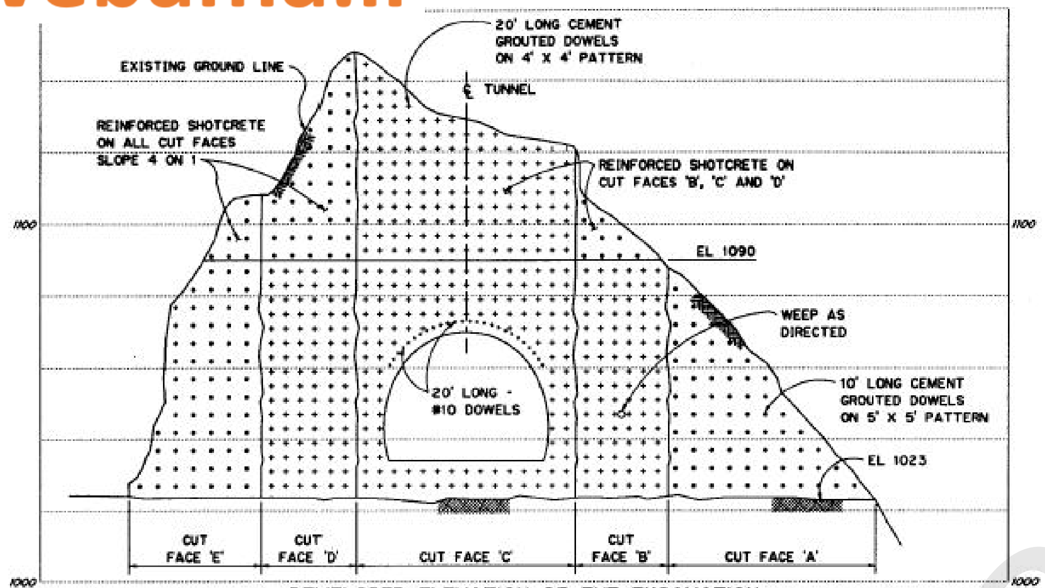


ترکیب لاتیس گیردر، سنگ دوز و شاتکریت

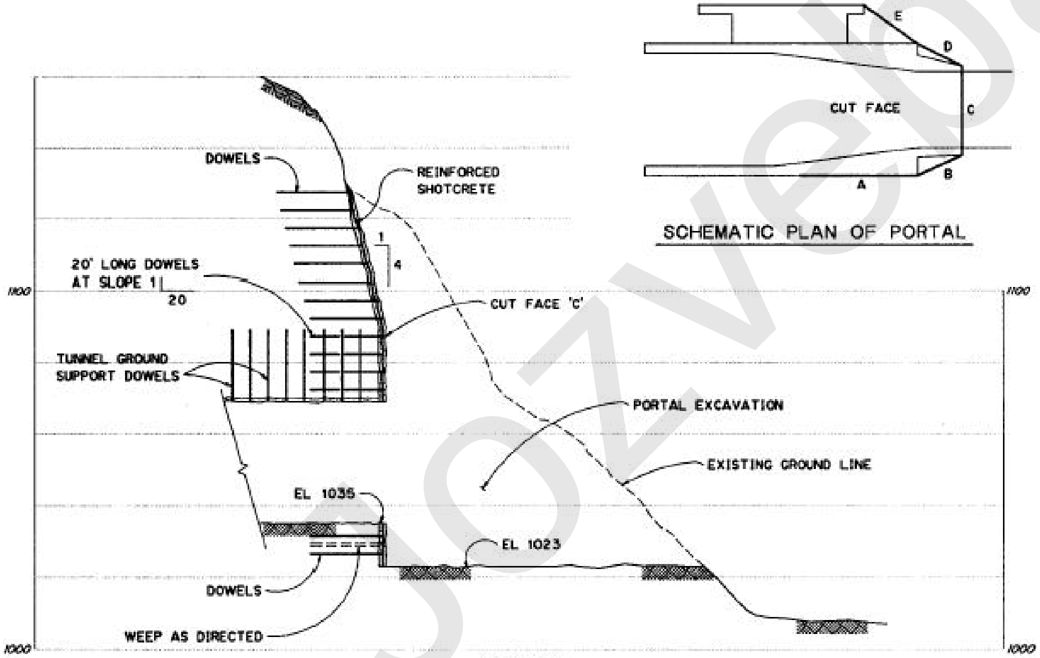

DOWELS, 10-FOOT LONG
x 8' PATTERN
#9 SPILES 10-FOOT LONG
2'-0 CC (TYP) AS REQUIRED
FIBER
REINFORCED
SHOTCRETE
CP115-11/8
LATTICE GIRDERS
AT 4'-0 O.C.
MINIMUM
EXCAVATION
LINE
15'-0
WALL PLATE, TYP
SPRINGLINE
W.P.
5'-8
6'-0±
T/R
R=30'-0
DRAIN PIPE, TYP
15'-6
STRIP DRAINS
20'-0 O.C.
1'-0
MUD SLAB
AS REQUIRED

پایداری پرتال ها (ورودی و خروجی) تونل

ورودی و خروجی تونل ها یکی از حساسترین موارد در تونل سازی است. چرا که به دلیل کم بودن ارتفاع خاک و سنگ و فرسایش یافته و ضعیف بودن آن، تامین پایداری سخت می باشد.


20' LONG CEMENT GROUTED DOWELS ON 4' X 4' PATTERN
EXISTING GROUND LINE
℄ TUNNEL
REINFORCED SHOTCRETE ON ALL CUT FACES SLOPE 4 ON 1
REINFORCED SHOTCRETE ON CUT FACES 'B', 'C' AND 'D'
1100
1100
EL 1090
WEEP AS DIRECTED
20' LONG - #10 DOWELS
10' LONG CEMENT GROUTED DOWELS ON 5' X 5' PATTERN
EL 1023
CUT FACE 'E'
CUT FACE 'D'
CUT FACE 'C'
CUT FACE 'B'
CUT FACE 'A'
1000
1000

DEVELOPED ELEVATION OF THE EXCAVATION


E
D
CUT FACE
C
A
B
DOWELS
REINFORCED SHOTCRETE
1
4
20' LONG DOWELS AT SLOPE 1 20
1100
1100
CUT FACE 'C'
TUNNEL GROUND SUPPORT DOWELS
PORTAL EXCAVATION
EXISTING GROUND LINE
EL 1035
EL 1023
DOWELS
WEEP AS DIRECTED
1000
1000

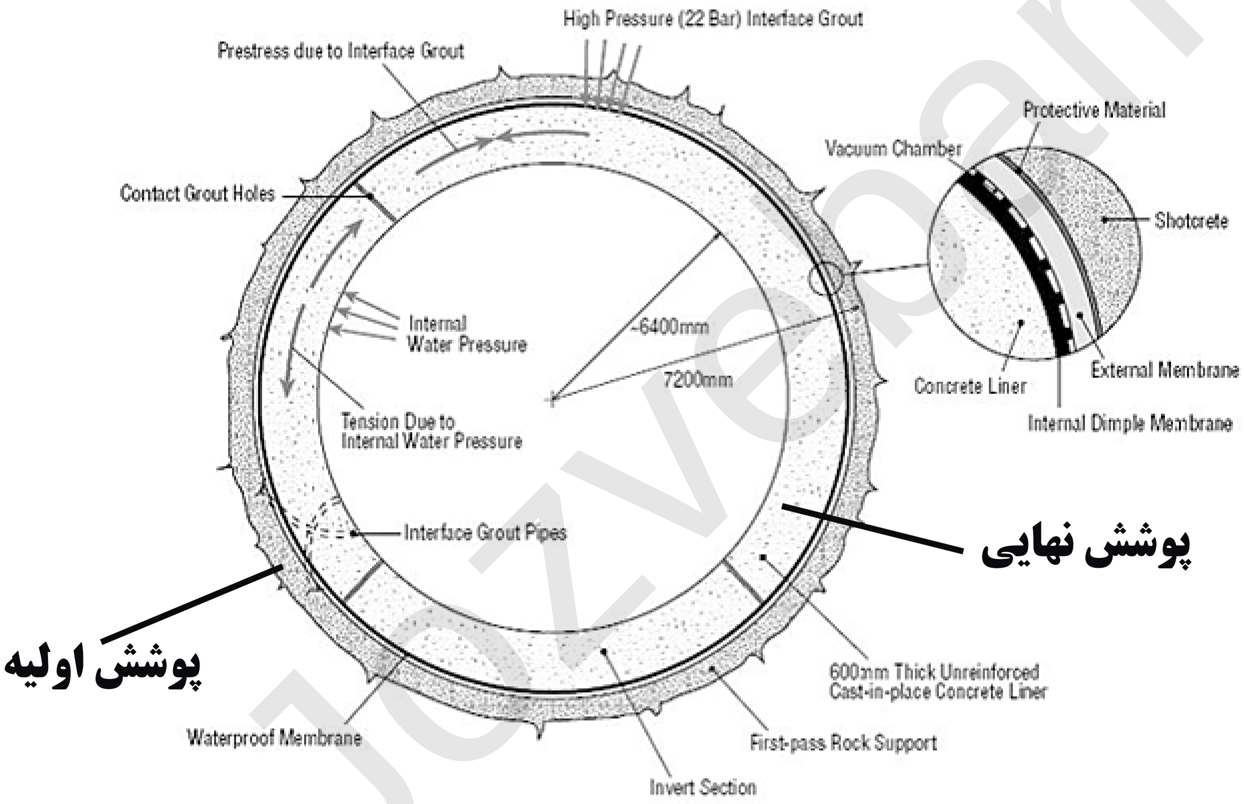
SCHEMATIC PLAN OF PORTAL

SECTION

معمولا با استفاده از سنگ دوزها و شاتکریت و یا سپرهای فلزی عمل پایداری ورودی تونل ها انجام می شود.

پوشش نهایی

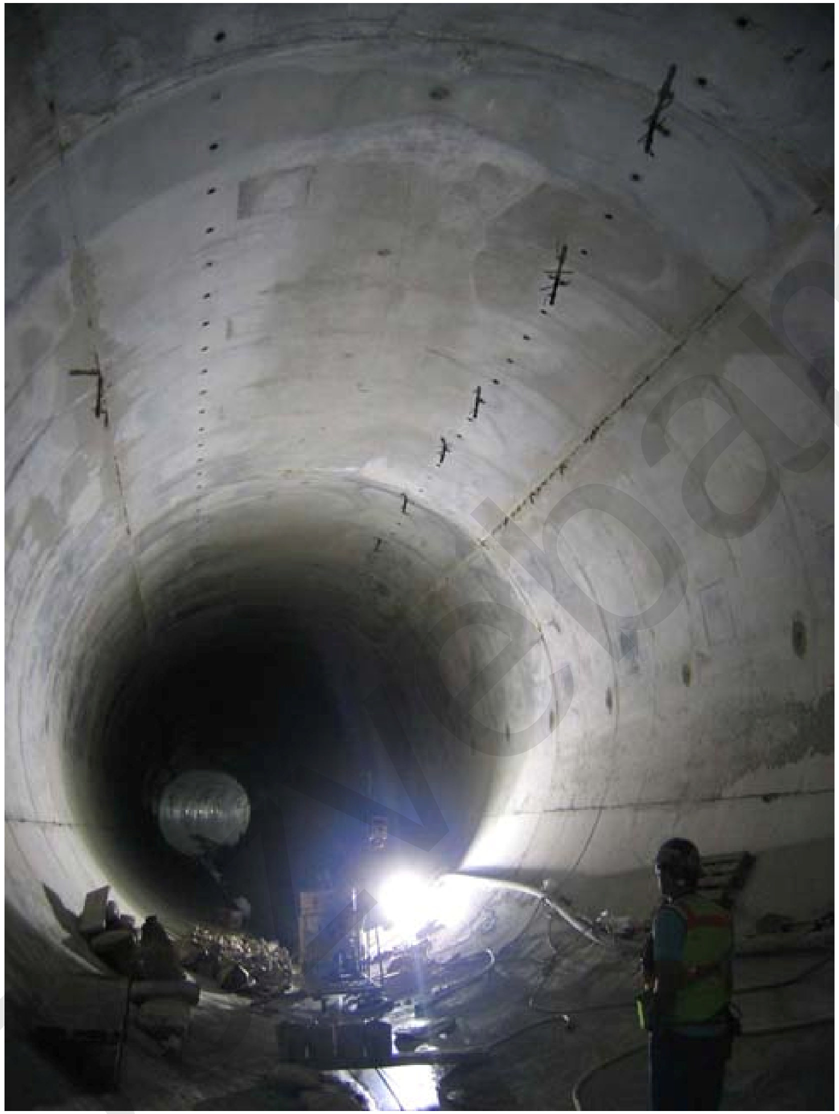
سازه ای است که بعد از اتمام حفاری و اجرای پوشش اولیه احداث می شود. وظیفه آن تحمل نیروهای زلزله و تنش های ناشی از تغییر مقاومت مصالح خاک و سنگ اطراف تونل وفشار آب می باشد.


High Pressure (22 Bar) Interface Grout
Prestress due to Interface Grout
Protective Material
Vacuum Chamber
Contact Grout Holes
Shotcrete
Internal Water Pressure
6400mm
7200mm
Concrete Liner
External Membrane
Tension Due to Internal Water Pressure
Internal Dimple Membrane
Interface Grout Pipes
پوشش نهایی
پوشش اولیه
600mm Thick Unreinforced Cast-in-place Concrete Liner
Waterproof Membrane
First-pass Rock Support
Invert Section

Tunnel lining system

انواع پوشش نهایی:

- بتن مصلح
- چدن
- بتن ساده



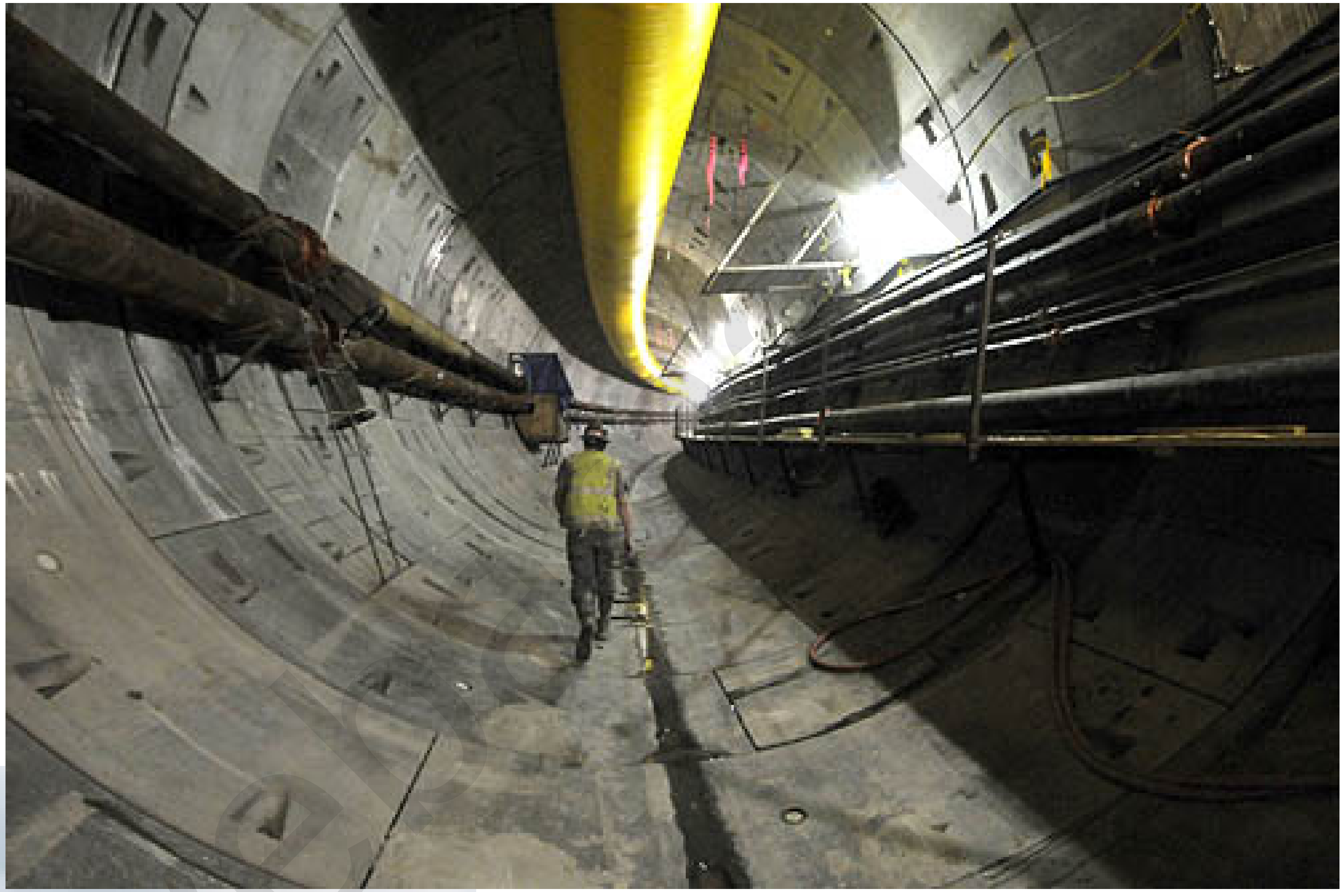
تصویری از یک تونل انتقال
آب بعد از اتمام پوشش نهایی

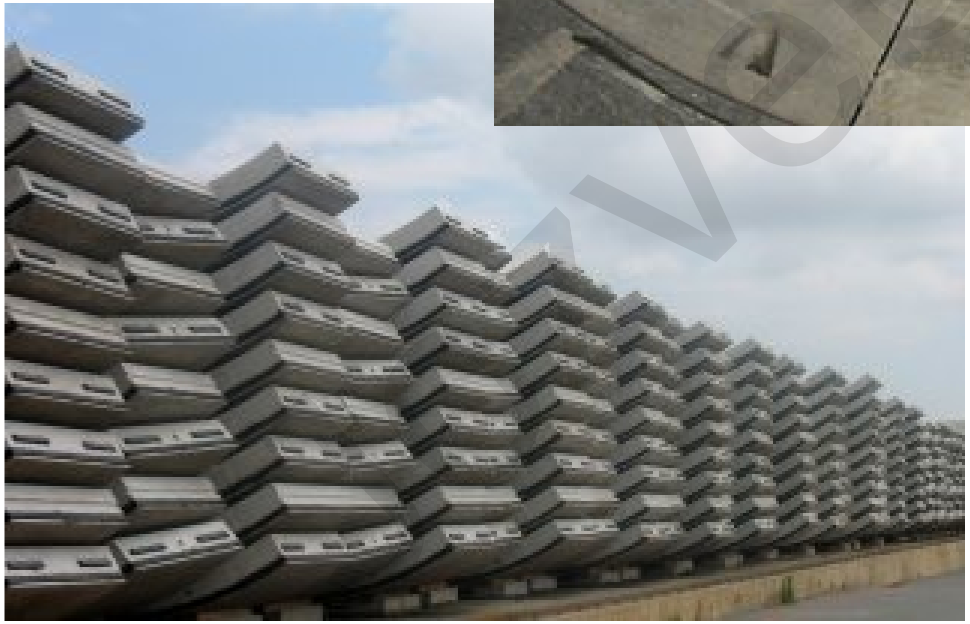
ترکیب پوشش اولیه و نهایی

در حفاری به روش TBM همزمان با حفاری، پوشش کلی تونل نیز به کمک قطعات (segments) انجام می گردد که معمولا این پوشش، هم نقش پوشش اولیه و هم پوشش نهایی را ایفا می کند. مانند تونل رسالت تهران.

در برخی مواقع بنابه شرایط لازم است یک پوشش دیگری بر روی segments ها اجرا گردد. مانند تونل های انتقال آب.

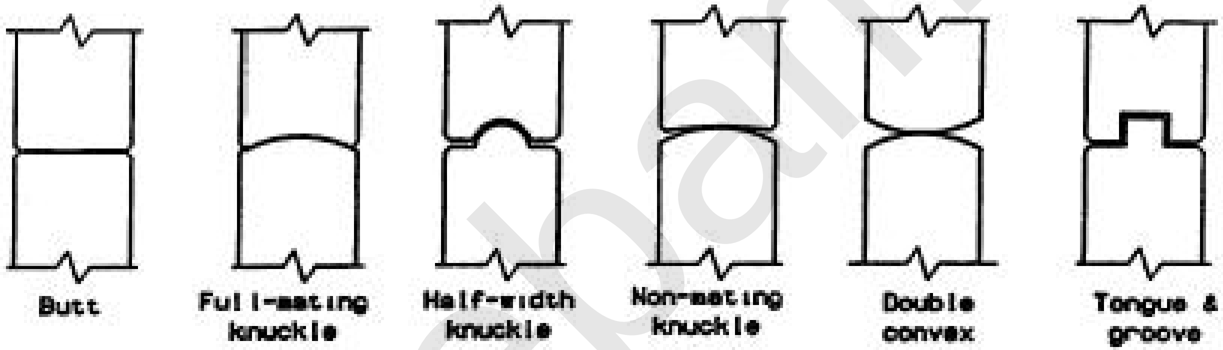
پوشش به کمک
ها segment





segments

چند نمونه از اتصالات segmentها


Butt
Full-mating knuckle
Half-width knuckle
Non-mating knuckle
Double convex
Tongue & groove

TYPES OF RING-RING JOINTS

فصل سوم:
رده بندی مهندسی توده های سنگی

رده بندی های سنگ

۱– رده بندی ترزاقی

۲– رده بندی بر مبنای زمان پابرجایی

۳– رده بندی بر اساس شاخص کیفیت سنگ (RQD)

۴– رده بندی براساس ساختار سنگ (RSR)

۵– رده بندی ژئومکانیکی (RMR)

۷– رده بندی بر اساس شاخص کیفیت تونل سازی Q

۱– رده بندی ترزاقی

۱– سنگ بکر: سنگ سالم و بدون درزه و ترک و شکستگی

۲– سنگ لایه لایه: توده سنگ به صورت لایه های با زوایای مختلف می باشند.

۳– سنگ نسبتا درزه دار: توده سنگ دارای شکستگی های محدود می باشد.

۴– سنگ های قطعه ای و رکه ای: شکستگی ها توده سنگ را به قطعات کاملا جدا از هم تقسیم می کند.

۵– سنگ خرد شده: توده سنگی که دچار فرسایش شده و رفتاری نزدیک به خاک پیدا می کند.

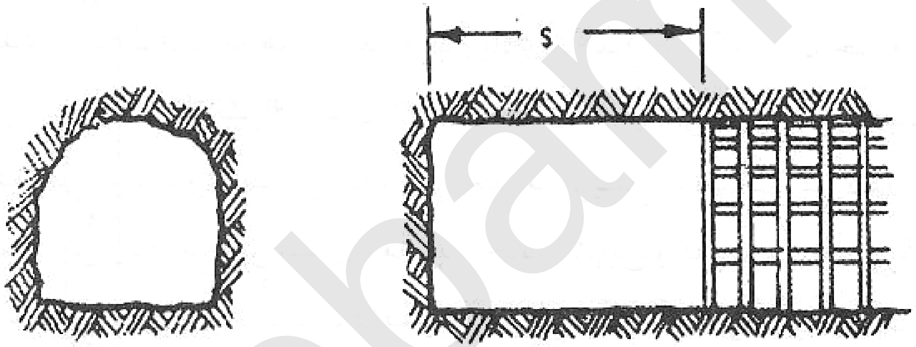
۶– سنگ لهیده: سنگ متشکل از کانیهای رسی بوده و ضعیف می باشد.

۷– سنگ آماس پذیر (متورم شونده): سنگ متشکل از کانی های رسی متورم شونده مانند مونتموریلونیت می باشد.

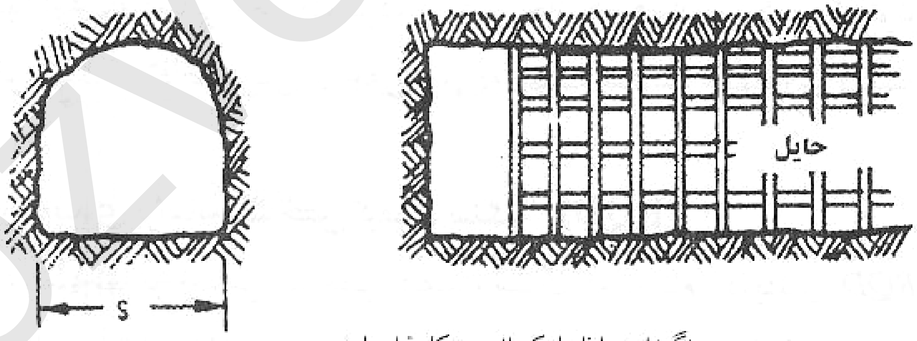
کاهش
مقاومت
سنگ
در
برابر
تنش
(حفر
تونل)

۲– رده بندی بر مبنای زمان پابرجایی

سنگها بر اساس زمان پابرجایی و دهانه فعال به ۷ گروه از A تا G تقسیم می شوند. به نحوی که A متناظر با سنگ بکر و سالم و G متناظر با سنگ بسیار ضعیف می باشد. زمان پابرجایی زمانی است که تونل بدون نیاز به پوشش شکل خودش را حفظ می کند. دهانه فعال نیز بزرگترین دهانه محل حفاری شده است.

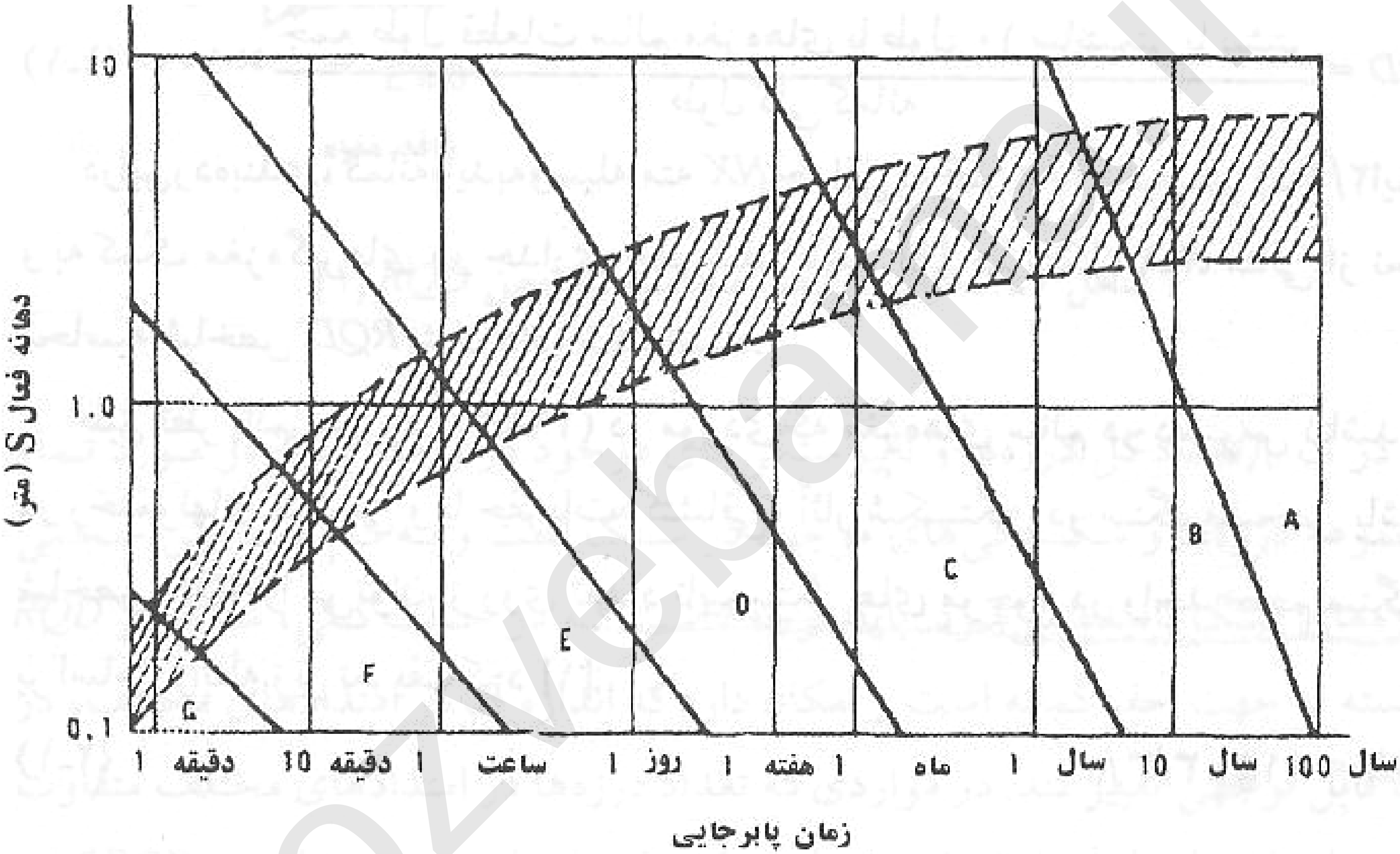


الف ـ سیستم نگهداری با فاصله زیاد از جبهه کار قرار دارد



ب ـ سیستم نگهداری با فاصله کم از جبهه کار قرار دارد

تعریف دهانه فعال [۲]



رده‌بندی سنگها بر اساس زمان پابرجایی

۳– رده بندی بر اساس شاخص کیفیت سنگ (RQD)

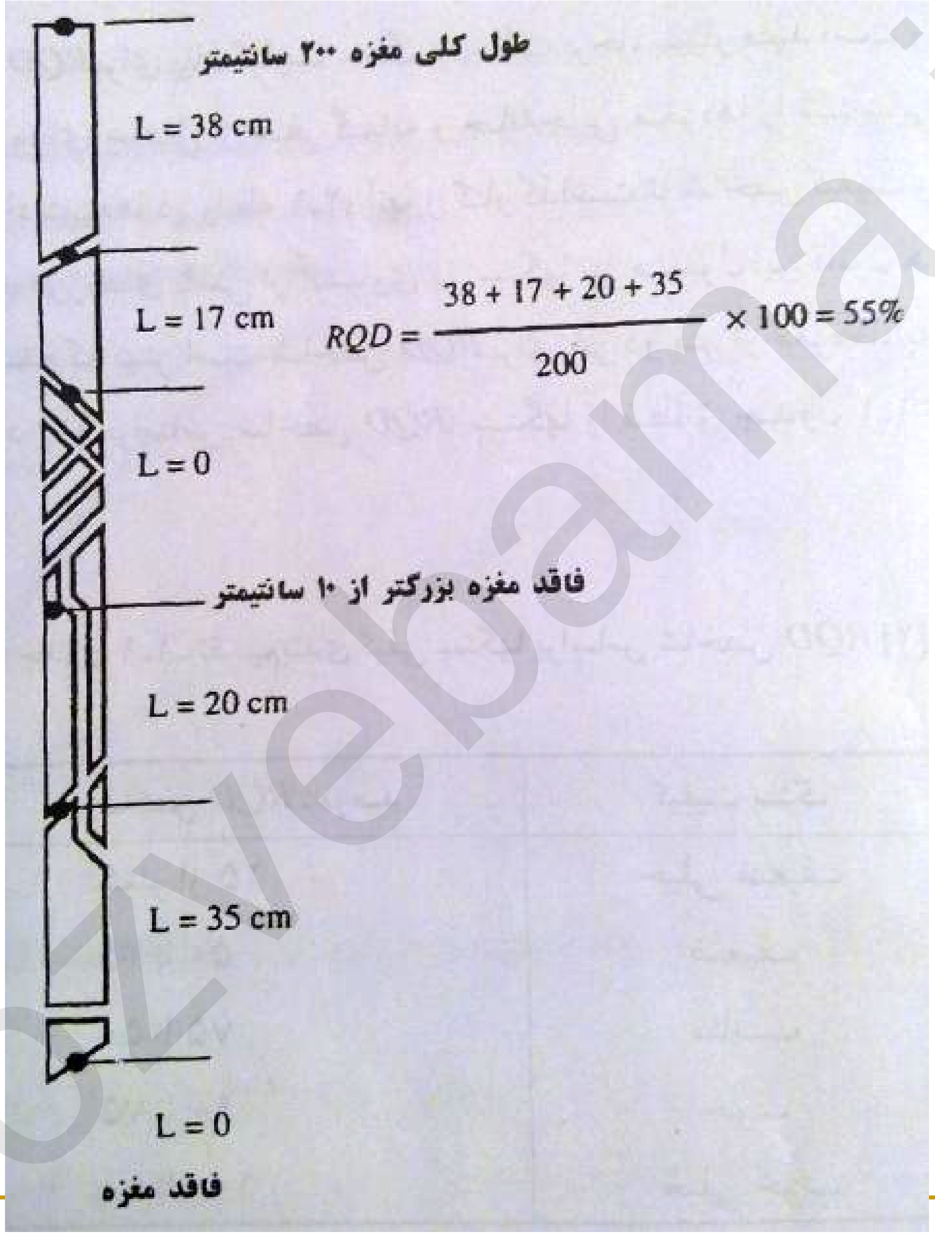
ابتدا در محل با مته به قطر حدودا ۵۵mm گمانه اکتشافی زده می شود. سپس با استفاده از رابطه زیر شاخص RQD محاسبه می گردد.

$$RQD=\frac{\text{جمع طول قطعات سالم با طول ۱۰cm و بیشتر}}{\text{طول کل گمانه}}\times 100$$

در صورتی که گمانه زنی نشده باشد می توان با اندازه گیری آثار شکستکیهای رخنمونها و یا دیواره حفاریها شاخص RQD را از روی رابطه زیر محاسبه نمود.

$$RQD=115-3.3jv$$

Jv تعداد کل درزه ها و شکستگی های موجود در واحد طول سنگ می باشد و به نام شمارش حجمی درزه ها نامیده می شود.

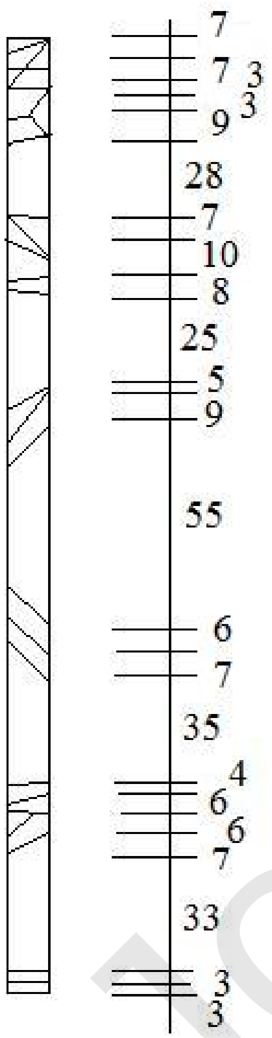

طول کلی مغزه ۲۰۰ سانتیمتر
L = 38 cm
L = 17 cm
L = 0
فاقد مغزه بزرگتر از ۱۰ سانتیمتر
L = 20 cm
L = 35 cm
L = 0
فاقد مغزه

$$RQD = \frac{38 + 17 + 20 + 35}{200} \times 100 = 55\%$$

تقسیم بندی کیفی سنگها براساس شاخص RQD

شاخص RQD (٪)	کیفیت سنگ
کمتر از ۲۵	خیلی ضعیف
۲۵ تا ۵۰	ضعیف
۵۰ تا ۷۵	مناسب
۷۵تا ۹۰	خوب
۹۰ تا ۱۰۰	خیلی خوب

مثال:


7
7
3
3
9
28
7
10
8
25
5
9
55
6
7
35
4
6
6
7
33
3
3

$$RQD=\frac{28+10+25+55+35+33}{282}\times100=66\%$$

توده سنگ دارای وضعیت مناسبی است.

۴– رده بندی براساس ساختار سنگ (RSR)

RSR=A+B+C

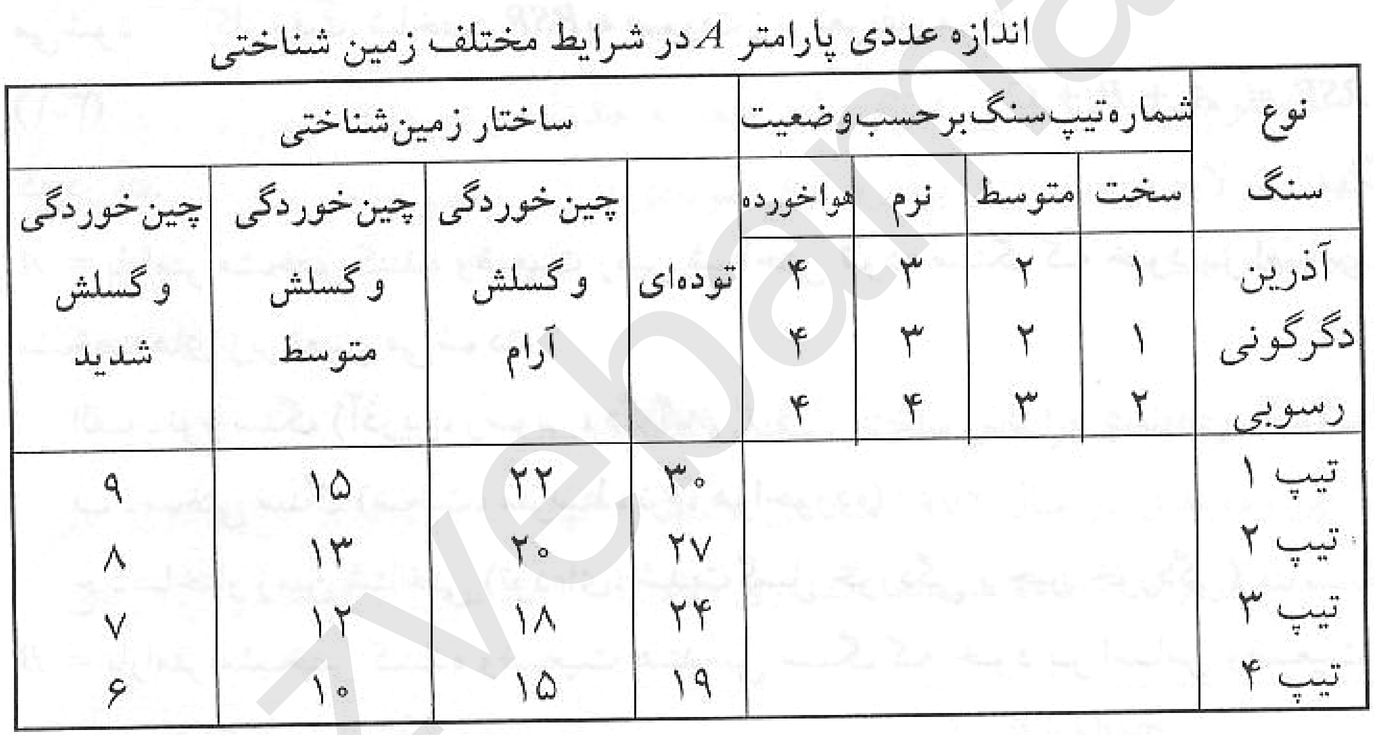
A: پارامتر مشخص کننده وضعیت زمین شناسی

B: پارامتر مشخص کننده وضعیت هندسی درزه ها و امتداد تونل

C: پارامتر مشخص کننده وضعیت آبهای زیرزمینی

حداکثر مقدار RSR **برابر ۱۰۰ است که متناظر با بهترین وضعیت است.**

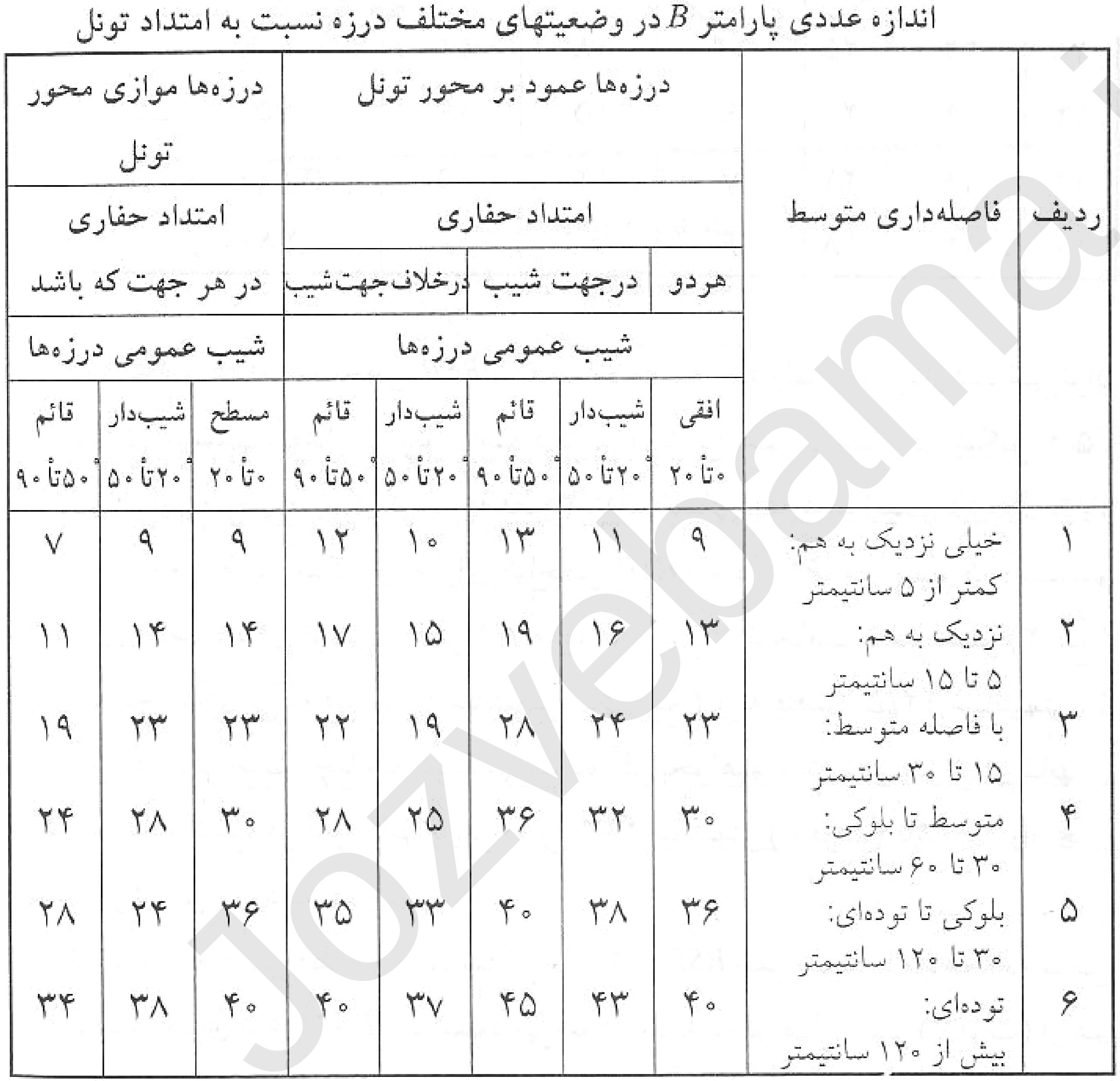
پارامتر A



اندازه عددی پارامتر A در شرایط مختلف زمین شناختی

نوع سنگ	شماره تیپ سنگ برحسب وضعیت				ساختار زمین شناختی			
	سخت	متوسط	نرم	هواخورده	توده‌ای	چین خوردگی و گسلش آرام	چین خوردگی و گسلش متوسط	چین خوردگی و گسلش شدید
آذرین	۱	۲	۳	۴				
دگرگونی	۱	۲	۳	۴				
رسوبی	۲	۳	۴	۴				
تیپ ۱					۳۰	۲۲	۱۵	۹
تیپ ۲					۲۷	۲۰	۱۳	۸
تیپ ۳					۲۴	۱۸	۱۲	۷
تیپ ۴					۱۹	۱۵	۱۰	۶

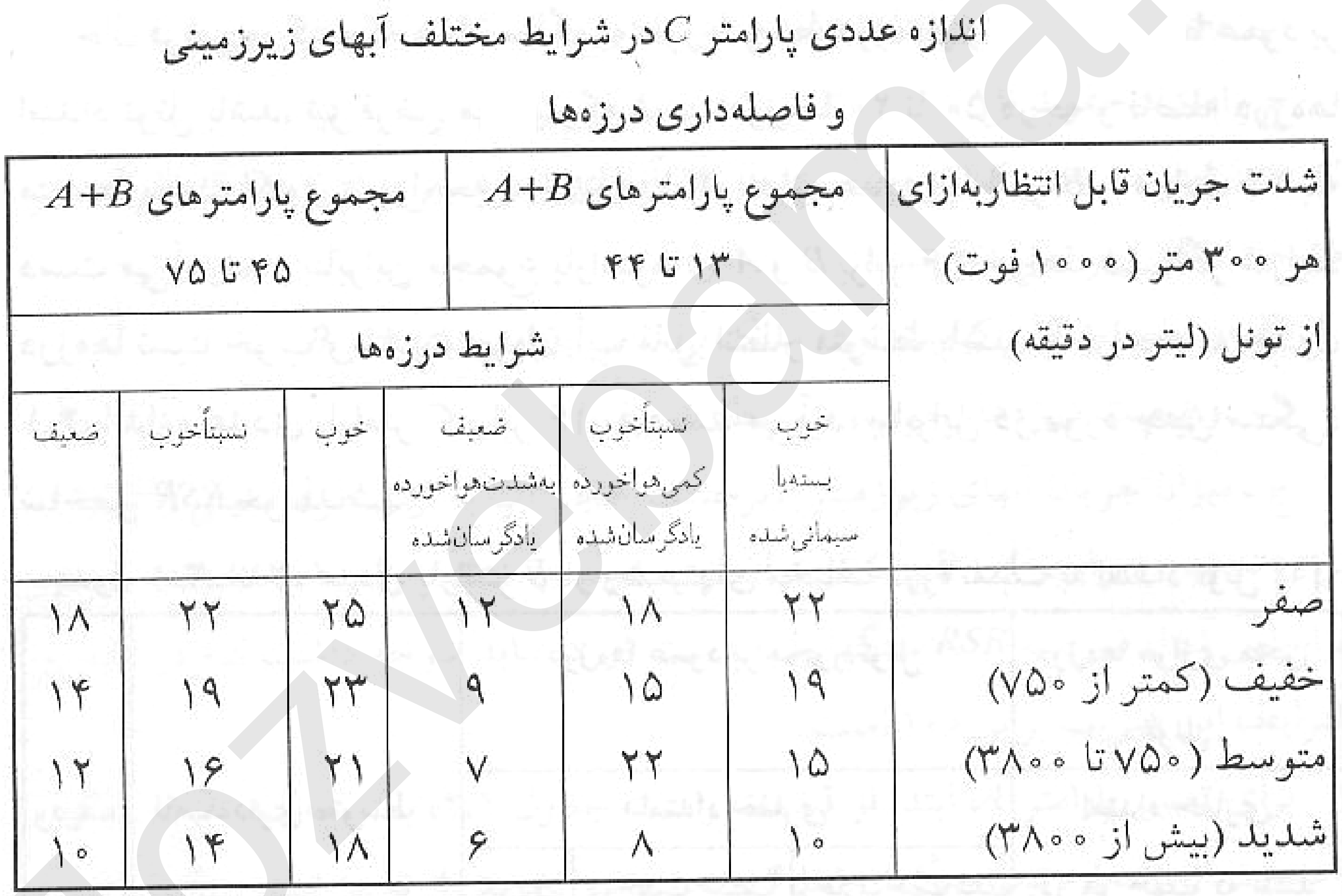
پارامتر B



اندازه عددی پارامتر B در وضعیتهای مختلف درزه نسبت به امتداد تونل

ردیف	فاصله‌داری متوسط	درزه‌ها عمود بر محور تونل					درزه‌ها موازی محور تونل		
		امتداد حفاری					امتداد حفاری در هر جهت که باشد		
		هردو	درجهت شیب		درخلاف جهت شیب				
		شیب عمومی درزه‌ها					شیب عمومی درزه‌ها		
		افقی ۰ تا ۲۰	شیب‌دار ۲۰ تا ۵۰	قائم ۵۰ تا ۹۰	شیب‌دار ۲۰ تا ۵۰	قائم ۵۰ تا ۹۰	مسطح ۰ تا ۲۰	شیب‌دار ۲۰ تا ۵۰	قائم ۵۰ تا ۹۰
۱	خیلی نزدیک به هم: کمتر از ۵ سانتیمتر	۹	۱۱	۱۳	۱۰	۱۲	۹	۹	۷
۲	نزدیک به هم: ۵ تا ۱۵ سانتیمتر	۱۳	۱۶	۱۹	۱۵	۱۷	۱۴	۱۴	۱۱
۳	با فاصله متوسط: ۱۵ تا ۳۰ سانتیمتر	۲۳	۲۴	۲۸	۱۹	۲۲	۲۳	۲۳	۱۹
۴	متوسط تا بلوکی: ۳۰ تا ۶۰ سانتیمتر	۳۰	۳۲	۳۶	۲۵	۲۸	۳۰	۲۸	۲۴
۵	بلوکی تا توده‌ای: ۳۰ تا ۱۲۰ سانتیمتر	۳۶	۳۸	۴۰	۳۳	۳۵	۳۶	۲۴	۲۸
۶	توده‌ای: بیش از ۱۲۰ سانتیمتر	۴۰	۴۳	۴۵	۳۷	۴۰	۴۰	۳۸	۳۴

پارامتر C



اندازه عددی پارامتر C در شرایط مختلف آبهای زیرزمینی و فاصله‌داری درزه‌ها

شدت جریان قابل انتظار به‌ازای هر ۳۰۰ متر (۱۰۰۰ فوت) از تونل (لیتر در دقیقه)	مجموع پارامترهای $A+B$ ۱۳ تا ۴۴			مجموع پارامترهای $A+B$ ۴۵ تا ۷۵		
	شرایط درزه‌ها					
	خوب بسته یا سیمانی شده	نسبتاً‌خوب کمی هواخورده یا دگرسان‌شده	ضعیف به‌شدت هواخورده یا دگرسان‌شده	خوب	نسبتاً‌خوب	ضعیف
صفر	۲۲	۱۸	۱۲	۲۵	۲۲	۱۸
خفیف (کمتر از ۷۵۰)	۱۹	۱۵	۹	۲۳	۱۹	۱۴
متوسط (۷۵۰ تا ۳۸۰۰)	۱۵	۲۲	۷	۲۱	۱۶	۱۲
شدید (بیش از ۳۸۰۰)	۱۰	۸	۶	۱۸	۱۴	۱۰

مثال:

قرار است تونلی در توده سنگ رسوبی متوسط با لایه بندی با شیبی تقریبا ۴۵ درجه حفاری گردد که شیب لایه ها عمود بر جهت حفر تونل بوده و دارای چین خوردگی زیادی و درزه های با فاصله متوسط ۳۰cm و کمی هوازده باشد. اگر زمین دارای رطوبتی متوسط بوده و انتظار ترشح کمی آب وجود داشته باشد مطلوبست تعیین رده توده سنگ در مسیر تونل به روش RSR.

Type 3: A=7

Slope=45: B=24

A+B=31, moist: C=15

RSR=A+B+C=7+24+15=46

توده سنگی دارای وضعیت نسبتا متوسطی در برابر حفر تونل مذکور است.

۵– رده بندی ژئومکانیکی RMR (CSIR) یا روش بینیاوسکی

تقسیم بندی RMR براساس ۶ پارامتر زیر انجام می شود:

۱– مقاومت فشاری تک محوری سنگ سالم بدون درزه و شکستگی

۲– شاخص RQD

۳– فاصله درزه ها

۴– وضعیت سطوح ناپیوستگیها از نظر صافی و زبری یا میزان هوازدگی

۵– وضعیت آبهای زیرزمینی

۶– جهت ناپیستگی ها نسبت به امتداد تونل

تعدیل ارزش عددی برای جهت درزه ها – حاصل جمع ارزش عددی ۶ پارامتر فوق=RMR

الف ـ پارامترهای طبقه‌بندی و ارزش‌گذاری آنها

	پارامتر		محدوده مقادیر						
۱	مقاومت توده‌سنگی بکر	شاخص مقاومت بارنقطه‌ای	> ۸ MPa	۴-۸ MPa	۲-۴ MPa	۱-۲ MPa	برای این محدوده مقاومت فشاری تک‌محوری ترجیح داده می‌شود		
		مقاومت فشاری تک‌محوری	> ۲۰۰ MPa	۱۰۰-۲۰۰ MPa	۵۰-۱۰۰ MPa	۲۵-۵۰ MPa	۱۰-۲۵ Mpa	۳-۱۰ Mpa	۱-۳ Mpa
	ارزش عددی		۱۵	۱۲	۷	۴	۲	۱	۰
۲	شاخص RQD		٪۹۰-٪۱۰۰	٪۷۵-٪۹۰	٪۵۰-٪۷۵	٪۲۵-٪۵۰	< ٪۲۵		
	ارزش عددی		۲۰	۱۷	۱۳	۸	۳		
۳	فاصله‌داری درزها		> ۳ m	۱-۳ m	۰/۳-۱ m	۵۰۰-۳۰۰ mm	< ۵۰ mm		
	ارزش عددی		۳۰	۲۵	۲۰	۱۰	۵		
۴	وضعیت ناپیوستگی‌ها		سطوح خیلی زبر، غیرممتد، جدانشده، دیواره درزها سخت	سطوح کمی‌زبر، جدایی دیواره کمتراز ۱ میلیمتر درزها سخت	سطوح کمی زبر جدایی دیواره کمتراز ۱ میلیمتر درزها نرم	سطوح آینه‌ای یا ضخامت کمتر از ۵ میلیمتر مواد آکنده ۱ تا ۵ میلیمتر بازشدگی درزهای ممتد	ضخامت مواد آکنده نرم بیش از ۵ میلیمتر و بازشدگی بیش از ۵ میلیمتر، درزها ممتد		
	ارزش عددی		۲۵	۲۰	۱۲	۶	۰		
۵	آب زیرزمینی	جریان آب در هر ۱۰ متر طول تونل	بدون آب یا	$< ۲۵ \frac{lit}{min}$ یا	$۲۵-۱۲۵ \frac{lit}{min}$ یا	$> ۱۲۵ \frac{lit}{min}$ یا			
		نسبت فشار در درز به‌تنش اصلی بزرگتر	۰ یا	۰-۰/۰۲ یا	۰/۲-۰/۰۵ یا	> ۰/۰۵ یا			
		شرایط عمومی	کاملاًخشک	فقط مرطوب	آب‌تحت فشار متوسط	مشکلات فراوان در اثر آب			
	ارزش عددی		۱۰	۷	۴	۰			

ب ـ تعدیل ارزش عددی برای جهت‌یابی درزها

راستاوجهت میل درزها		خیلی مساعد	مساعد (مطلوب)	مناسب	نامساعد	خیلی نامساعد
ارزش عددی	تونل‌ها	۰	-۲	-۵	-۱۰	-۱۲
	پی‌ها	۰	-۲	-۷	-۱۵	-۲۵
	شیروانی‌ها	۰	-۵	-۲۵	-۵۰	-۶۰

ج ـ رده و کلاس تودهٔ سنگ که براساس ارزش عددی کل تعیین می‌شود

ارزش عددی	۸۱-۱۰۰	۶۱-۸۰	۴۱-۶۰	۲۱-۴۰	< ۲۰
شماره‌طبقه (کلاس)	I	II	III	IV	V
شرح و توصیف	سنگ خیلی‌خوب	سنگ خوب	سنگ مناسب	سنگ ضعیف	سنگ خیلی‌ضعیف

د ـ اطلاعات مربوط به هر رده و کلاس تودهٔ سنگ

شماره‌طبقه (کلاس)	I	II	III	IV	V
زمان‌خودپایداری متوسط	۱۰ سال برای دهنه ۵ متری	۶ ماه برای دهنه ۴ متری	۱ هفته برای دهنه ۳ متری	۵ ساعت برای دهنه ۱/۵ متری	۱۰ دقیقه برای دهنه ۰/۵ متری
چسبندگی توده سنگ	>۳۰۰ *KPa*	۲۰۰-۳۰۰ *KPa*	۱۵۰-۲۰۰ *KPa*	۱۰۰-۱۵۰ *KPa*	<۱۰۰ *KPa*
زاویه اصطکاک توده سنگ	> ۴۵°	۴۰-۴۵°	۳۵-۴۰°	۳۰-۳۵°	<۳۰°

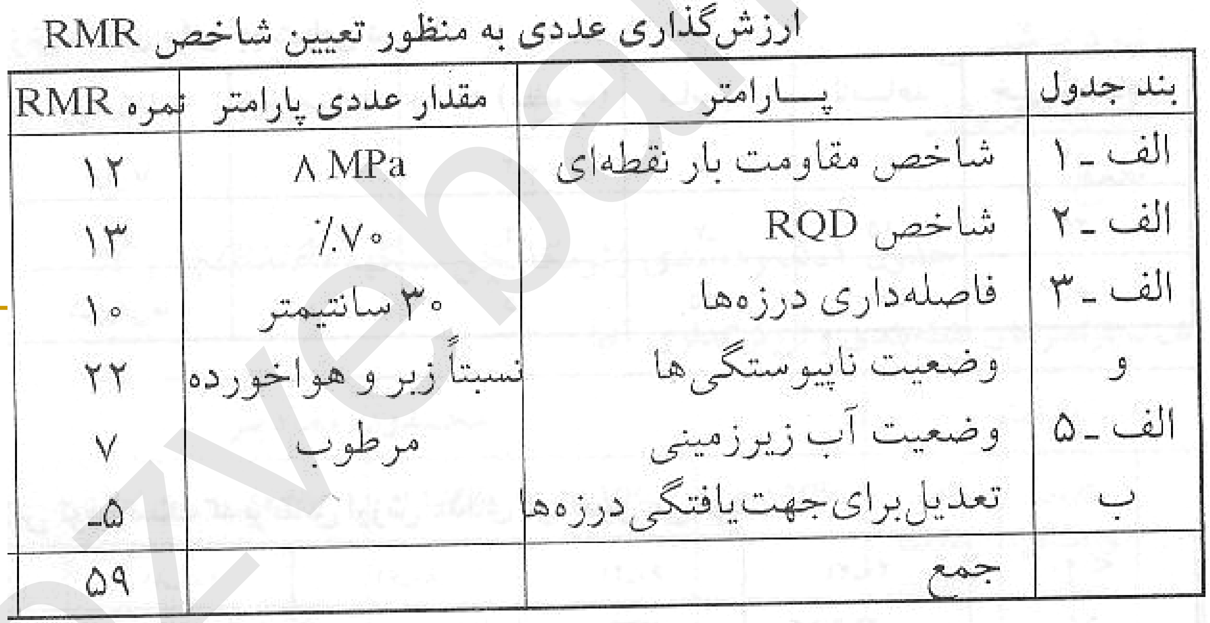
هـ ـ نقش شیب و امتداد ناپیوستگی‌ها در تونلسازی

امتداد عمود بر محور تونل				امتدادد موازی محور تونل		زاویه شیب ۰-۲۰°
زاویه‌شیب‌هم‌جهت‌باپیشروی		زاویه‌شیب‌خلاف‌جهت‌پیشروی				
زاویه میل ۴۵-۹۰°	زاویه میل ۲۰-۴۵°	زاویه میل ۴۵-۹۰°	زاویه میل ۲۰-۴۵°	زاویه شیب ۴۵-۹۰°	زاویه شیب ۲۰-۴۵°	بدون توجه به امتداد
خیلی مساعد	مساعد	مناسب	نامساعد	خیلی نامساعد	مناسب	نامساعد

مثال:

قرار است تونلی در توده سنگ گرانیت کمی هوازده حفاری شود. درزه های سنگ دارای شیب ۶۰ درجه بوده و جهت آنها خلاف جهت پیشروی تونل است.

براساس اطلاعات حاصل از مغزه های گمانه ها، شاخص بار نقطه ای ۸MPa و شاخص RQD متوسط برابر ٪۷۰ می باشد. درزه ها نسبتا زبر و هوازده بوده و فاصله آنها به طور متوسط ۳۰cm و بازشدگی آنها حدودا ۱mm است.



ارزش‌گذاری عددی به منظور تعیین شاخص RMR

بند جدول	پـــارامتر	مقدار عددی پارامتر	نمره RMR
الف ـ ۱	شاخص مقاومت بار نقطه‌ای	۸ MPa	۱۲
الف ـ ۲	شاخص RQD	٪۷۰	۱۳
الف ـ ۳	فاصله‌داری درزه‌ها	۳۰ سانتیمتر	۱۰
و	وضعیت ناپیوستگی‌ها	نسبتاً زبر و هواخورده	۲۲
الف ـ ۵	وضعیت آب زیرزمینی	مرطوب	۷
ب	تعدیل برای جهت‌یافتگی درزه‌ها		-۵
	جمع		۵۹

شماره کلاس سنگ III، سنگ مناسب، زمان خود پایداری ۱ هفته برای دهنه ۳ متری

۷– رده بندی بر اساس شاخص کیفیت تونل سازی Q (روش بارتون و همکاران)، روش NGI

در این روش شاخص کیفیت Q براساس ۶ پارامتر به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$Q = (RQD/J_n)\ (J_r/J_a)\ (J_w/SRF)$$

که در آن:

RQD: همان شاخص RQD سنگ

Jn: ضریب مربوط به تعداد دسته درزه ها

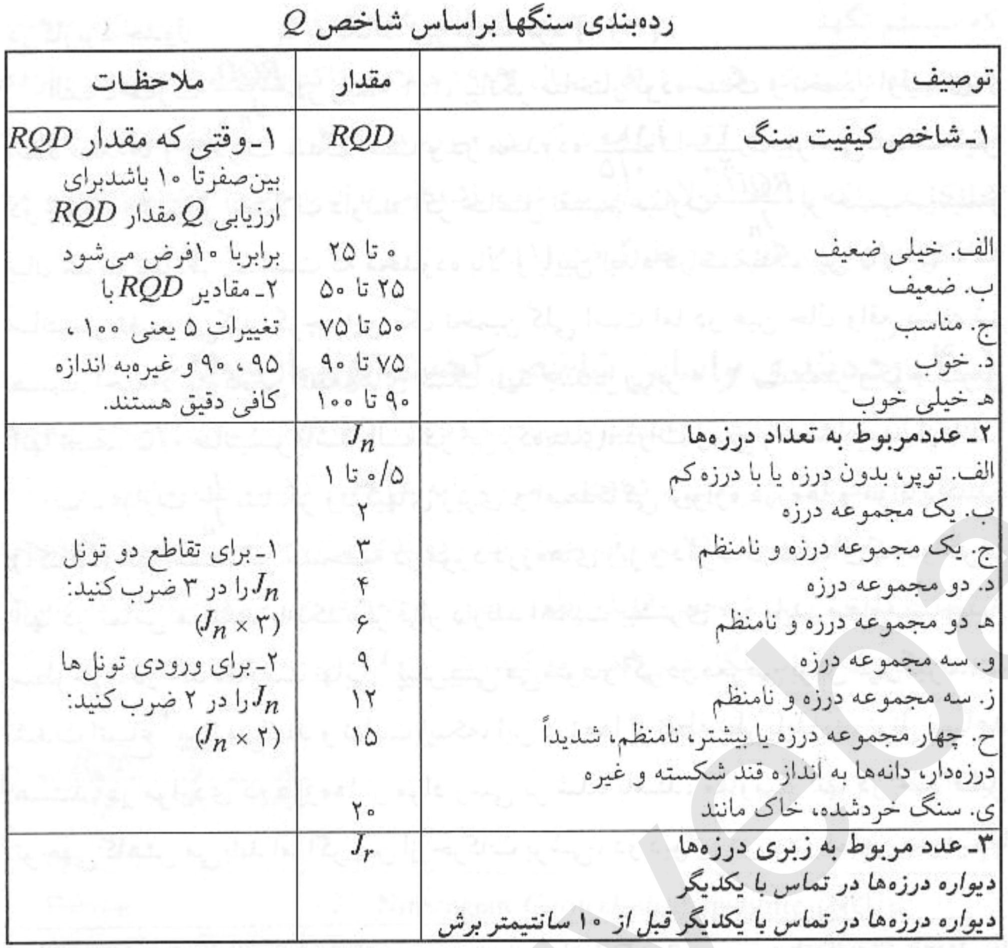
Jr: ضریب مربوط به زبری درزه ها

Ja: ضریب مربوط به دگرگونی درزه ها

Jw: ضریب مربوط به کاهش آب درزه ها

SRF: ضریب مربوط به کاهش تنش

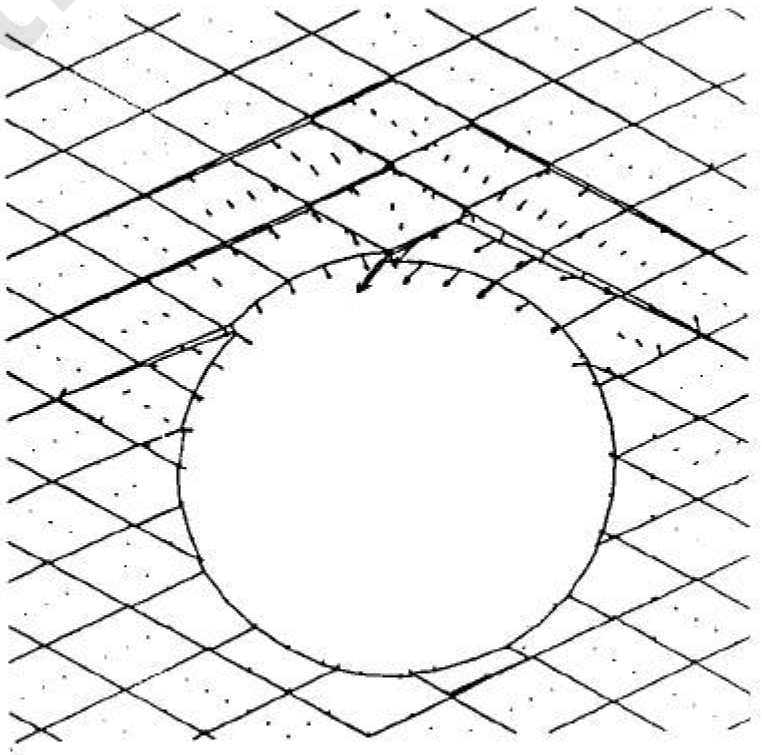
دامنه تغییرات Q بین ۰/۰۰۱ تا ۱۰۰۰ است. هرچقدر مقدار آن بیشتر باشد نشان دهنده شرایط بهتر می باشد.



رده‌بندی سنگها براساس شاخص Q

توصیف	مقدار	ملاحظات
۱ـ شاخص کیفیت سنگ	RQD	۱ـوقتی که مقدار RQD بین صفرتا ۱۰ باشدبرای ارزیابی Q مقدار RQD برابربا ۱۰فرض می‌شود ۲ـ مقادیر RQD با تغییرات ۵ یعنی ۱۰۰، ۹۵، ۹۰ و غیره‌به اندازه کافی دقیق هستند.
الف. خیلی ضعیف	۰ تا ۲۵	
ب. ضعیف	۲۵ تا ۵۰	
ج. مناسب	۵۰ تا ۷۵	
د. خوب	۷۵ تا ۹۰	
هـ. خیلی خوب	۹۰ تا ۱۰۰	
۲ـ عددمربوط به تعداد درزه‌ها	J_n	۱ـ برای تقاطع دو تونل J_nرا در ۳ ضرب کنید: (J_n × ۳) ۲ـ برای ورودی تونل‌ها J_nرا در ۲ ضرب کنید: (J_n × ۲)
الف. توپر، بدون درزه یا با درزه کم	۰/۵ تا ۱	
ب. یک مجموعه درزه	۲	
ج. یک مجموعه درزه و نامنظم	۳	
د. دو مجموعه درزه	۴	
هـ. دو مجموعه درزه و نامنظم	۶	
و. سه مجموعه درزه	۹	
ز. سه مجموعه درزه و نامنظم	۱۲	
ح. چهار مجموعه درزه یا بیشتر، نامنظم، شدیداً درزه‌دار، دانه‌ها به اندازه قند شکسته و غیره	۱۵	
ی. سنگ خردشده، خاک مانند	۲۰	
۳ـ عدد مربوط به زبری درزه‌ها	J_r	
دیواره درزه‌ها در تماس با یکدیگر		
دیواره درزه‌ها در تماس با یکدیگر قبل از ۱۰ سانتیمتر برش		

دو دسته درزه →



Movement of blocks around tunnel; velocities denoted by arrows

رده‌بندی سنگها براساس شاخص Q

	J_r	
الف. درزه‌های غیرممتد	۴	۱ـ چنانچه فاصله‌داری متوسط مجموعه درزه‌ها بزرگتر از ۳ متر باشد، مقدار ۱/۵ را به J_r اضافه کنید. ۲ـ $J_r = ۰/۵$ را می‌توان برای درزه‌های مسطح و آیینه‌ای که لایه‌بندی داشته باشند استفاده کرد، به شرطی که لایه‌ها در جهتی قرار گرفته باشند که مقاومت حداقل باشد.
ب. زبر و نامنظم، موجدار	۳	
ج. صاف ـ موجدار	۲	
د. آیینه‌ای، موجدار	۱/۵	
هـ زبر و نامنظم، مسطح	۱/۵	
و. صاف، مسطح	۱	
ز. آیینه‌ای، مسطح	۰/۵	
وقتی‌برش اتفاق می‌افتد دیواره‌درزه‌ها باهم درتماس نیستند		
ح. زون حاوی مواد رسی با ضخامت کافی که از تماس دیواره‌ها ممانعت می‌کند	۱	
ط. زون‌ماسه‌ای، شنی‌یاسنگ‌خردشده باضخامت کافی که از تماس دیواره‌ها جلوگیری می‌کند.	۱	
۴ـ عدد مربوط به دگرسانی درزه‌ها	J_a	Φ_r (تقریبی)
دیواره درزه‌ها در تماس		
الف. شدیداً جوش خورده، سخت، غیرنرم، مواد آکننده غیرقابل نفوذ	۰/۷۵	
ب. دیواره‌های درزه‌دگرسان‌نشده، سطوح درزه‌ها صرفاً زنگ زده است.	۱	(۲۵° تا ۳۵°)
ج. دیواره درزه‌ها کمی دگرسان شده است، مواد پوششی درزه‌ها ازکانی‌های غیرنرم، ذرات‌ماسه‌ای، سنگ شکستهٔ عاری از مواد رسی و غیره	۲	(۲۵° تا ۳۰°)
د. مواد آکننده درزه‌ها از سیلت، رس یا ماسه، بخش‌های کوچک رسی (غیرنرم)	۳	(۲۵° تا ۲۰°)
هـ مواد آکننده درزه‌ها از مواد رسی نرم یا با اصطکاک کم، مثل کائولینیت، میکا. همچنین کلریت، تالک، گچ، گرافیت و غیره، و مقادیر کم رسهای تورمی (پوشش ناپیوسته، با ضخامت ۱ تا ۲ میلیمتر و یا کمتر است).	۴	(۱۶° تا ۸)
دیواره درزه‌ها تا قبل از ۱۰ میلیمتر برش در تماس با هم هستند.		
و. ذرات ماسه، سنگ شکسته عاری از مواد رسی و غیره.	۴	(۳۰° تا ۲۵°)
ز. شدیداً پیش تحکیم شده، مواد آکننده رسی غیرنرم (ممتد، ضخامت کمتر از ۵ میلیمتر)	۶	(۲۴° تا ۱۶°)
ح. پیش تحکیم شدهٔ متوسط یاکم، نرم، مواد اکننده رسی (ممتد، ضخامت کمتر از ۵ میلیمتر)	۸	(۱۶° تا ۱۲°)
ط. مواد آکننده تورمی، یعنی مونت‌مور یلونیت (ممتد، ضخامت کمتر از ۵ میلیمتر) مقدار J_a	۸ تا ۱۲	(۱۲° تا ۶°)

رده‌بندی سنگها براساس شاخص Q

بستگی به درصد اندازهٔ ذرات رس تورمی و به مقدار دسترسی به آب دارد.	J_a	
دیواره درزه‌ها پس از برش در تماس نیستند.		
ی. زونها یا نوارهای شکسته و غیرسالم	۶	
ک. یا سنگ خردشده و رس G، H و J.	۸	
ل. برای شرایط رسی را نگاه کنید).	۸ تا ۱۲	(۲۴° تا ۶°)
م. زونها یا نوارهای سیلتی یا رس‌ماسه‌ای، رگه‌های کوچک رسی (غیرنرم)	۵	
ن. ضخیم، مناطق ممتد یا		
ص. نوارهایی از رس G، H و J.	۱۰ تا ۱۳	(۲۴° تا ۶°)
ع. برای شرایط، رس را ببینید.	۱۳ تا ۲۰	
۵ـ ضریب مربوط به کاهش آب درزه‌ها	(J_w)	فشارتقریبی آب kgf/cm^2
الف. حفاری خشک یا جریان آب کم، یعنی کمتر از ۵ لیتر در دقیقه به صورت محلی	۱	$<$ ۱
ب. جریان آب یافشار متوسط، گاهی آب‌شستگی مواد اتفاق می‌افتد.	۰/۶۶	۱ تا ۲/۵
ج. جریان آب زیاد یا فشار بالا در سنگ خوب با درزه‌های پرنشده	۰/۵	۲/۵ تا ۱۰
د. جریان آب زیاد با فشار بالا، آب شستگی مواد آکننده قابل ملاحظه است	۰/۳۳	۲/۵ تا ۱۰
هـ جریان فوق‌العاده زیاد آب یا فشار در لحظهٔ آتشباری کاهش در طول زمان	۰/۱تا۰/۲	$>$ ۱۰
و. جریان فوق‌العاده زیاد آب یا فشار به‌طور مداوم بدون کاهش در طول زمان	۰/۰۵تا۰/۱	ضرایب C تا F مقادیر تخمینی خام هستند. چنانچه سیستم زه‌کشی ایجاد شد مقدار J_w را افزایش دهید ۲ـ مسائل خاصی که به علت تشکیل یخ به وجود می‌آیند، موردنظر قرار نگرفته‌اند.
۶ـ ضریب مربوط به کاهش تنش	(SRF)	
زونهای ضعیفی که تونل را قطع می‌کند، ممکن است موجب سستی توده سنگ به هنگام حفاری تونل شود.		۱ـ چنانچه زونهای برشی تونل را قطع نمی‌کند بلکه تحت تأثیر قرار می‌دهد، این مقادیر SRF را به میزان ۲۵ـ۵۰٪ کاهش دهید.
الف: وقوع متعدد زونهای ضعیف که محتوی رس یا سنگ خردشده و تجزیه شده‌است، سنگ‌خیلی سست دراطراف تونل (در هر عمق).	۱۰	
ب: زونهای ضعیف منفرد محتوی رس، یاسنگ تجزیه شده و هوازده، عمق حفاری کمتر از ۵۰ متر	۵	
ج: زونهای ضعیف منفرد محتوی رس، یا سنگ تجزیه شده و هوازده، عمق حفاری بیشتر از ۵۰ متر	۲/۵	

ادامه جدول ۱ـ۸ـ رده‌بندی سنگها براساس شاخص Q [۱ و ۲]

			(SRF)	
د: زونهای برشی متعدد در سنگ سالم و خوب (بدون رس)، سنگ سست دراطراف تونل (هرعمقی)			۷/۵	
ه: زونهای برشی منفرد در سنگ سالم و خوب (عاری از رس)، عمق حفاری کمتر از ۵۰ متر			۵	۲ـ برای میدان تنش بکر شدیداً ناهمسانگرد (اگر اندازه‌گیری شده است): $۵ \le \frac{\sigma_1}{\sigma_3} \le ۱۰$ مقدار σ_c را به $۰/۸\sigma_c$ و σ_t را به $۰/۸\sigma_t$ کاهش دهید. وقتی $\frac{\sigma_1}{\sigma_3} \le ۱۰$ باشد، مقدار σ_c و σ_t را به $۰/۶\sigma_c$ و $۰/۶\sigma_t$ کاهش دهید. σ_c مقاومت فشاری تک‌محوری و σ_t مقاومت کششی است (بار نقطه‌ای). σ_1 و σ_3 تنش‌های اصلی بزرگتر و کوچکتر هستند.
و: مناطق برشی مجرد در سنگ سالم و خوب (عاری ازرس)، عمق حفاری بیش از ۵۰ متر			۲/۵	
ز: درزه‌های باز سست، شدیداً درزدار یا بلوک‌های سنگ به اندازه حبه‌های قند (هر عمقی)			۵	
سنگ سالم و خوب، مسائل تنش در سنگ	$\frac{\sigma_c}{\sigma_1}$	$\sigma_t + \sigma_1$		
ح: تنش کم، نزدیک سطح زمین	> ۲۰۰	> ۱/۳	۲/۵	
ط: تنش متوسط	۱۰ تا ۲۰۰	۰/۶۶ تا ۱۳	۱	
ی: تنش زیاد، ساختار خیلی کم (معمولاً از نظر پایداری مساعد و ممکن است برای پایداری دیواره‌ها نامساعد باشد)	۵ تا ۱۰	۰/۳۳ تا ۰/۶۶	۰/۵ تا ۲	۳ـ موارد معدودی وجود دارد که عمق از تاج تونل تا سطح زمین کمتر از عرض دهانه تونل است. در این موارد SRF را از ۲/۵ به ۵ افزایش دهید (ح را ببینید).
ک: ترکش ملایم سنگ (سنگ توپر)	۲/۵ تا ۵	۰/۱۶ تا ۰/۳۳	۵ تا ۱۰	
ل: ترکش شدید سنگ (سنگ توپر)	< ۲/۵	< ۰/۱۶	۱۰ تا ۲۰	
سنگ لهیده، جریان پلاستیک سنگ غیربکر، تحت تأثیر فشار زیاد				
م: فشار سنگ ناشی از لهیدگی ملایم			۵ تا ۱۰	
ن: فشار سنگ ناشی از لهیدگی شدید			۱۰ تا ۲۰	
سنگ تورمی، تداوم تورم به علت فعل و انفعالات شیمیایی بسته به حضور آب				

مثال:

قرار است یک فضای زیرزمینی دائمی در عمق ۲۳۰۰ متری احداث شود. توده سنگ دارای دو دسته درزه زبر، موجدار و هوا نزده است. شاخص RQD سنگ ها بین ۸۵ و ۹۵ درصد می باشد. مقاومت تک محوری سنگ ۱۷۰MPa است. اندازه تنشهای برجا به حدی است که احتمال ترکش سنک وجود دارد.

RQD=۹۰%

دو دسته درزه: Jn=۴

سطح درزه ها زبر و موج دار: Jr=۳

سطح درزه ها هوانزده: Ja=۱

محیط مرطوب : Jw=۱

H=۲۳۰۰m, تنش روباره= ۲۳۰۰× ۲۵۰۰=۵۷ MPa: تنش های خیلی زیاد و با توجه به مقاومت تک محوری سنگ ترکش سنگ محتمل است

SRF=۱۰–۲۰

$Q = (RQD/J_n)\ (J_r/J_a)\ (J_w/SRF)$ **: Q=(90/4)(3/1)(1/15)=4.5**

مقایسه روشهای مختلف رده بندی سنگ ها

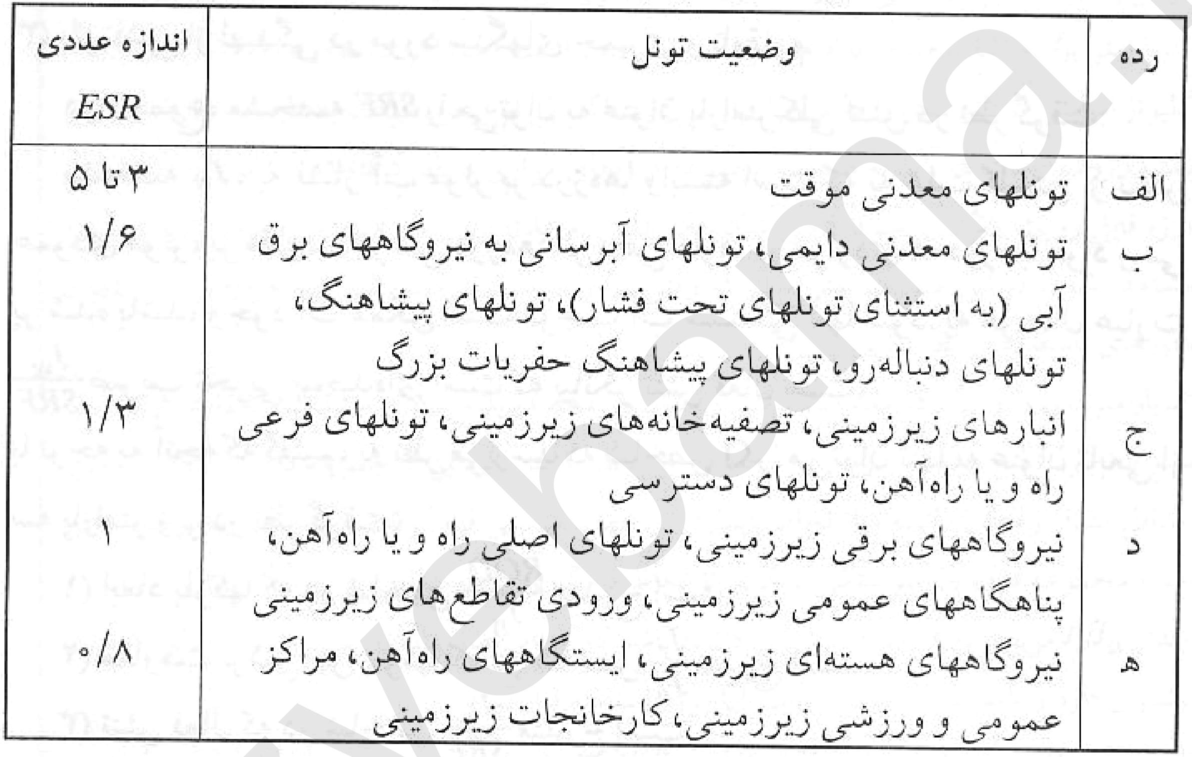
متداولترین روشهای رده بندی سنگ ها دو روش RMR و Q است.

- هر دو روش براساس ارزش گذاری عددی خصوصیات زمین شناسی، مشخصات هندسی تونل ها، ویژگیهای مهندسی سنگ ها و وضعیت آبهای زیرزمینی می باشد.
- تفاوت دو روش عمدتا مربوط به وزن آمارهای مختلقی است که به پارامترهای معینی نسبت می دهند.
- تفاوت دیگر استفاده از پارامترهای اختصاصی در دو سیستم است.
- در سیستم RMR مقاومت فشاری سنگ مستقیما نقش دارد و در سیستم Q رابطه این مشخصه در ارتباط با مقاومت برجای سنگ مد نظر قرار می گیرد.

$$RMR=9LnQ+44$$

ضریب اهمیت نگهداری ESR:

اندازه عددی ضریب *ESR* در وضعیت‌های مختلف



رده	وضعیت تونل	اندازه عددی *ESR*
الف	تونلهای معدنی موقت	۳ تا ۵
ب	تونلهای معدنی دایمی، تونلهای آبرسانی به نیروگاههای برق آبی (به استثنای تونلهای تحت فشار)، تونلهای پیشاهنگ، تونلهای دنباله‌رو، تونلهای پیشاهنگ حفریات بزرگ	۱/۶
ج	انبارهای زیرزمینی، تصفیه‌خانه‌های زیرزمینی، تونلهای فرعی راه و یا راه‌آهن، تونلهای دسترسی	۱/۳
د	نیروگاههای برقی زیرزمینی، تونلهای اصلی راه و یا راه‌آهن، پناهگاههای عمومی زیرزمینی، ورودی تقاطع‌های زیرزمینی	۱
هـ	نیروگاههای هسته‌ای زیرزمینی، ایستگاههای راه‌آهن، مراکز عمومی و ورزشی زیرزمینی، کارخانجات زیرزمینی	۰/۸

اگر دهانه فضای مثال صفحه قبل ۱۵ متر باشد

ESR=1.6 ⟶ De=15/1.6=9.4

موقعیت در ناحیه ۴ قرار می گیرد لذا پوشش لازم پیچ سنگ به فواصل ۲/۳ متر و شاتکریت به ضخامت ۴۰ تا ۵۰ میلیمتر پیش بینی می گردد.

فصل چهارم:

تعیین یا طراحی سیستم نگهداری و بار وارده بر آن براساس روشهای تجربی

روش های کلی طراحی

- روش های تجربی: بر اساس تجربیات و اطلاعات به دست آمده از پروژه های اجرا شده و تجزیه تحلیل آنها شکل گرفته اند.

- روش هاي تحليلي: براساس تئوریهای مواد و بسط روشهای ریاضی، عددی و شبیه سازیها، طراحی صورت می گیرد.

- روش های مشاهده ای: براساس قرائت و ثبت پارامترهای مختلفی در حین اجرا مانند تغییر شکل ها و تنش ها و مقایسه آنها با مقادیر پیش بینی شده به کمک روشهای تحلیلی و عددی، طرح تونل و پوشش آن اصلاح و نهایی می گردد.
  کامل شده این روش به نام روش اتریشی جدید نام دارد.

برای انتخاب روش طراحی مناسب باید به موارد زیر توجه داشت:

- شرایط تنش ها در محل و اثر حفاریهای قبلی بر آن
- اندرکنش بین تونل های مجاور هم
- مقاومت توده خاک و سنگ و رده بندی آن
- وضعیت آبهای زیرزمینی
- روش حفاری و کیفیت خاک و سنگ بعد ار حفاری
- نوع پوشش و سیستم نگهداری تونل

روش های تجربی

- روش ترزاقی
- روش پروتودیاکونوف
- روش لوفر و پاچر
- روش شاخص RQD
- روش شاخص RSR
- روش RMR
- روش Q

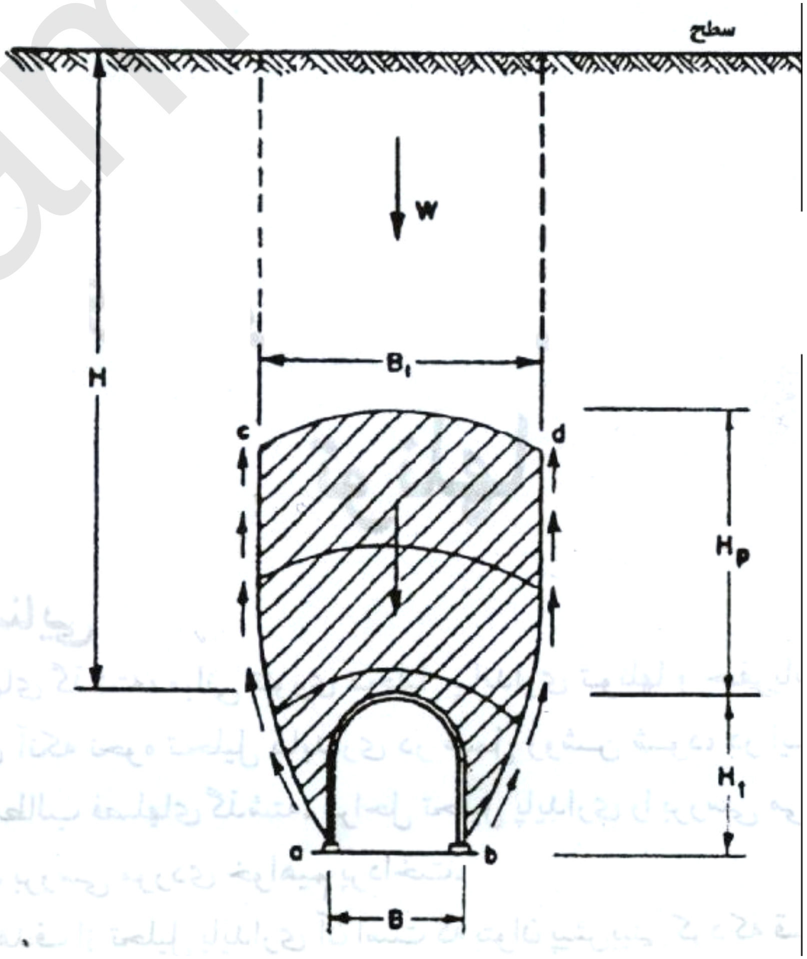
وضعیت سیستم نگهداری تونل با ت

ردیف	رده سنگ در رده‌بندی ترزاقی	بار سنگ برحسب متر	سیستم نگهداری
۱	سنگ‌بکر(محکم و یکپارچه)	۰	در حالت کلی سیستم نگهداری موردنیاز نیست. در صورت پوسته پوسته شدن و یا پوکیدن، نگهداری‌مختصری‌موردنیازاست.
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 ۰/۰۷۶ B	
۴	نسبتاً بلوکی و رگه‌ای	(۰/۰۷۶ تا ۰/۱)$(B+H_t)$	فشار جانبی وجود ندارد.
۵	خیلی بلوکی و رگه‌ای	(۰/۱ تا ۰/۳۳)$(B+H_t)$	فشار جانبی وجود ندارد یا مقدار آن کم است.
۶	کاملاً خردشده	۰/۳۳ $(B+H_t)$	فشار جانبی قابل توجه است. سیستم نگهداری همراه با پایه کناری موردنیاز است.
۷	سنگ فشارنده (لهیده) با عمق متوسط	(۰/۳۳ تا ۰/۶۴)$(B+H_t)$	فشار جانبی زیاد است. سیستم نگهداری همراه باپایه‌های‌کناری‌قوی‌موردنیازاست. حلقه‌های دایره‌ای کامل توصیه می‌شود.
۸	سنگ فشارنده با عمق زیاد	(۰/۶۴ تا ۱/۳۷)$(B+H_t)$	
۹	سنگ آماس‌پذیر	تا ۷۶ متر بدون‌توجه‌به $(B+H_t)$	سیستم نگهداری به صورت حلقه‌های دایره‌ای‌کامل موردنیاز است. درموارد شدید، سیستم نگهداری انعطاف‌پذیر و تسلیم‌شونده موردنیاز است.

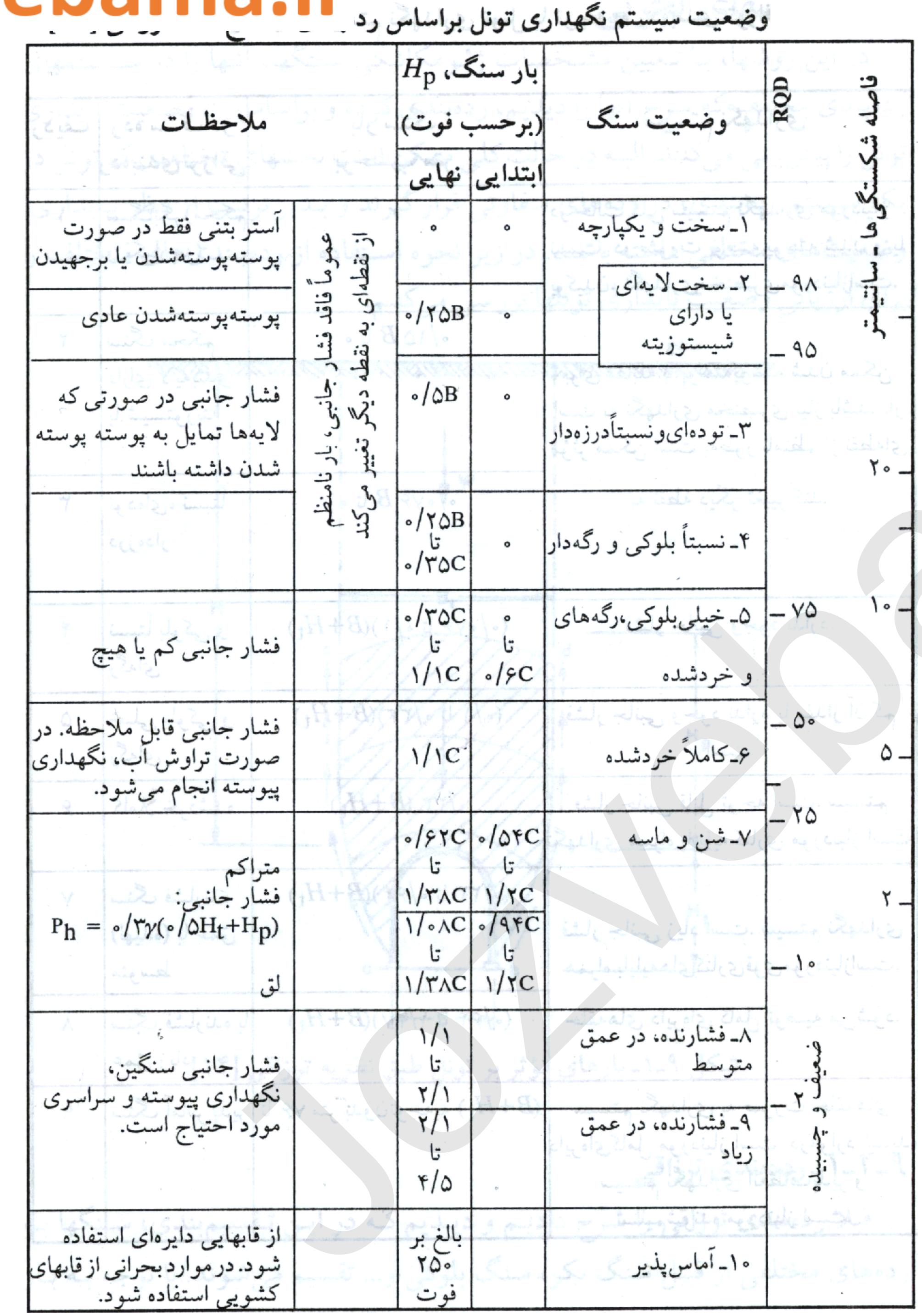
بار وارد بر تونل

طبق نظر ترزاقی: Hp

این روش برای سیستم نگهداری قابهای فولادی پیشنهاد شده است.



روش ترزاقی اصلاح شده



وضعیت سیستم نگهداری تونل براساس رد

فاصله شکستگی‌ها - سانتیمتر	RQD	وضعیت سنگ	بار سنگ، H_p (برحسب فوت)			ملاحظات
			ابتدایی	نهایی		
		۱ـ سخت و یکپارچه	۰	۰	عموماً فاقد فشار جانبی، بار نامنظم از نقطه‌ای به نقطه دیگر تغییر می‌کند	آستر بتنی فقط در صورت پوسته‌پوسته‌شدن یا برجهیدن
	۹۸ ۹۵	۲ـ سخت لایه‌ای یا دارای شیستوزیته	۰	۰/۲۵B		پوسته‌پوسته‌شدن عادی
۲۰		۳ـ توده‌ای و نسبتاً درزه‌دار	۰	۰/۵B		فشار جانبی در صورتی که لایه‌ها تمایل به پوسته پوسته شدن داشته باشند
		۴ـ نسبتاً بلوکی و رگه‌دار	۰	۰/۲۵B تا ۰/۳۵C		
۱۰	۷۵	۵ـ خیلی بلوکی، رگه‌ای و خردشده	۰ تا ۰/۶C	۰/۳۵C تا ۱/۱C		فشار جانبی کم یا هیچ
۵	۵۰	۶ـ کاملاً خردشده		۱/۱C		فشار جانبی قابل ملاحظه. در صورت تراوش آب، نگهداری پیوسته انجام می‌شود.
۲	۲۵	۷ـ شن و ماسه	۰/۵۴C تا ۱/۲C	۰/۶۲C تا ۱/۳۸C		متراکم فشار جانبی: $P_h = ۰/۳\gamma(۰/۵H_t+H_p)$
	۱۰		۰/۹۴C تا ۱/۲C	۱/۰۸C تا ۱/۳۸C		لق
ضعیف و چسبیده		۸ـ فشارنده، در عمق متوسط		۱/۱ تا ۲/۱		فشار جانبی سنگین، نگهداری پیوسته و سراسری مورد احتیاج است.
	۲	۹ـ فشارنده، در عمق زیاد		۲/۱ تا ۴/۵		
		۱۰ـ آماس‌پذیر		بالغ بر ۲۵۰ فوت		از قابهایی دایره‌ای استفاده شود. در موارد بحرانی از قابهای کشویی استفاده شود.

روش پروتودیاکونوف

براساس این روش فشار موثر بر یک تونل به صورت گنبد سهمی شکل است و ارتفاع این سهمی به اندازه زیر است:

$Hp=b/2f$

$b=B+2Htan(45+?/2)$

b: قاعده سهمی

B: عرض تونل، H: ارتفاع تونل

f: طبق جدول صفحه بعد تعیین می شود. که در زمین های شن و ماسه ای برابر tan? در نظر گرفته می شود.

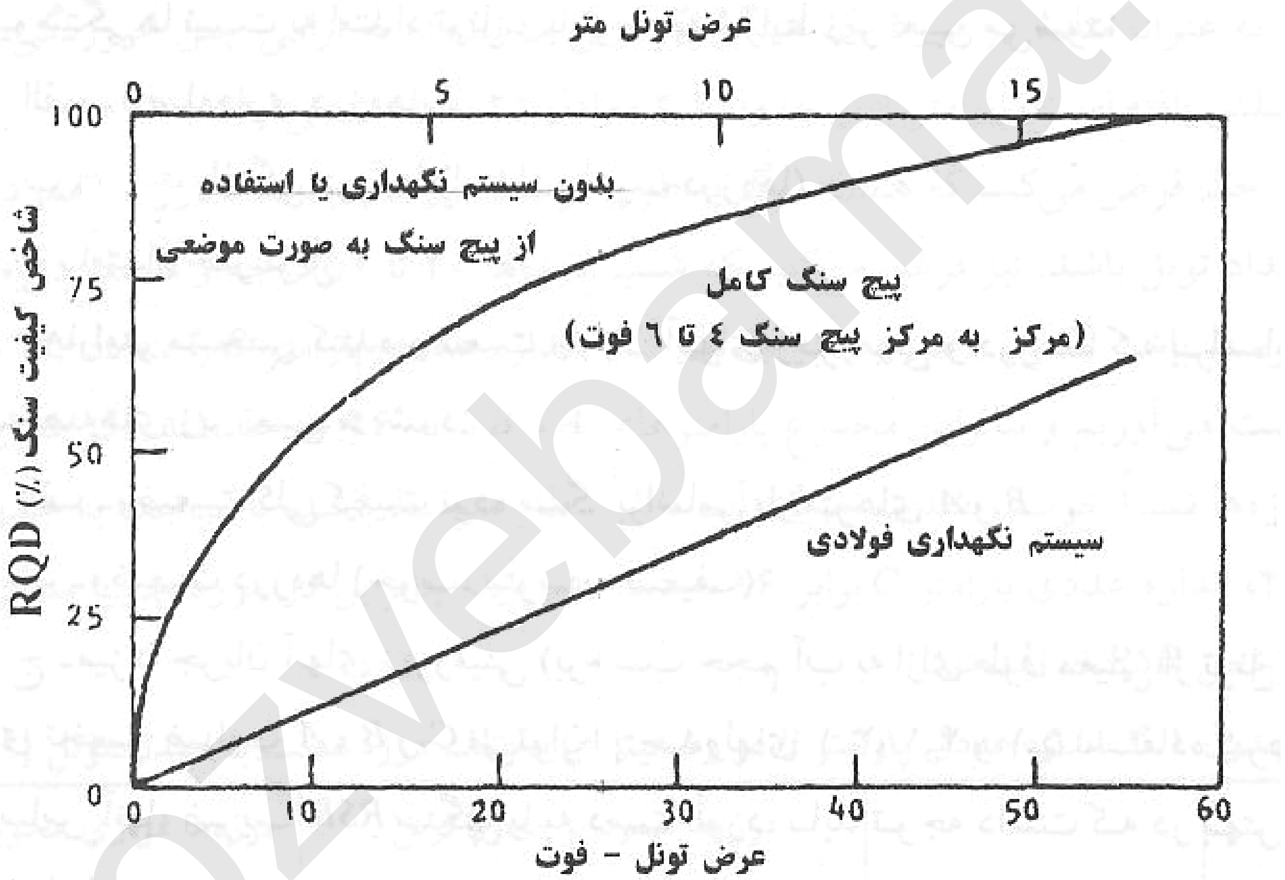
در این روش مجموع باری که به واحد طول تونل توسط سیستم نگهداری وارد می شود برابر است با:

$P=(1/3)\gamma b^2/f$

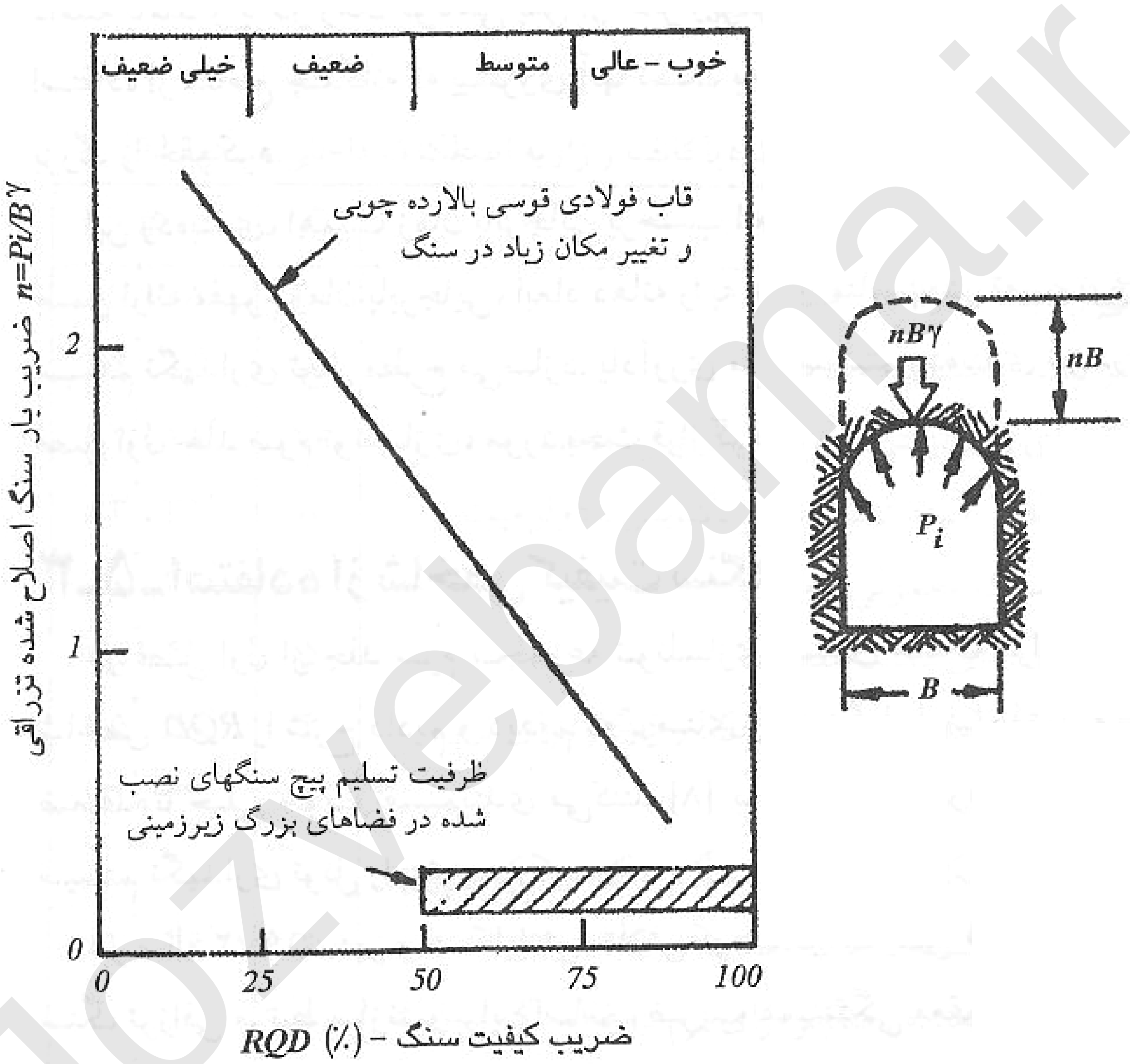
ضریب مقاومتی پروتودیاکانف و زاویه اصطکاک داخلی سنگها [۱]

نوع سنگ	f	φ
کوارتزیت ـ بازالت ـ سنگهای سخت	۲۰	۸۷°، ۰۸′
گرانیت سخت ـ ماسه سنگ سخت	۱۵	۸۶°، ۱۱′
رگه‌های کوارتزیتی ـ مرمر ـ دولومیت ـ گنایس سخت	۱۰	۸۴°، ۱۸′
سنگ‌آهک سخت ـ گرانیت نرم ـ مرمر ـ گنایس ـ دولومیت	۸	۸۳°، ۳۱′
ماسه سنگ معمولی ـ سنگ آهن	۶	۸۰°، ۳۲′
شیل ماسه‌ای ـ ماسه‌سنگ شیلی	۵	۷۵°، ۴۱′
شیست شیلی ـ ماسه سنگ ـ سنگ آهک و کنگلومرای نرم	۴	۷۵°، ۵۸′
شیست ضعیف ـ مارن سخت	۳	۷۱°، ۳۴′
شیست نرم ـ سنگ آهک خیلی نرم ـ سنگ نمک ـ خاک یخزده مارن ـ ماسه‌سنگ شکسته ـ خاک سخت شده گراولها ـ شیست خردشده ـ کنگلومرای نرم ـ زغالسنگ سخت	۲	۶۳°، ۲۶′
شیل سخت	۱/۵	۵۶°، ۱۹′
شیل سخت ـ زغال سنگ	۱	۴۵°
رس ماسه‌ای سبک	۰/۸	۳۸°، ۴۰′
پیت ـ رس ماسه‌ای ـ ماسه مرطوب	۰/۶	۳۰°، ۵۸′
ماسه ـ گراول دانه‌ریز ـ خاک ـ زغالسنگ شکسته	۰/۵	۲۶°، ۳۵′

تخمین سیستم نگهداری مورد نیاز تونل براساس شاخص RQD



این روش در ابتدا برای سیستم نگهداری قابهای فولادی پیشنهاد شد ولی برای سایر سیستم ها نیز به طور تقریبی استفاده می شود.



رابطه تقریبی بین ضریب بار سنگ تزراقی و RQD [۱]

طراحی مشخصات پوشش براساس RSR

این روش در ابتدا برای سیستم نگهداری شاتکریت پیشنهاد شد ولی برای سایر سیستم ها نیز به طور تقریبی استفاده می شود.

برای فاصله پیچ سنگ ها به قطر ۲۵mm
و بار عمل۱۱۰kPa یا ۲۴۰۰۰ پوند:

$$S = 0.3048(\frac{24}{W})^{0.5}$$

برای فاصله پیچ سنگ به قطر ۱۹mm:

$$S = 0.3048(\frac{13.5}{W})^{0.5}$$

که w: بار سنگ بر حسب kPa، S: فاصله پیچ سنگ ها بر حسب متر

برای ضخامت شاتکریت:

$$t = 1 + \frac{W}{1.25} \quad OR \quad t = \frac{D}{150}(65 - RSR)$$

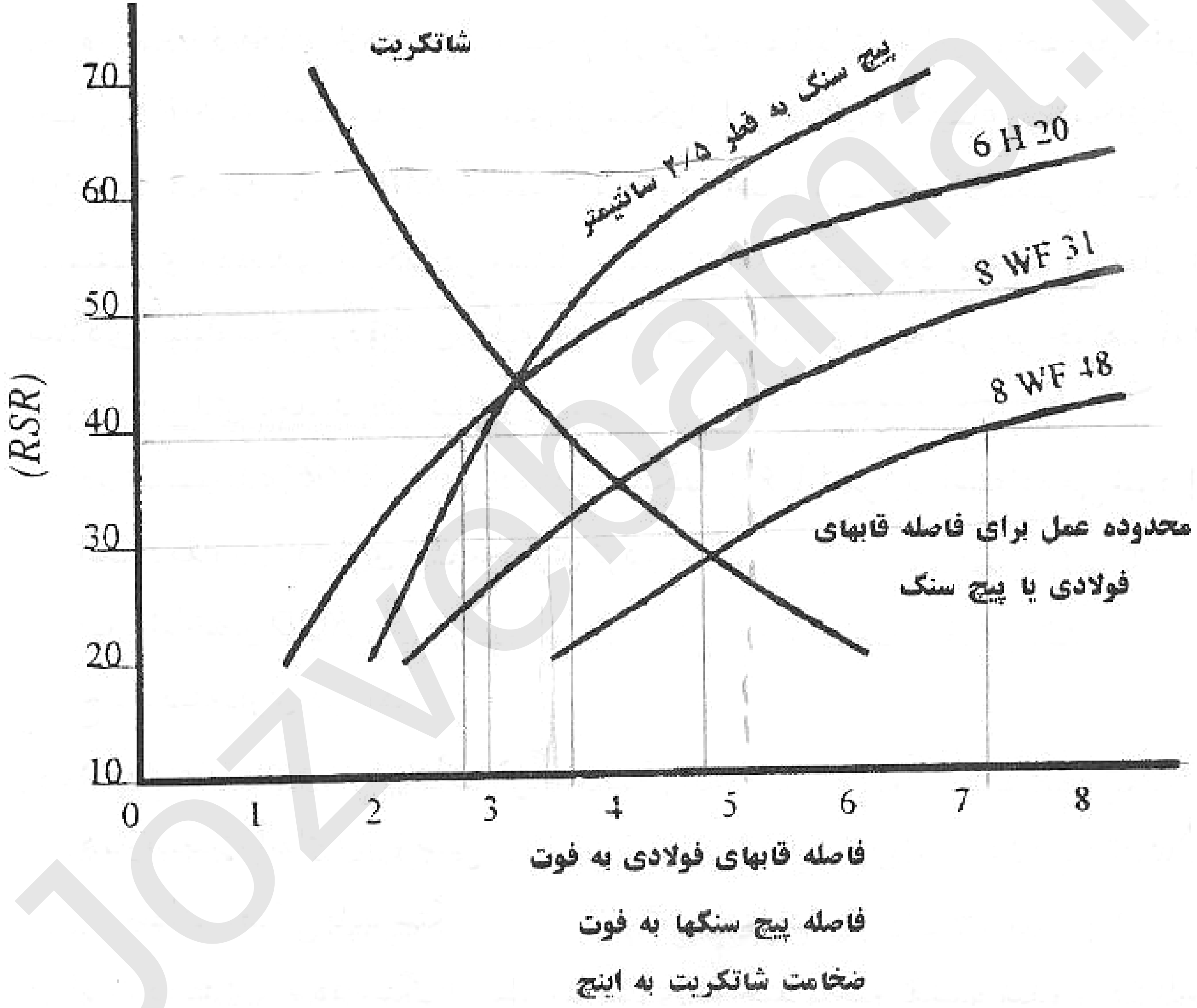
w: **بار سنگ برحسب** lb/ft2
t: **ضخامت شاتکریت بر حسب اینچ**
D: **قطر تونل بر حسب فوت**

به کمک رابطه زیر بار سنگ را محاسبه می کنیم:

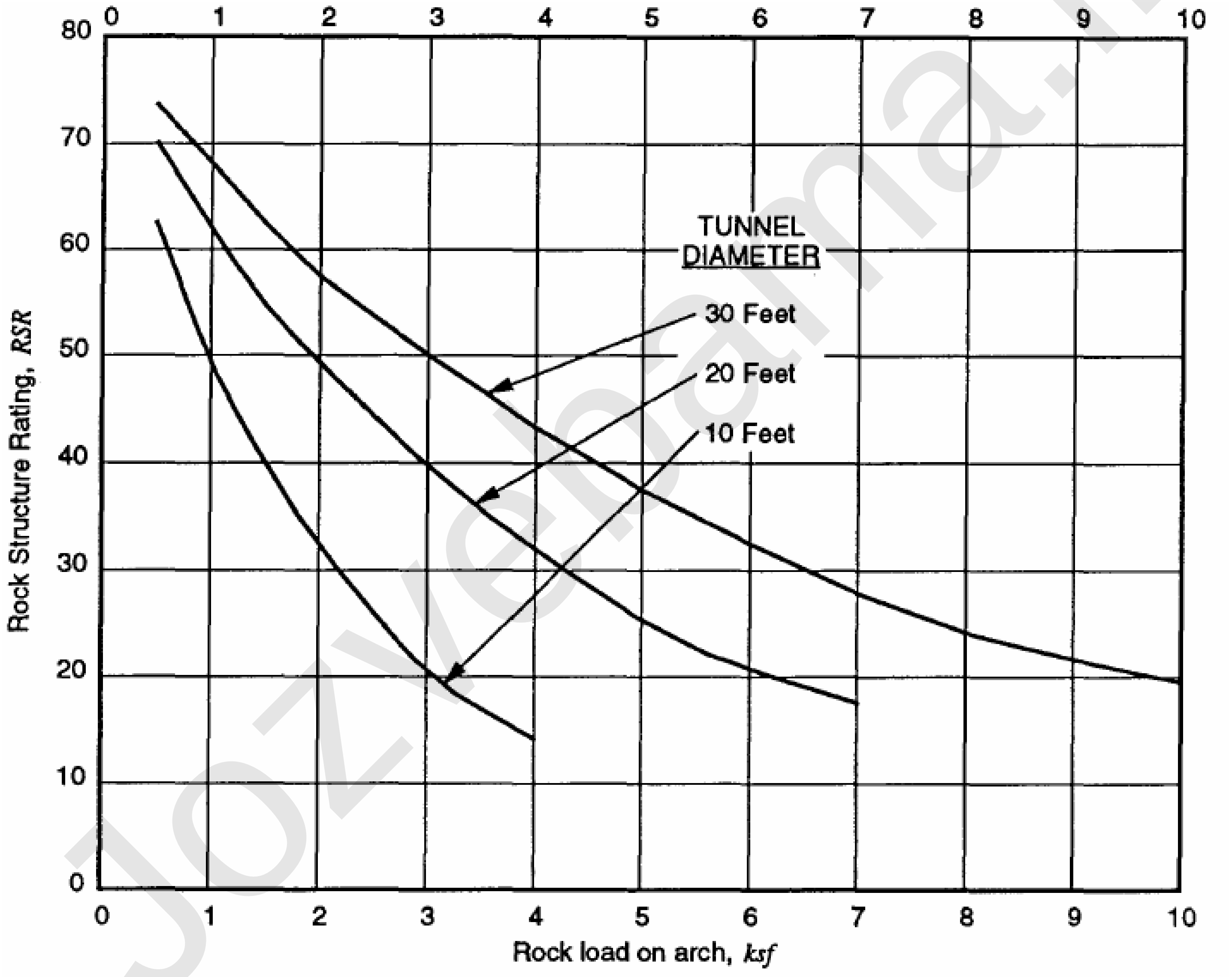
$$w = 0.26(B + H)[(\frac{8880}{RSR + 30}) - 80]$$

که در آن B و H به ترتیب عرض و ارتفاع تونل بر حسب متر و w بار سنگ بر حسب kPa می باشد.

تعیین مشخصات سیستم نگهداری براساس شاخص RSR برای تونلی دایره ای به قطر ۶ متر



بار سنگ بر روی سقف تونل براساس شاخص ساختار سنگ RSR



مثال:

تونلی به قطر ۶ متر در توده سنگ گرانیتی با سختی متوسط که شگستگی های ملایمی دارد حفر می شود. مقدار RSR=57 به دست آمده است. سیستم مناسب نگهداری را برای این تونل به دست آورید.

ضخامت شاتکریت برابر است با:

$$t=\frac{D}{150}(65-RSR)=\frac{6(3.28)}{150}(65-57)=1in$$

بار سنگ برابر است با:

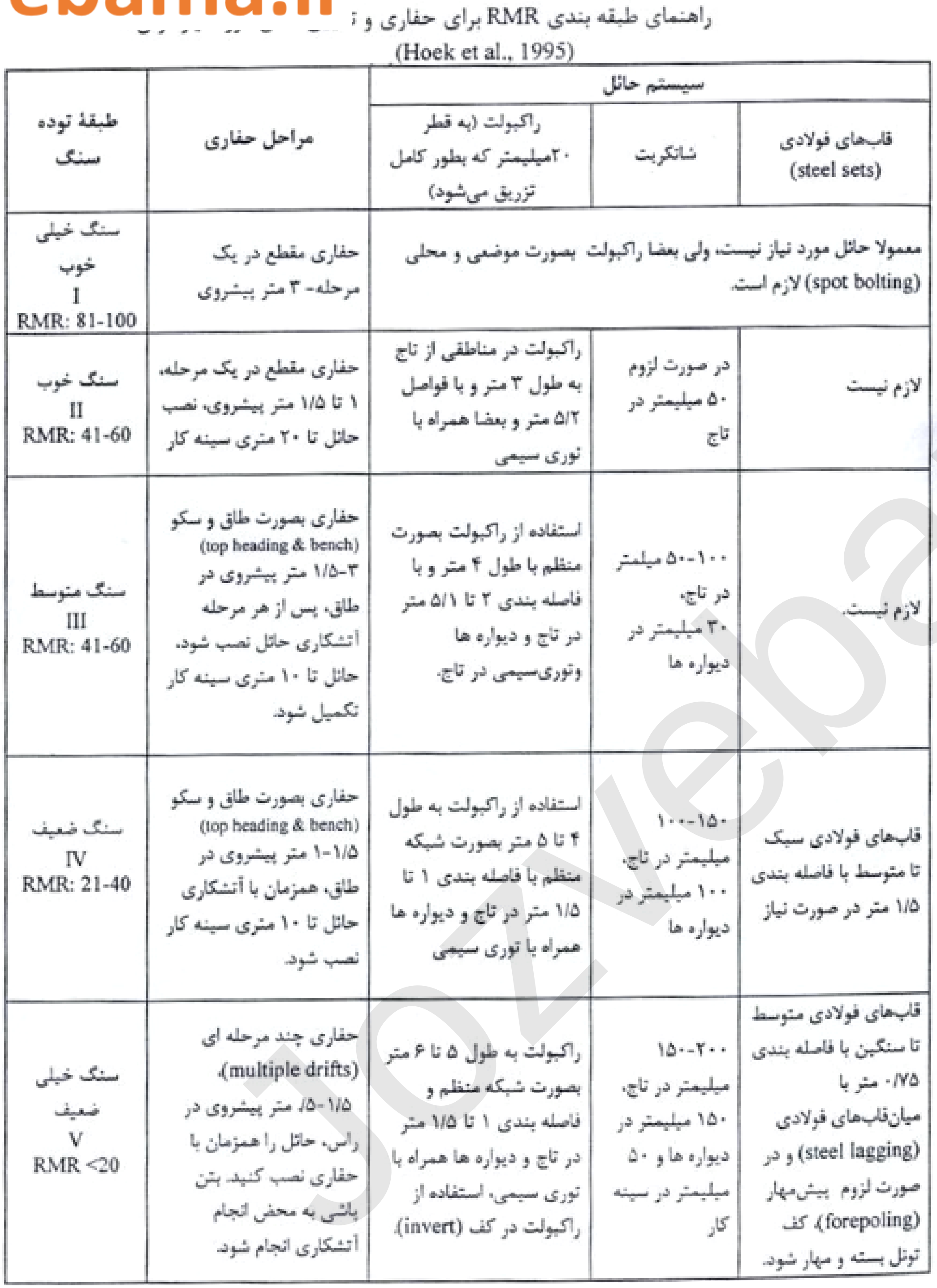
$$w=0.26\times(6+6)[(\frac{8880}{57+30})-80]=69\ \ kPa$$

از روی نمودار صفحه قبل داریم:

$$w=1.4kbl/\ ft^{2}\ =70kPa$$

تعیین سیستم پوشش تونل و روش حفاری برای تونل ها براساس روش RMR (رده بندی ژئومکانیکی بینیاوسکی):

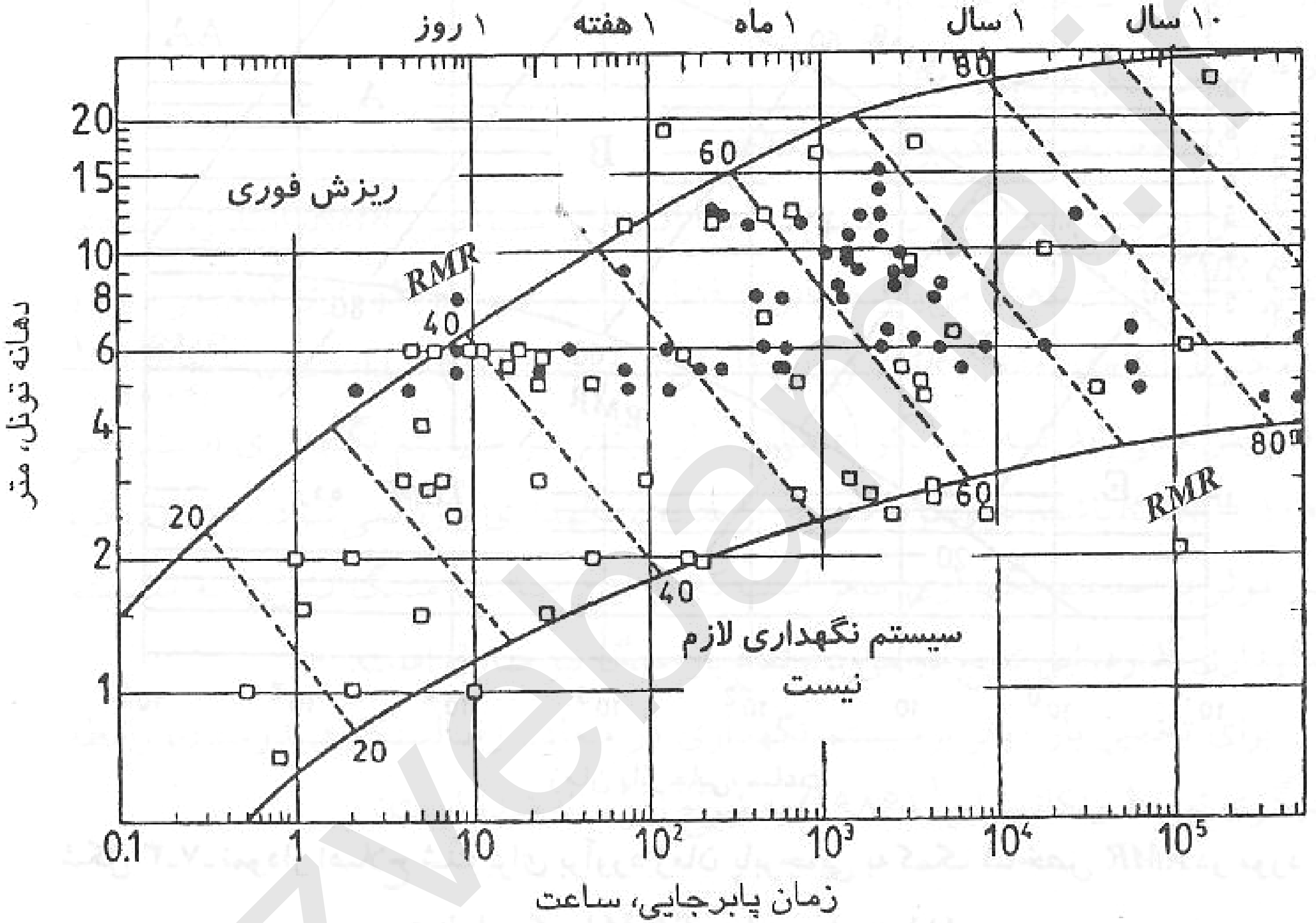
- با شکل نعل اسبی
- دهانه فعال ۱۰ متر
- روش حفاری آتشباری
- تونل های با عمق کمتر از ۹۰۰ متر



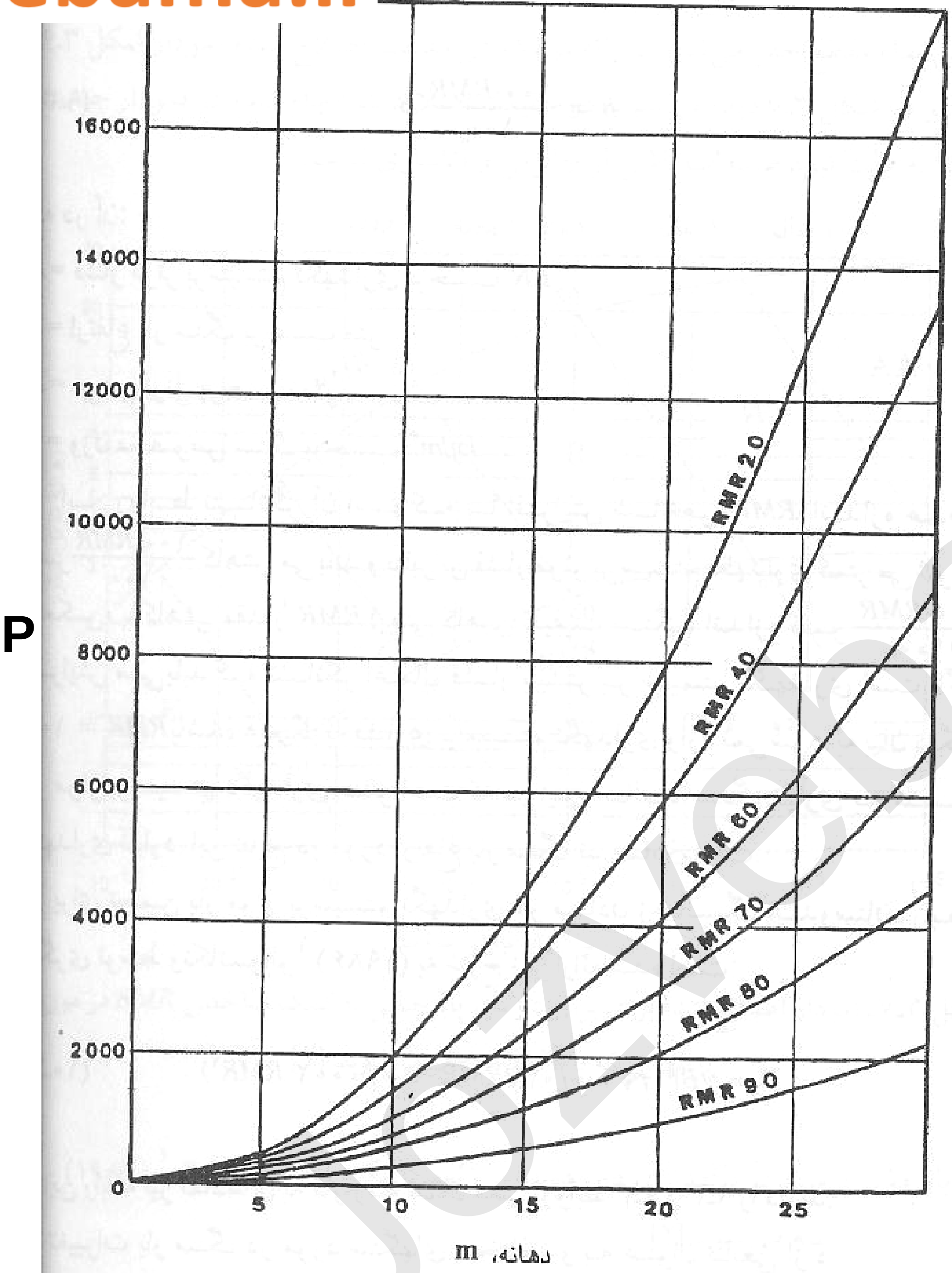
راهنمای طبقه بندی RMR برای حفاری و

(Hoek et al., 1995)

سیستم حائل			مراحل حفاری	طبقه توده سنگ
قاب‌های فولادی (steel sets)	شاتکریت	راکبولت (به قطر ۲۰میلیمتر که بطور کامل تزریق می‌شود)		
معمولا حائل مورد نیاز نیست، ولی بعضا راکبولت بصورت موضعی و محلی (spot bolting) لازم است.			حفاری مقطع در یک مرحله- ۳ متر پیشروی	سنگ خیلی خوب I RMR: 81-100
لازم نیست	در صورت لزوم ۵۰ میلیمتر در تاج	راکبولت در مناطقی از تاج به طول ۳ متر و با فواصل ۵/۲ متر و بعضا همراه با توری سیمی	حفاری مقطع در یک مرحله، ۱ تا ۱/۵ متر پیشروی، نصب حائل تا ۲۰ متری سینه کار	سنگ خوب II RMR: 41-60
لازم نیست.	۱۰۰-۵۰ میلمتر در تاج، ۳۰ میلیمتر در دیواره ها	استفاده از راکبولت بصورت منظم با طول ۴ متر و با فاصله بندی ۲ تا ۵/۱ متر در تاج و دیواره ها وتوری‌سیمی در تاج.	حفاری بصورت طاق و سکو (top heading & bench) ۳-۱/۵ متر پیشروی در طاق، پس از هر مرحله آتشکاری حائل نصب شود. حائل تا ۱۰ متری سینه کار تکمیل شود.	سنگ متوسط III RMR: 41-60
قاب‌های فولادی سبک تا متوسط با فاصله بندی ۱/۵ متر در صورت نیاز	۱۵۰-۱۰۰ میلیمتر در تاج، ۱۰۰ میلیمتر در دیواره ها	استفاده از راکبولت به طول ۴ تا ۵ متر بصورت شبکه منظم با فاصله بندی ۱ تا ۱/۵ متر در تاج و دیواره ها همراه با توری سیمی	حفاری بصورت طاق و سکو (top heading & bench) ۱/۵-۱ متر پیشروی در طاق، همزمان با آتشکاری حائل تا ۱۰ متری سینه کار نصب شود.	سنگ ضعیف IV RMR: 21-40
قاب‌های فولادی متوسط تا سنگین با فاصله بندی ۰/۷۵ متر با میان‌قاب‌های فولادی (steel lagging) و در صورت لزوم پیش‌مهار (forepoling)، کف تونل بسته و مهار شود.	۲۰۰-۱۵۰ میلیمتر در تاج، ۱۵۰ میلیمتر در دیواره ها و ۵۰ میلیمتر در سینه کار	راکبولت به طول ۵ تا ۶ متر بصورت شبکه منظم و فاصله بندی ۱ تا ۱/۵ متر در تاج و دیواره ها همراه با توری سیمی، استفاده از راکبولت در کف (invert).	حفاری چند مرحله ای (multiple drifts)، ۱/۵-۵/۰ متر پیشروی در راس، حائل را همزمان با حفاری نصب کنید. بتن پاشی به محض انجام آتشکاری انجام شود.	سنگ خیلی ضعیف V RMR <20



شکل ۳ـ۶ـ رابطه بین شاخص RMR و زمان پابرجایی تونلها. در این شکل نماد ● نشانگر نتایج حاصل از ریزش سقف معادن، علامت □ نمایانگر ریزش سقف تونلها و منحنی‌های تراز نشانگر محدوده کاربرد است [۲]



تغییرات بار سنگ به عنوان تابعی از دهانه سقف در سنگ‌های مختلف در رده‌بندی ژئومکانیکی [۲]

بار سنگ وارد بر سیستم نگهداری براساس RMR:

$$P = \left(\frac{100-RMR}{100}\right)\gamma B = \gamma h$$

$$\frac{100-RMR}{100} B = h$$

P: **بار موثر بر سیستم نگهداری بر حسب** kN/m

h: **ارتفاع بار سنگ بر حسب متر**

B: **عرض تونل بر حسب متر**

ɣ: **وزن مخصوص سنگ بر حسب** kg/m3

مثال:

قرار است تونلی به قطر ۶ متر در توده سنگ کوارتزی نسبتا هوازده حفر شود. پارامترهای طبقه بندی سنگ به شرح زیر تعیین شده است. سیستم نگهداری مناسب را برای تونل تعیین کنید.

مشخصه	مقدار	امتیاز
مقاومت ماده سنگ	۱۲۵ MPa	۱۲
RQD	۸۰–۹۰ ٪	۱۷
فاصله ناپیوستگی ها	۰/۳–۱ m	۱۲
وضعیت ناپیوستگی ها (درزه ها پیوسته، سطوح کمی زبر، جدایش ۱mm، دیواره سنگ به شدت هوازده بدون پرکننده		۲۰
شرایط آب زیرزمینی	جریان متوسط (سنگ مرطوب)	۷
RMR پایه توده سنگ		۶۸
تعیین جهات درزه		–۵

RMR= 68-5=63

بنابراین توده سنگ در رده II یعنی سنگ خوب قرار می گیرد.
براساس نمودار صفحه قبل زمان پابرجایی حدودا برابر ۴۰۰۰ ساعت یا ۶ ماه می باشد.

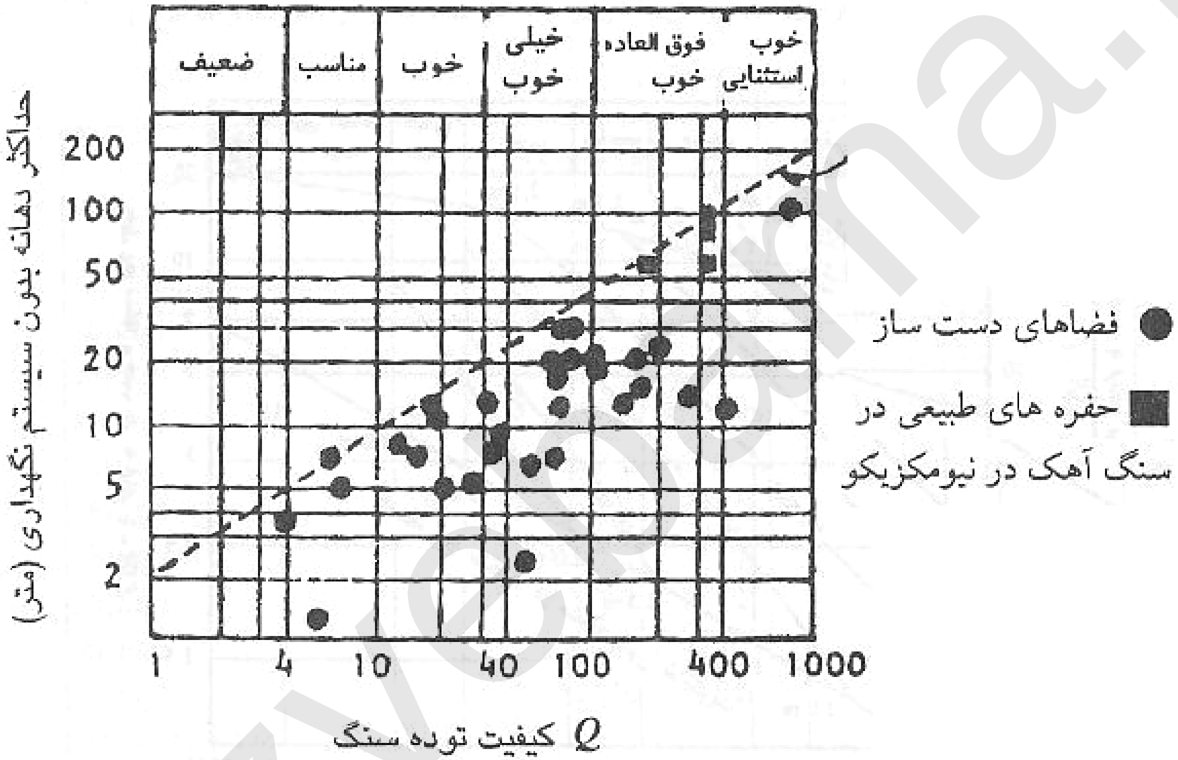
براساس جدول RMR سیستم نگهداری در تاج تونل، پیچ سنگ به طول ۳ متر و فواصل ۲/۵ متر یا شاتکریت به ضخامت ۵۰mm همراه با توری سیمی توصیه می شود.

بار سنگ برابر است با:

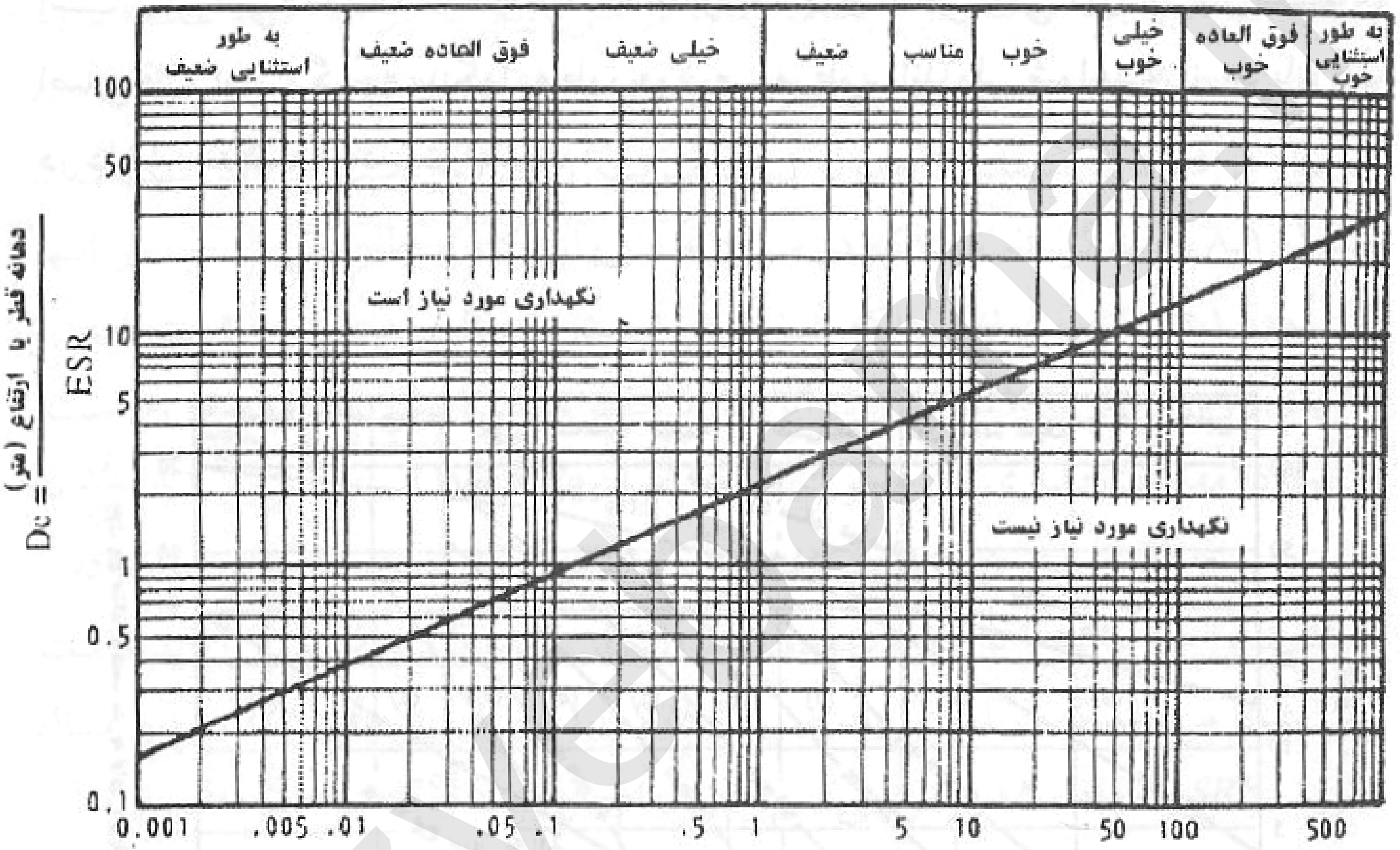
$$P = (\frac{100 - RMR}{100})\gamma B = \frac{100 - RMR}{100} \times 2.8 \times 6 = 6.26 kN / m$$

حفاری به صورت تمام مقطع با گام های حفاری ۱ تا ۱/۵ متر و نصب حائل تا ۲۰ متری جبهه حفاری پیشنهاد می گردد.

روش بارتون وهمکاران (Q) (NGI)



حفریات اجرا شده در توده سنگهای با شاخص Q مختلف بدون نصب سیستم نگهداری [۷]



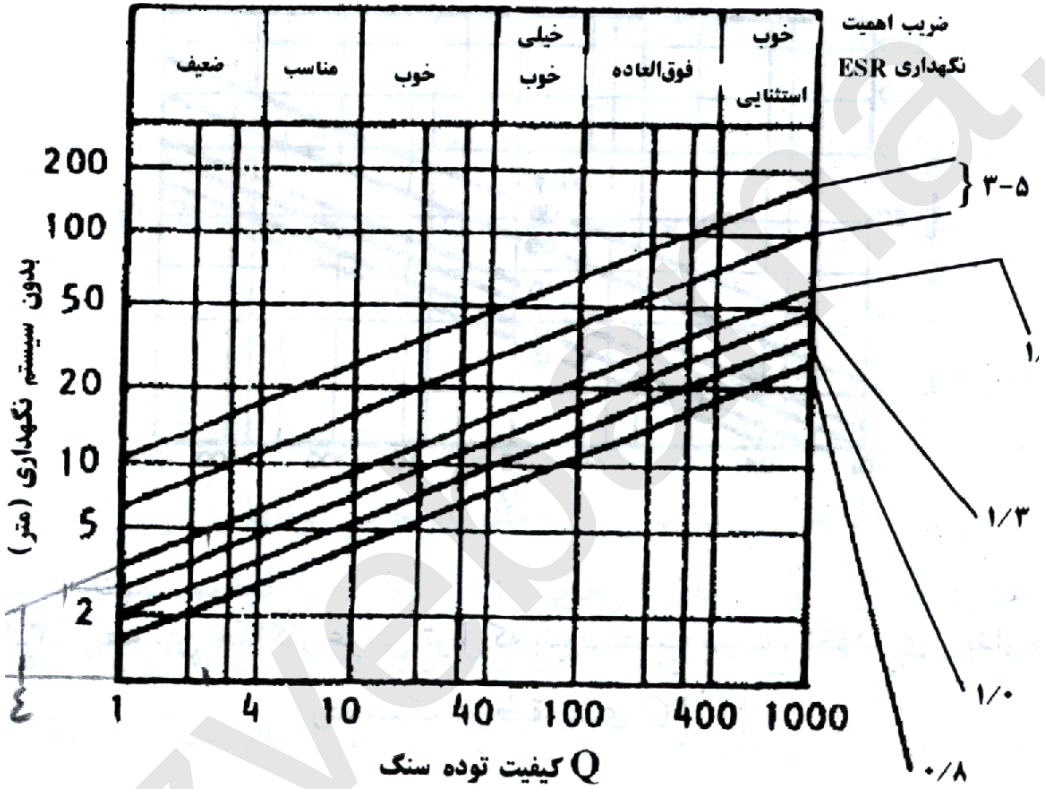
$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

De: دهانه فعال تونل

ESR: ضریب اهمیت نگهداری تونل

این روش برای طراحی پوشش دائمی پیشنهاد شد. برای پوشش موقت یا Q را ۵ برابر می کنیم یا ESR را ۱/۵ برابر در نظر می گیریم.

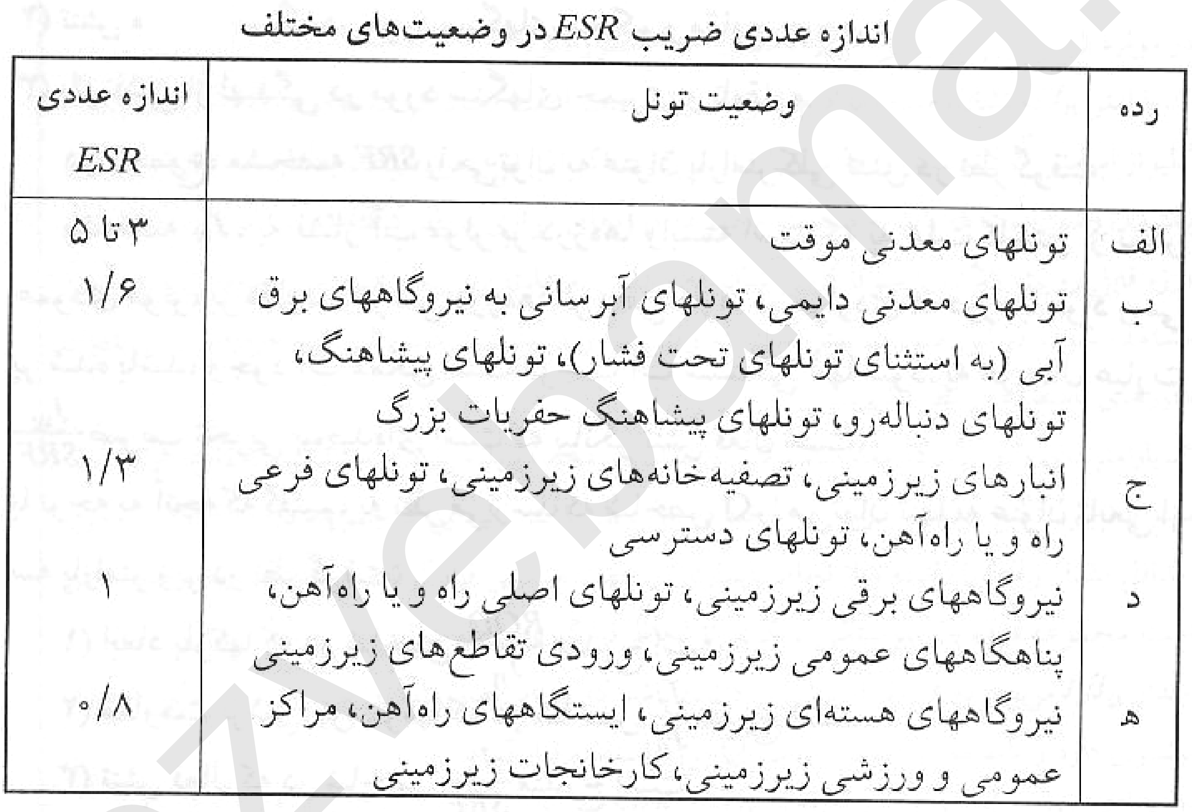
حداکثر دهانه بدون نیاز به پوشش طبق روش Q



حداکثر دهانه فضاهای زیرزمینی طبیعی و مصنوعی در سنگهای مخت
که بدون نصب وسایل نگهداری پابرجا می‌مانند [۲]

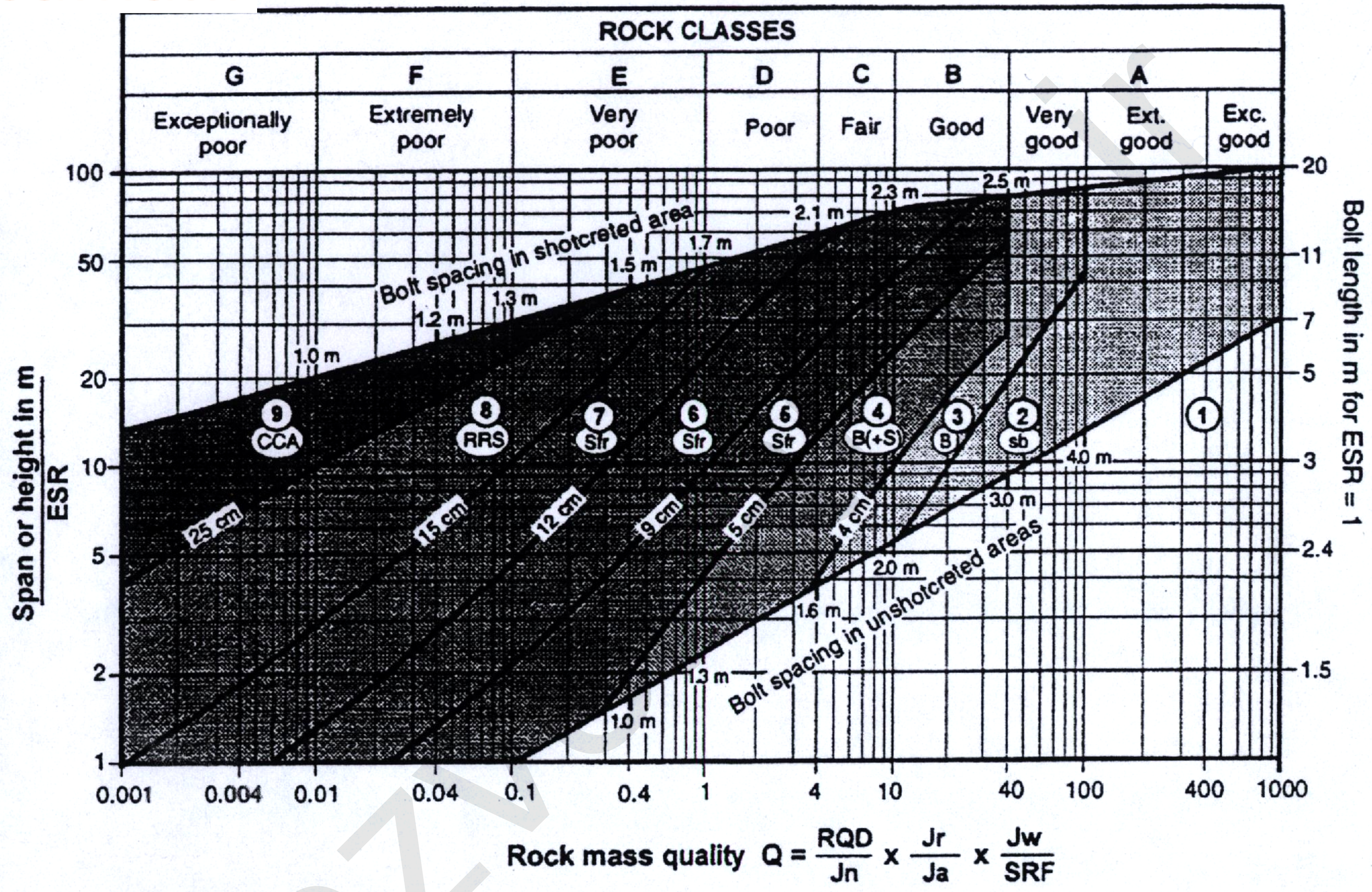
$$\text{Span}=2(\text{ESR})Q^{0.2}$$

ضریب اهمیت نگهداری ESR:



اندازه عددی ضریب ESR در وضعیت‌های مختلف

رده	وضعیت تونل	اندازه عددی ESR
الف	تونلهای معدنی موقت	۳ تا ۵
ب	تونلهای معدنی دایمی، تونلهای آبرسانی به نیروگاههای برق آبی (به استثنای تونلهای تحت فشار)، تونلهای پیشاهنگ، تونلهای دنباله‌رو، تونلهای پیشاهنگ حفریات بزرگ	۱/۶
ج	انبارهای زیرزمینی، تصفیه‌خانه‌های زیرزمینی، تونلهای فرعی راه و یا راه‌آهن، تونلهای دسترسی	۱/۳
د	نیروگاههای برقی زیرزمینی، تونلهای اصلی راه و یا راه‌آهن، پناهگاههای عمومی زیرزمینی، ورودی تقاطع‌های زیرزمینی	۱
ه	نیروگاههای هسته‌ای زیرزمینی، ایستگاههای راه‌آهن، مراکز عمومی و ورزشی زیرزمینی، کارخانجات زیرزمینی	۰/۸



Rock mass quality $Q = \frac{RQD}{Jn} \times \frac{Jr}{Ja} \times \frac{Jw}{SRF}$

REINFORCEMENT CATEGORIES:

1) Unsupported
2) Spot bolting, **sb**
3) Systematic bolting, **B**
4) Systematic bolting, (and unreinforced shotcrete, 4 - 10 cm), **B(+S)**
5) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 5 - 9 cm, **Sfr + B**
6) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 9- 12 cm, **Sfr + B**
7) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 12 - 15 cm, **Sfr + B**
8) Fibre reinforced shotcrete, > 15 cm, reinforced ribs of shotcrete and bolting, **Sfr, RRS+B**
9) Cast concrete lining, **CCA**

۱– بدون نیاز به ساخت سیستم نگهداری

۲– مهار زنی موضعی

۳– مهار زنی به صورت متقارن

۴– مهار زنی به صورت متقارن به اضافه شاتکریت غیر مسلح ۴–۱۰cm

۵– شاتکریت مسلح شده با الیاف (فولادی) ۵–۹cm به اضافه مهار زنی

۶– شاتکریت مسلح شده با الیاف (فولادی) ۹–۱۲cm به اضافه مهار زنی

۷– شاتکریت مسلح شده با الیاف (فولادی) ۱۲–۱۵cm به اضافه مهار زنی

۸– شاتکریت مسلح شده با الیاف (فولادی) >15 cm به اضافه مهار زنی
یا شاتکریت مسلح شده با شبکه های فولادی به اضافه مهار زنی

۹– پوشش بتنی درجا ریخته شده

مثال:

قرار است یک تونل آبی به قطر ۹ متر در توده سنگ با مشخصات زیر حفر شود:

دسته درزه ۱: صاف و صفحه ای Jr=1، Ja=4، ۱۵ درزه در هر متر.

دسته درزه ۲: صاف و موج دار Jr=2، Ja=2، ۵ درزه در هر متر.

بنابراین: **Jv=15+5=20**

RQD=115-3.3Jv=115-3.3*20=50%

Jn=4

حداقل جریان آب: **Jw=1**

مقاومت فشاری تک محوری σ_c**=40Mpa**

تنش اصلی ماکزیمم σ_1**=3Mpa**

تنش اصلی مینیمم σ_3**=1Mpa**

بنابراین: $\sigma_1/\sigma_3=3$, $\sigma_c/\sigma_1=13.3$

در نتیجه **SRF=1**

Q=(RQD/Jn)*(Jr/Ja)*(Jw/SRF)=(50/4)*(1/4)*(1/1)=3.1

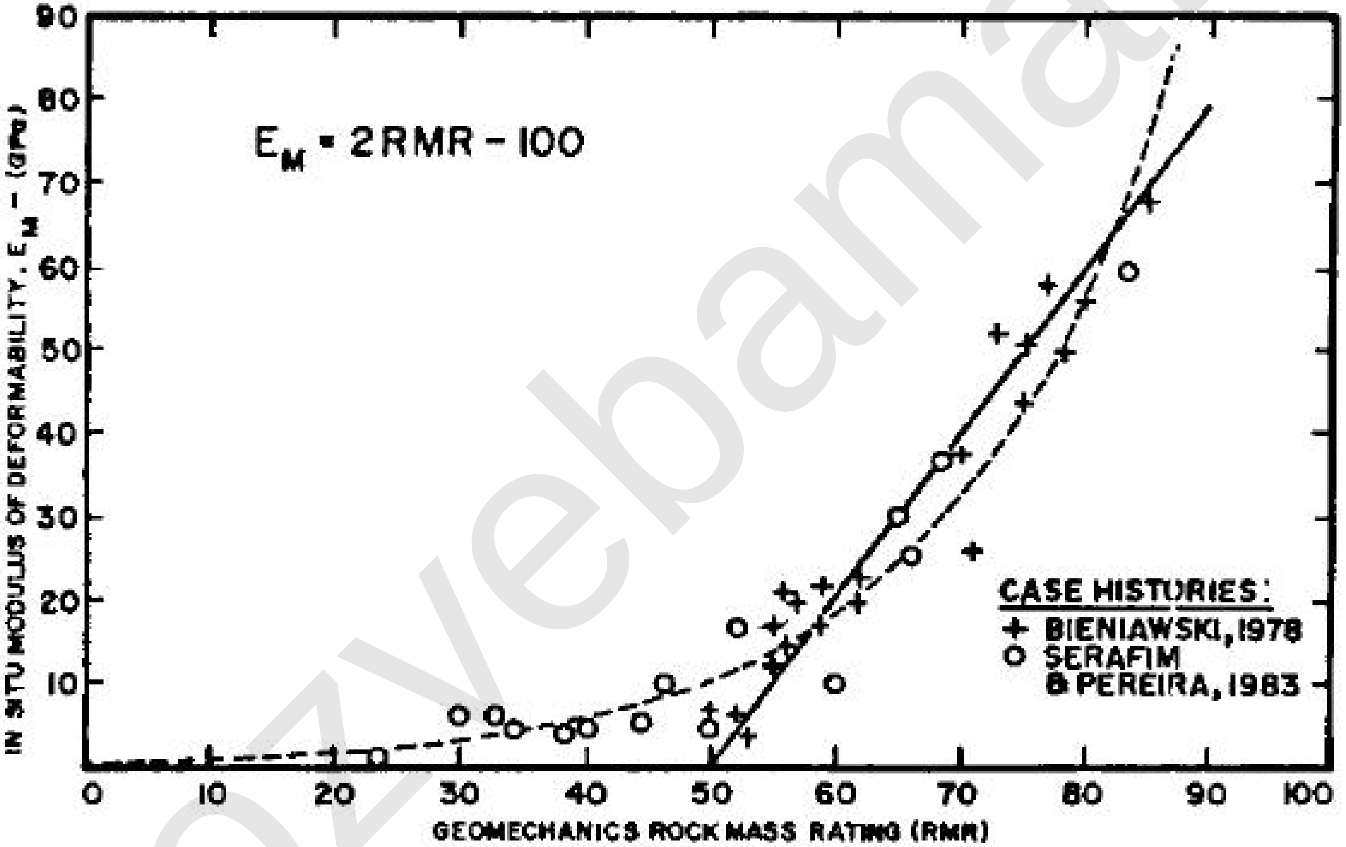
لذا توده سنگ ضعیف است. برای تخمین سیستم نگهداری داریم:

B=9m , ESR=1.6, De=B/ESR=5.6

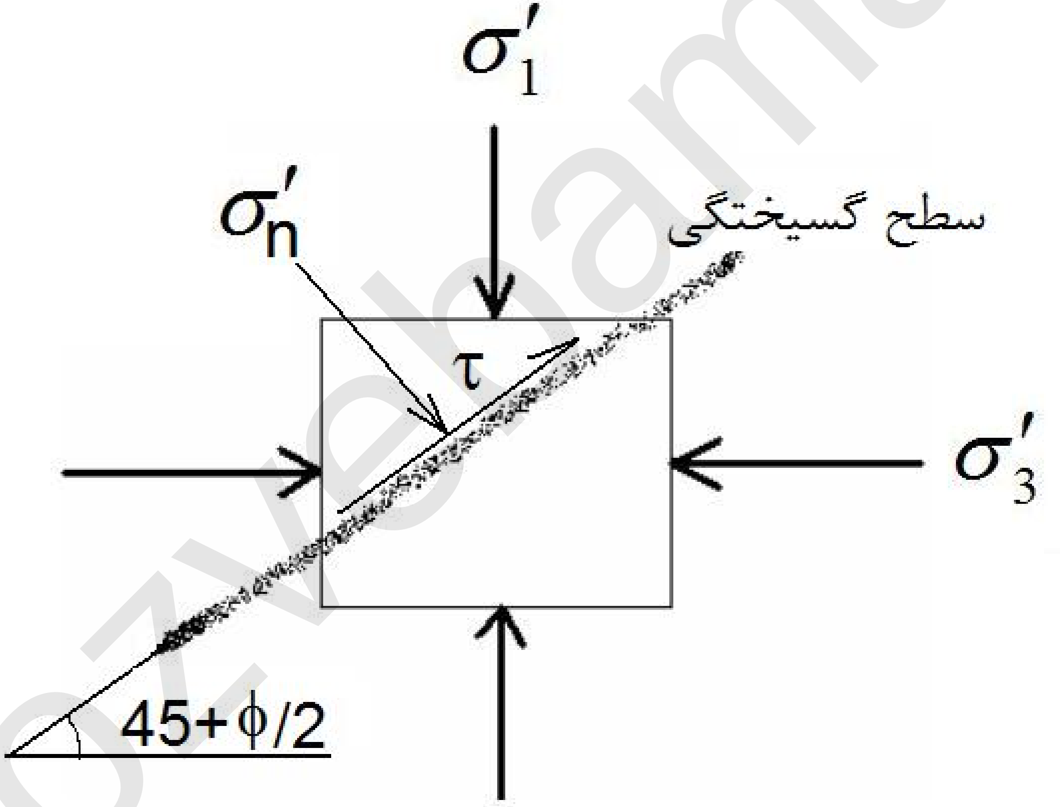
در نتیجه رده نگهداری در ناحیه ۴ قرار می گیرد. یعنی سیستم نگهداری دائمی مرکب از پیچ سنگ های متقارن (به فواصل ۱ متر و طول تقریبی ۳ متر) و شاتکریت به ضخامت ۴ تا ۵ سانتی متر خواهد بود و سیستم نگهداری موقت لازم نیست.

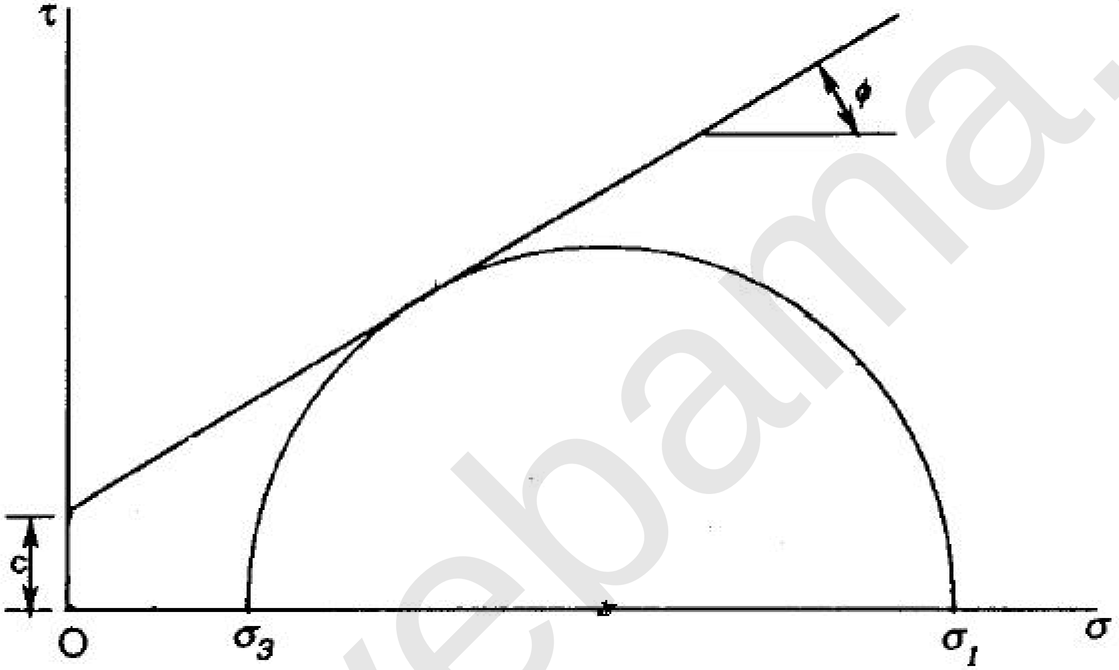
فصل پنجم: مقاومت توده های سنگی

تخمین مدول الاستیسیته برجای توده سنگ و خاک براساس رده بندی سنگ RMR



مقاومت برشی موهر – کولمب


σ'_1
σ'_n
سطح گسیختگی
τ
σ'_3
45+ϕ/2



$$\tau = c + \sigma_n \times \tan \phi$$

τ : مقاومت برشی توده خاک و سنگ

ϕ: زاویه اصطکاک داخلی بر حسب درجه و c: چسبندگی بر حسب kg/cm^2

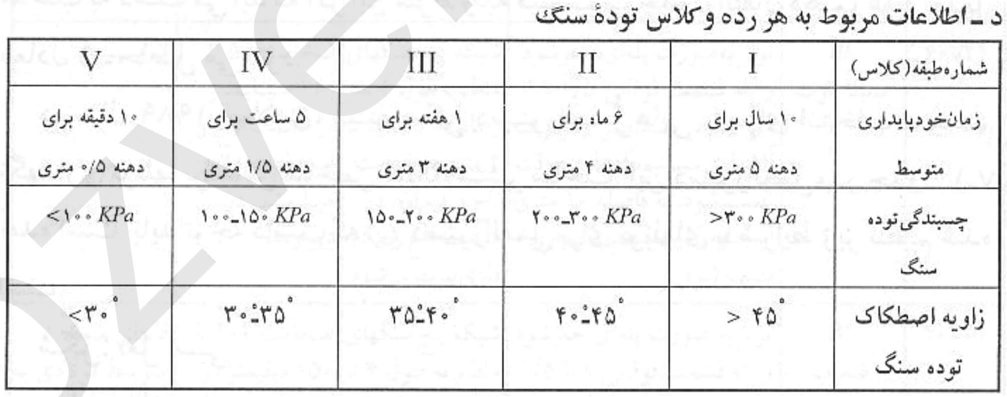
σ_n: تنش عمود بر سطح برش

تخمین پارامترهای مقاومت برشی پوش گسیختگی موهر–کولمب

۱– با انجام آزمایش های برش مستقیم و یا سه محوری بزرگ مقیاس:
مشکل اصلی انجام آزمایش با ابعاد بزرگ است.

۲– با انجام آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس برجا

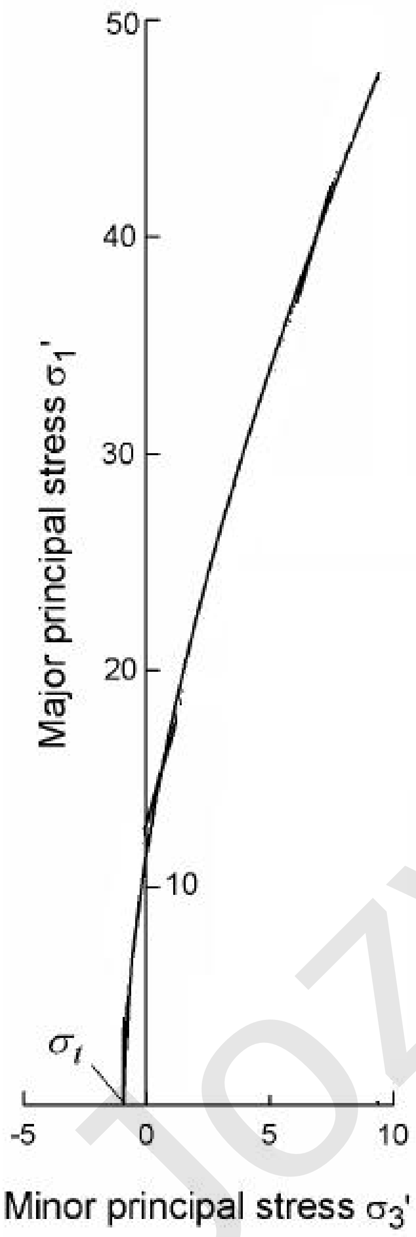
۳– براساس نتایج رده بندی روش RMR سنگ ها



د ـ اطلاعات مربوط به هر رده و کلاس تودهٔ سنگ

شماره‌طبقه (کلاس)	I	II	III	IV	V
زمان‌خودپایداری متوسط	۱۰ سال برای دهنه ۵ متری	۶ ماه برای دهنه ۴ متری	۱ هفته برای دهنه ۳ متری	۵ ساعت برای دهنه ۱/۵ متری	۱۰ دقیقه برای دهنه ۰/۵ متری
چسبندگی توده سنگ	>۳۰۰ KPa	۲۰۰ـ۳۰۰ KPa	۱۵۰ـ۲۰۰ KPa	۱۰۰ـ۱۵۰ KPa	<۱۰۰ KPa
زاویه اصطکاک توده سنگ	> ۴۵°	۴۰ـ۴۵°	۳۵ـ۴۰°	۳۰ـ۳۵°	<۳۰°

مقاومت برشی هوک– براون



$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\,\sigma_c\,\sigma_3 + s\,\sigma_c^2}$$

σ_1: تنش اصلی حداکثر

σ_3: تنش اصلی حداقل

σ_c : مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر (سالم بدون درزه و ترک)

sو m : پارامترهایی هستند که به ویژگیهای سنگ بستگی دارند و به صورت تجربی از روی رده بندی سنگ به روش RMR و یا Q تعیین می شوند.

σ_C : مقاومت تک محوری سنگ بکر

$$\sigma_c = \sigma_{c50}\,(50/d)^{0.18}$$

σ_{C50}: مقاومت تک محوری سنگ بکر با قطر ۵۰mm

d: قطر نمونه

σ_t: مقاومت کششی سنگ

	Carbonate Rocks with Well Developed Crystal Cleavage *dolomite, limestone, and marble*	**Lithified Agrillaceous Rocks** *mudstone, siltstone, shale, and slate (normal to cleavage)*	**Arenaceous Rocks with Strong Crystals and Poorly Developed Crystal Cleavage** *sandstone and quartzite*	**Fine-Grained Polymineralic Igneous Crystalline Rocks** *andesite, dolerite, diabase, and rhyolite*	**Coarse-Grained Polymineralic Igneous and Metamorphic Crystalline Rocks** *amphibolite, gabbro, gneiss, granite, norite, quartz-diorite*
Intact Rock Samples *Laboratory specimens free from discontinuities* RMR = 100, Q = 100	m = 7.00 s = 1.00	10.00 1.00	15.00 1.00	17.00 1.00	25.00 1.00
Very Good Quality Rock Mass *Tightly interlocking undisturbed rock with unweatherd joints at 1 to 3 m* RMR = 85, Q = 100	m = 4.10 s = 0.189	5.85 0.189	8.78 0.189	9.95 0.189	14.63 0.189
Good Quality Rock Mass *Several sets of moderately weathered joints spaced at 0.3 to 1 m* RMR = 65, Q = 10	m = 2.006 s = 0.0205	2.865 0.0205	4.298 0.0205	4.871 0.0205	7.163 0.0205
Fair Quality Rock Mass *Several sets of moderately weathered joints spaced at 0.3 to 1 m* RMR = 44, Q = 1	m = 0.947 s = 0.00198	1.353 0.00198	2.030 0.00198	2.301 0.00198	3.383 0.00198
Poor Quality Rock Mass *Numerous weathered joints at 30-500 mm, some gouge; clean compacted waste rock* RMR = 23, Q = 0.1	m = 0.447 s = 0.00019	0.639 0.00019	0.959 0.00019	1.087 0.00019	1.598 0.00019
Very Poor Quality Rock Mass *Numerous heavily weathered joints spaced < 50 mm with gouge; waste rock with fines* RMR = 3, Q = 0.01	m = 0.219 s = 0.00002	0.313 0.00002	0.469 0.00002	0.532 0.00002	0.782 0.00002

فصل ششم: تنش در اطراف تونل ها

الف: قبل از حفاری تونل یا تنش های برجا (اولیه)

این تنشها قبل از حفاری تونل وجود دارند و ناشی از نیروی ثقل می باشد.

در خاک در اثر نیروی ثقل تنش های قائم ایجاد می شود و در اثر خاصیت الاستیسیته تنش های افقی ایجاد می گردد.

تنش قائم $\sigma_z = \gamma h$

$$\varepsilon_x = (\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z))/E$$

$$\varepsilon_y = (\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x))/E \quad \xrightarrow{\varepsilon_y = \varepsilon_z = 0}$$

$$\varepsilon_z = (\sigma_y - \nu(\sigma_y + \sigma_x))/E$$

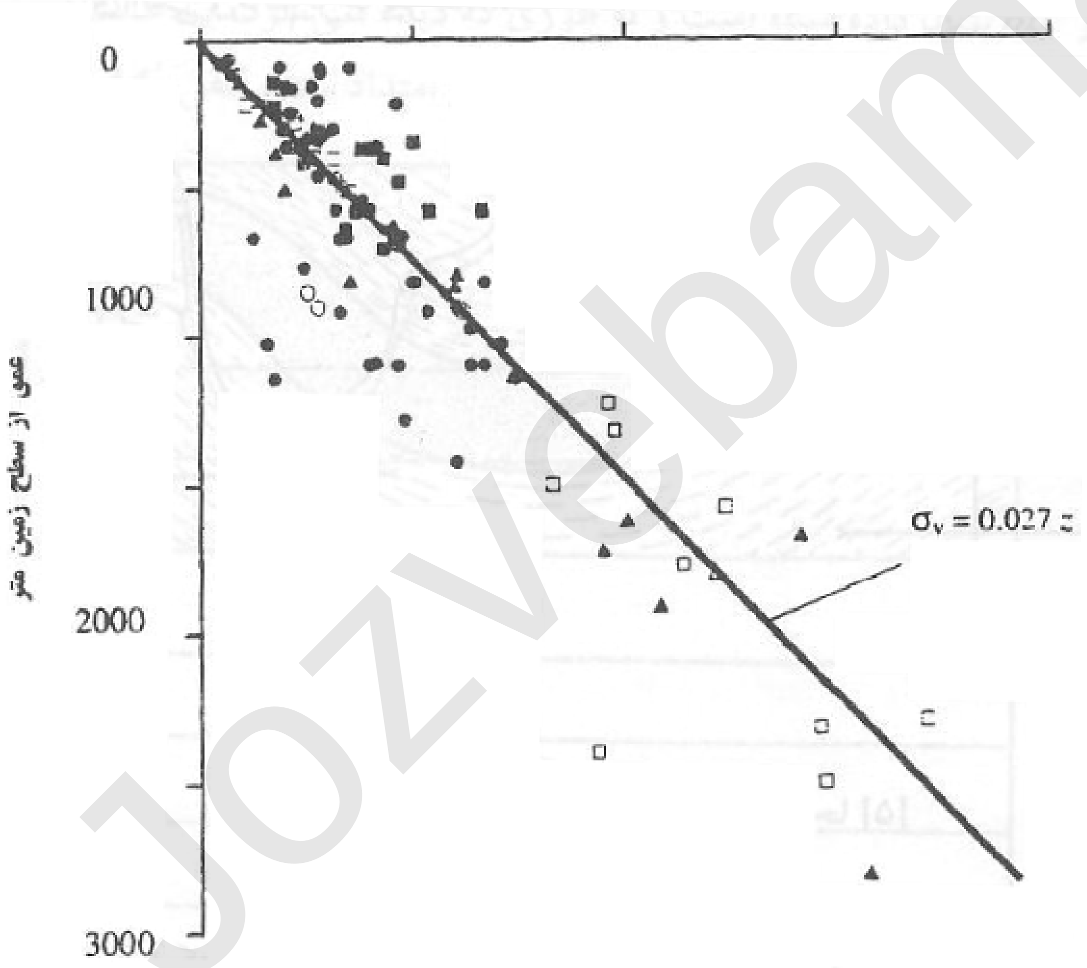
تنش افقی $\sigma_x = \sigma_y = \gamma h \nu/(1-\nu)$

نسبت تنش افقی به قائم $K_o = \sigma_h/\sigma_v$

رابطه جکی $K_0 = 1 - \sin\phi$

در سنگ در اثر نیروی ثقل تنش های قائم ایجاد می شود.
ولی تنش های افقی تحت تاثیر خاصیت الاستیسیته و فعالیت های تکتونیکی یا تاریخچه زمین شناسی می باشد.
عوامل دیگری همچون فرسایش، سرد شدن توده های مذاب، تبلور کانی ها، عمق زمین، توپوگرافی، عوامل ساختاری، وجود ناپیوستگیها و لایه بندی نیز بر تنش های برجا موثرند.

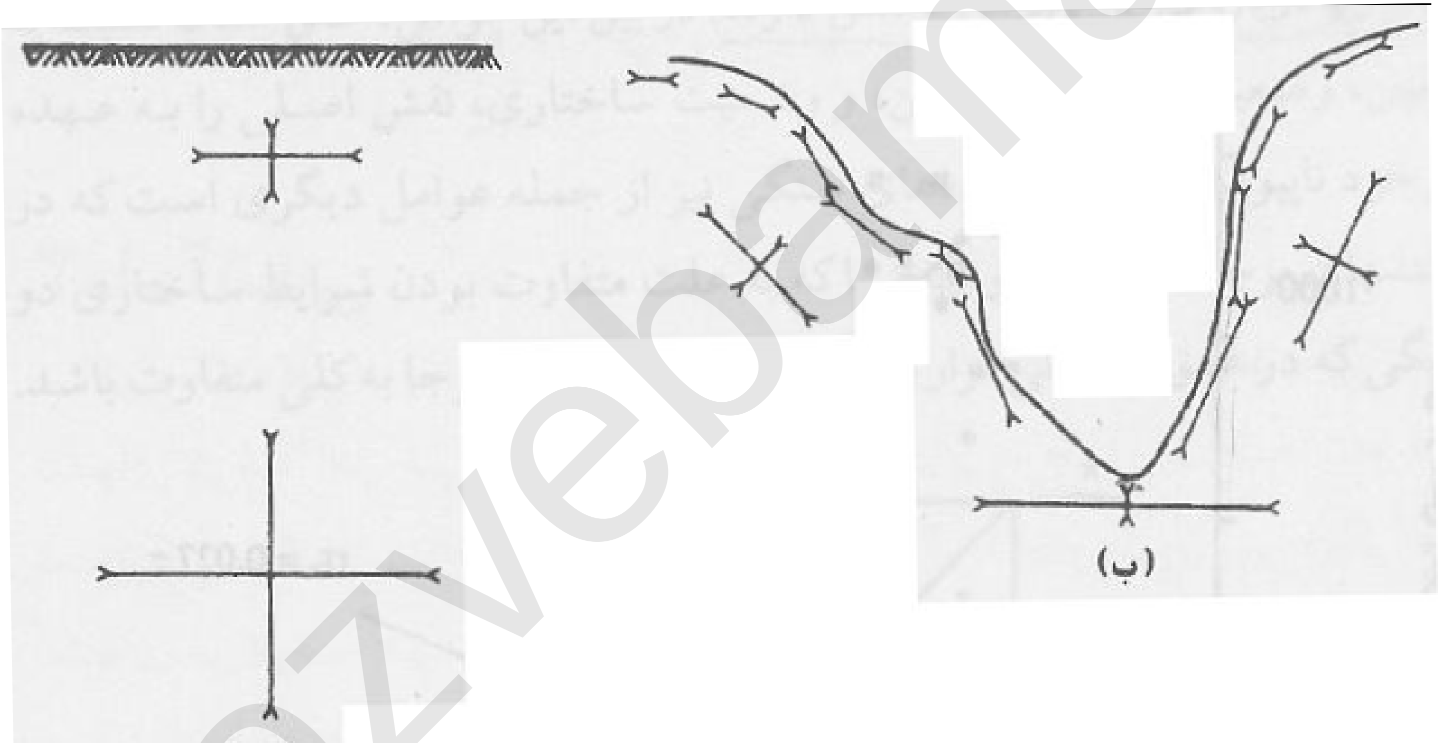
$$\sigma_z = \gamma h$$



تغییرات تنش قائم برجا نسبت به عمق

اثر عوامل ساختاری بر روی تنش های برجا

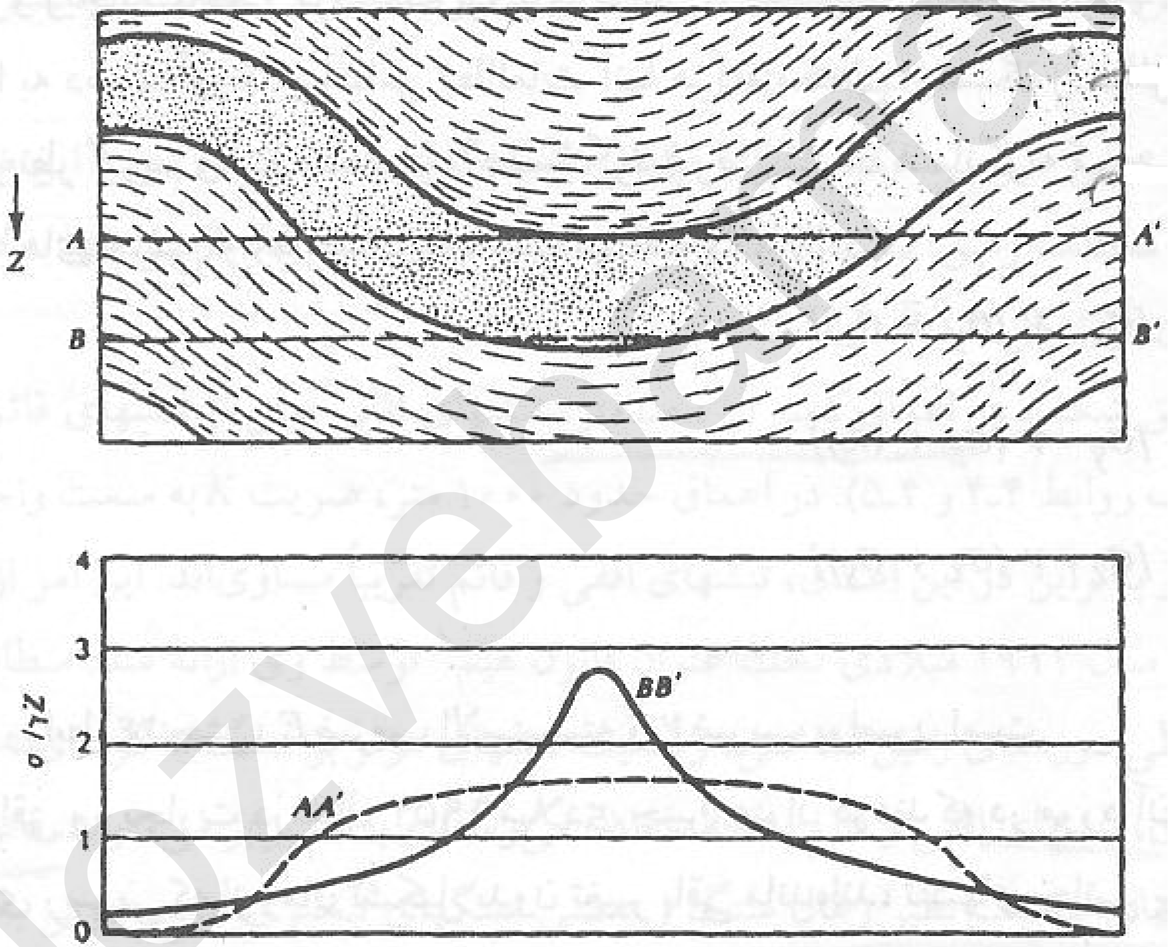
در شیبها، دره ها و تپه ها به دلیل ایجاد تنش برشی در صفحات افقی و قائم، جهت تنش های اصلی از حالت قائم و افقی خارج می شود.



(الف)

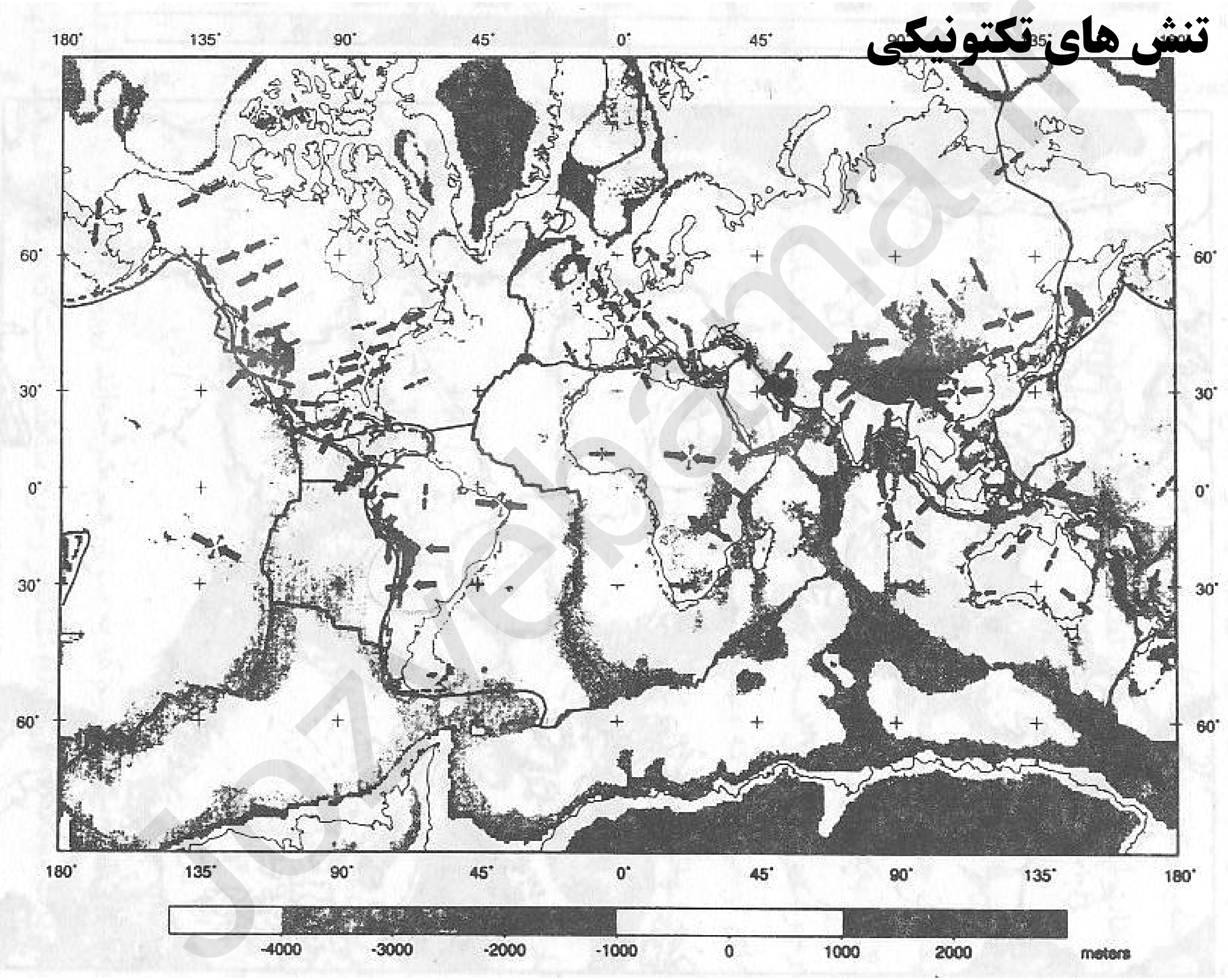
نقش توپوگرافی در تنشهای برجا

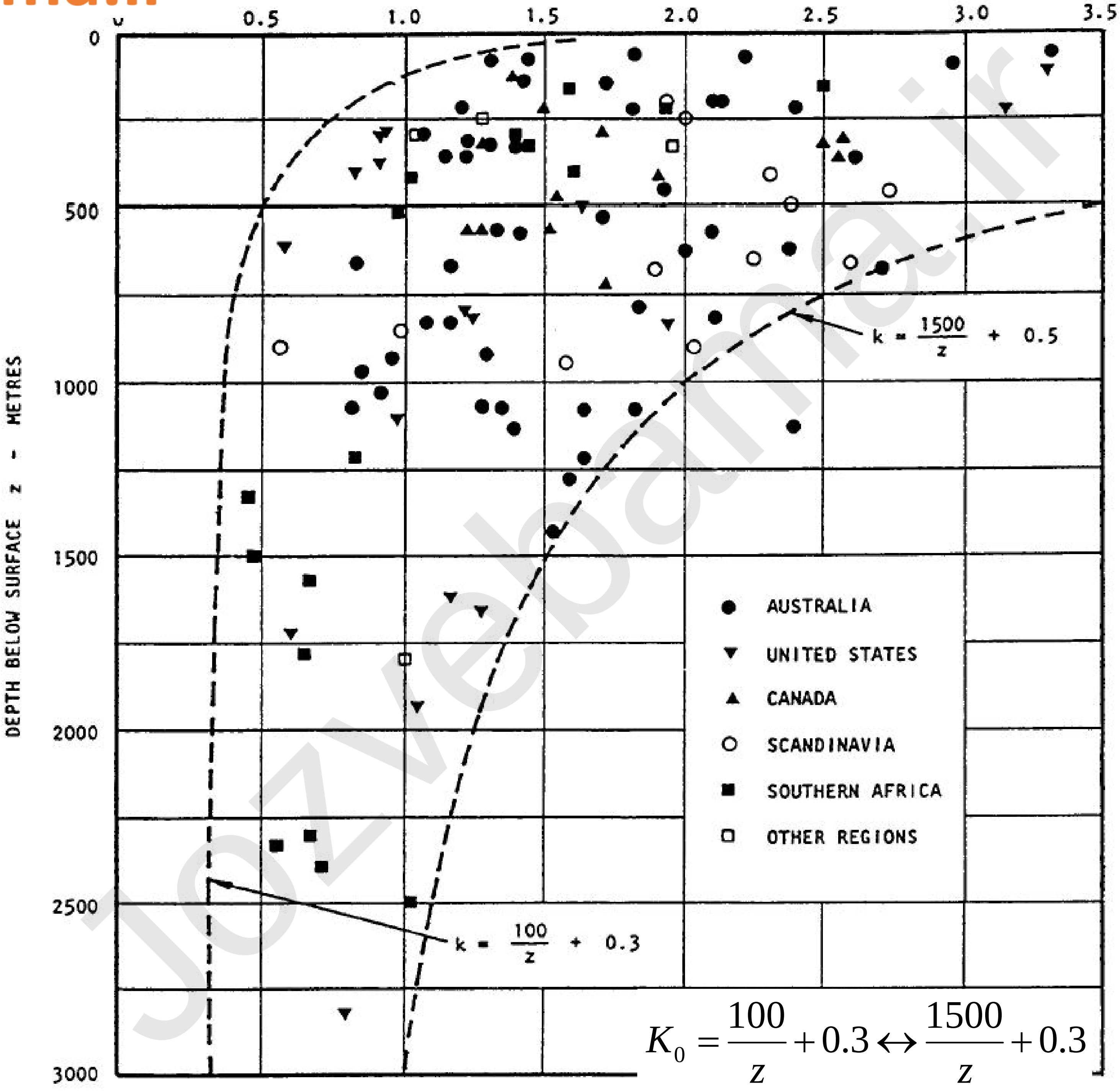
در اثر عوامل ساختاری، مانند طاقدیس و ناودیس اندازه تنش های قائم در اثر فشار ناشی از شکل گیری ساختار تغییر می کند.


Z
A
A'
B
B'
4
3
2
1
0
σ/γZ
BB'
AA'

نقش ساختارهای زمین شناختی در تنش قائم

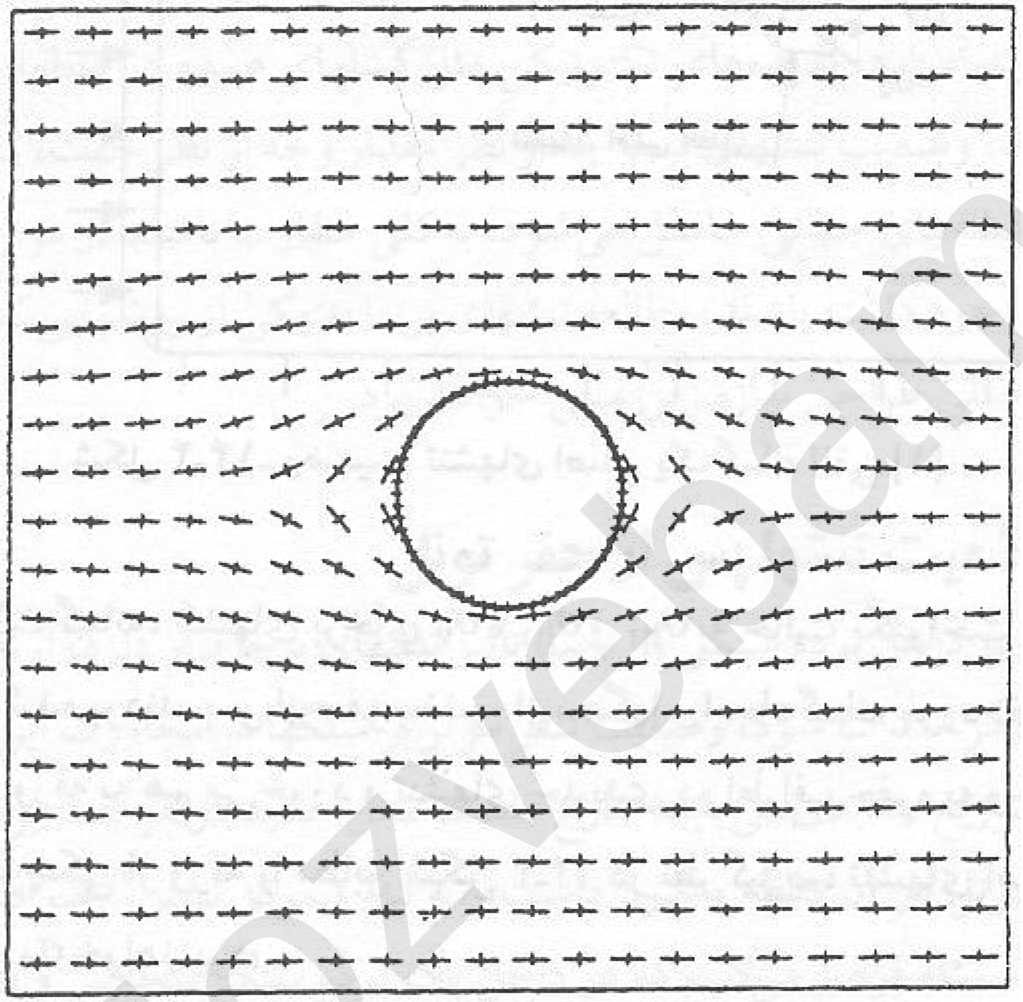
تنش های تکتونیکی


180°
135°
90°
45°
0°
45°
90°
135°
180°
60°
30°
0°
30°
60°
-4000
-3000
-2000
-1000
0
1000
2000
meters



$$K_0 = \frac{100}{z} + 0.3 \leftrightarrow \frac{1500}{z} + 0.3$$

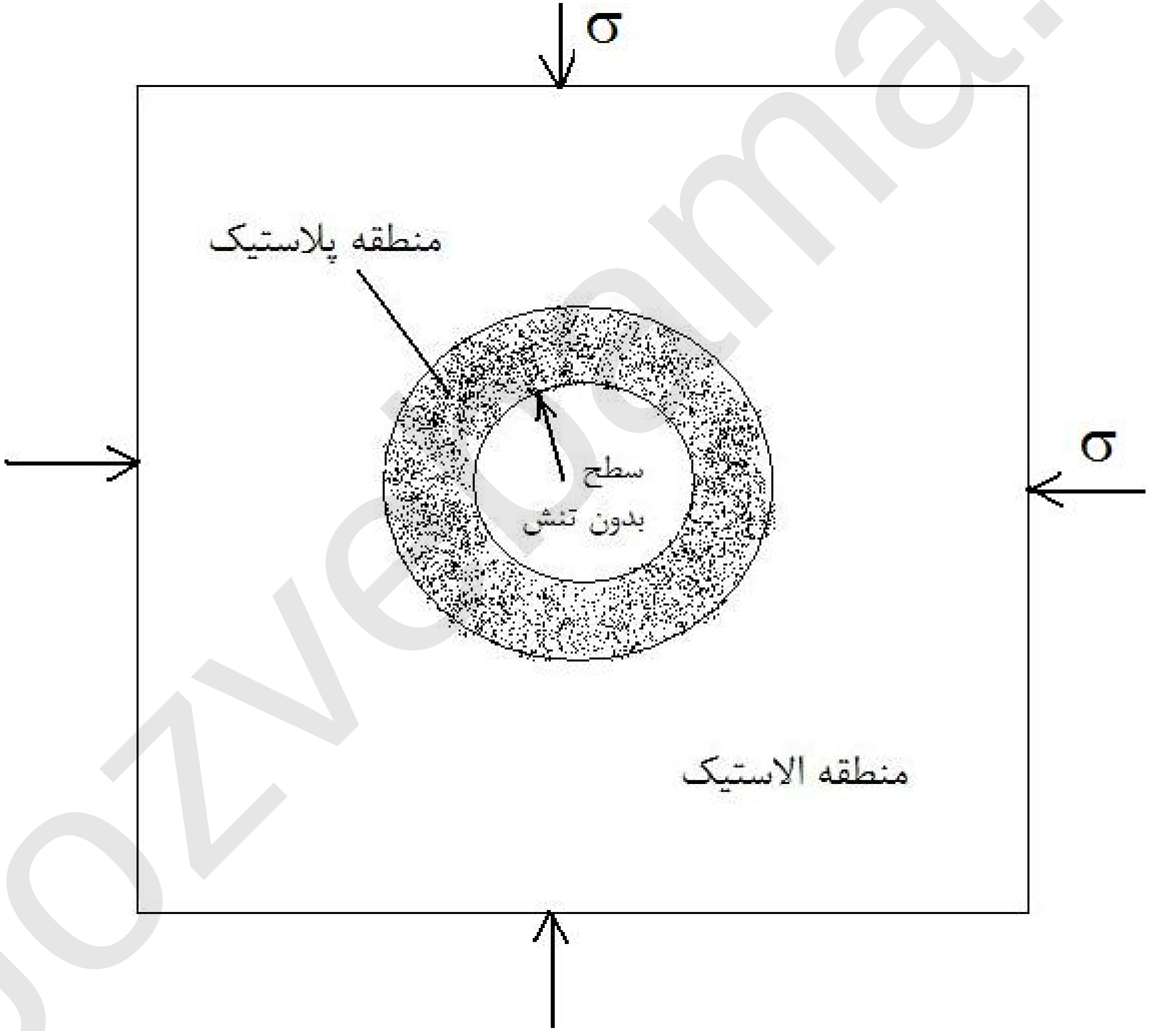
ب: بعد از حفاری تونل یا تنش های القایی



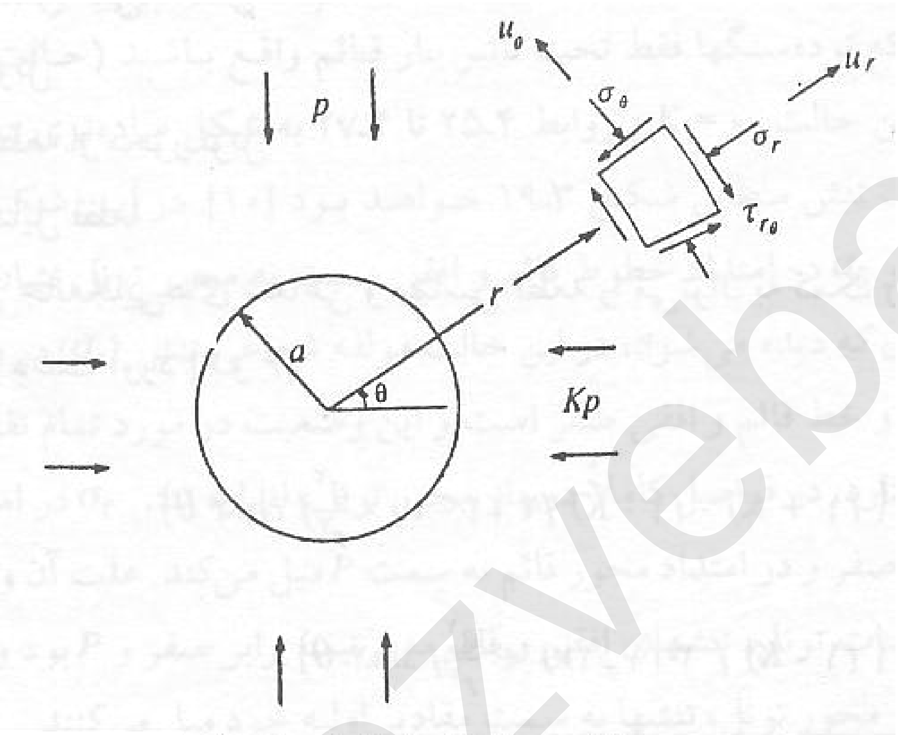
جهت تنشهای اصلی در توده سنگ در اطراف یک گمانه افقی. در این مورد تنشهای برجای افقی سه برابر تنشهای برجای قائم فرض شده است

در اثر ایجاد تونل به علت ایجاد تنش های برشی در اطراف آن رژیم تنش ها به هم می خورد و جهت تنش های اصلی تغییر می نماید.

تنش های برشی ایجاد شده در اطراف تونل ممکن است از مقاومت برشی مصالح بیشتر شده و منجر به گسیختکی و ناپایداری آن گردد.


σ
σ
منطقه پلاستیک
سطح
بدون تنش
منطقه الاستیک

وضعیت تنش در اطراف تونلها در توده های سنگی همگن، همسان و الاستیک


u_θ
u_r
σ_θ
σ_r
$\tau_{r\theta}$
p
r
a
θ
Kp

تنش در اطراف تونلهای دایره‌ای

P: تنش قائم در محل

k: ضریب فشار سکون در محل

kP: تنش افقی در محل

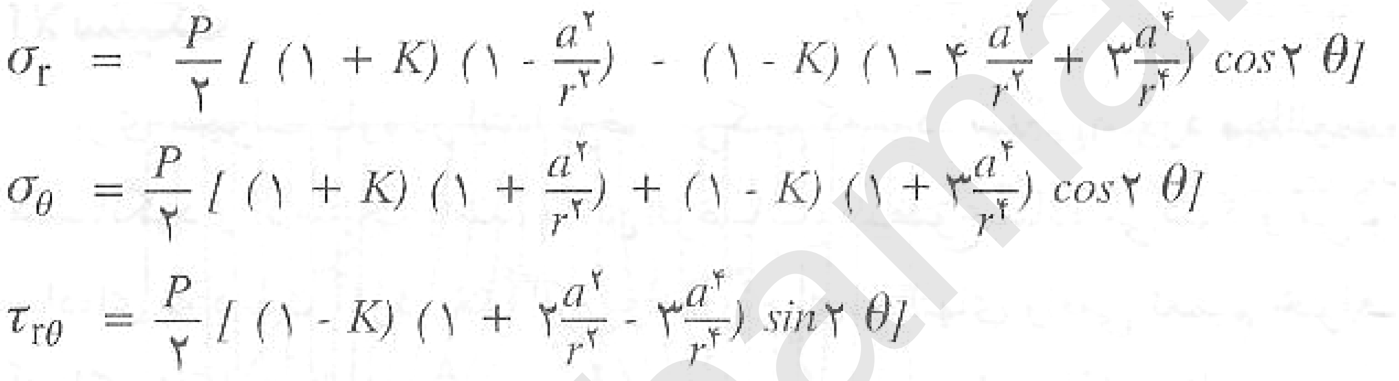
a: شعاع تونل

σ_r: تنش شعاعی در اثر ایجاد تونل در شعاع r از مرکز تونل

σ_θ: تنش مماسی در اثر ایجاد تونل در شعاع r از مرکز تونل

$\tau_{r\theta}$: تنش برشی در اثر ایجاد تونل در شعاع r از مرکز تونل

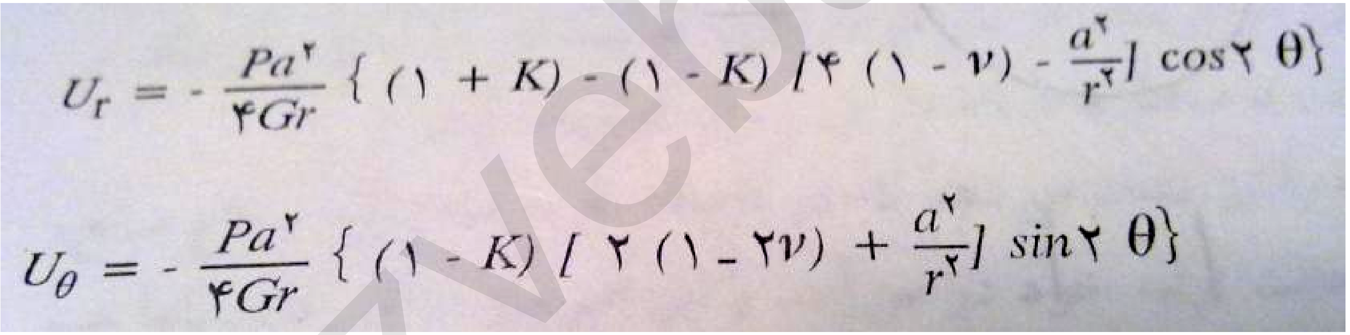
مقادیر تنش ها و تغییر شکل ها توسط شخصی به نام کرش به صورت زیر به دست آمد:



$$\sigma_r = \frac{P}{2}\left[(1+K)\left(1-\frac{a^2}{r^2}\right) - (1-K)\left(1-4\frac{a^2}{r^2}+3\frac{a^4}{r^4}\right)\cos 2\theta\right]$$

$$\sigma_\theta = \frac{P}{2}\left[(1+K)\left(1+\frac{a^2}{r^2}\right) + (1-K)\left(1+3\frac{a^4}{r^4}\right)\cos 2\theta\right]$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{P}{2}\left[(1-K)\left(1+2\frac{a^2}{r^2}-3\frac{a^4}{r^4}\right)\sin 2\theta\right]$$



$$U_r = -\frac{Pa^2}{4Gr}\left\{(1+K)-(1-K)\left[4(1-\nu)-\frac{a^2}{r^2}\right]\cos 2\theta\right\}$$

$$U_\theta = -\frac{Pa^2}{4Gr}\left\{(1-K)\left[2(1-2\nu)+\frac{a^2}{r^2}\right]\sin 2\theta\right\}$$

Ur: جابه جایی شعاعی و Uθ: جابه جایی مماسی

تنش ها در یک محیط الاستیک، همگن و همسان مستقل از مشخصات توده زمین اطراف تونل می باشد

مقادیر تنش ها در مرز تونل (r=a)

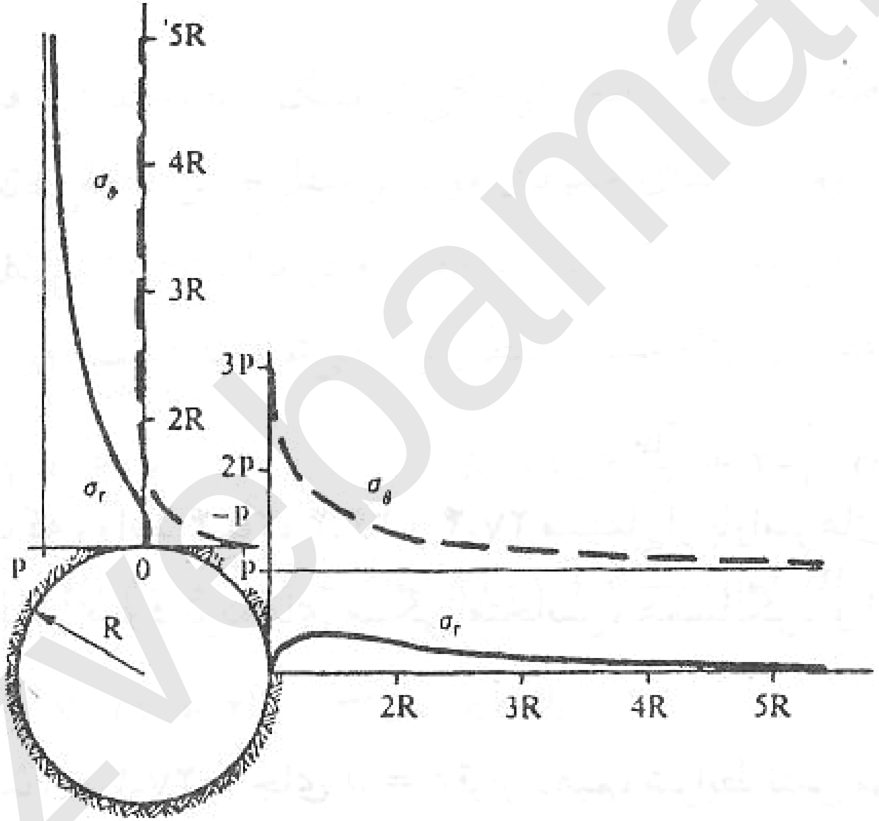
$$\sigma_r = 0$$

$$\sigma_\theta = P[(1 + K) + 2(1 - K)\cos 2\theta]$$

$$\tau_{r\theta} = 0$$

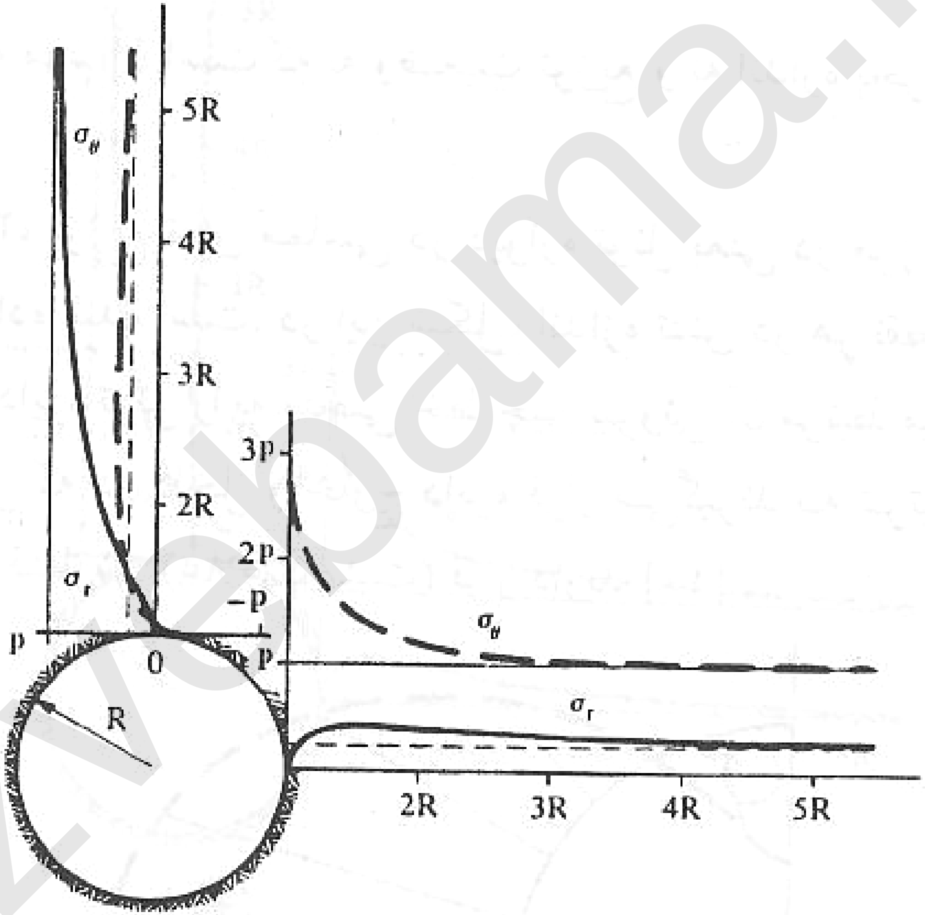
به عبارتی دیگر در مرز تونل تنش برشی و شعاعی نداریم و سطح تونل یک سطح بدون تنش است. فقط تنش مماسی داریم.

تنش یک محوره (k=0):


5R
4R
3R
2R
σ_θ
σ_r
p
0
R
3p
2p
-p
p
σ_θ
σ_r
2R
3R
4R
5R

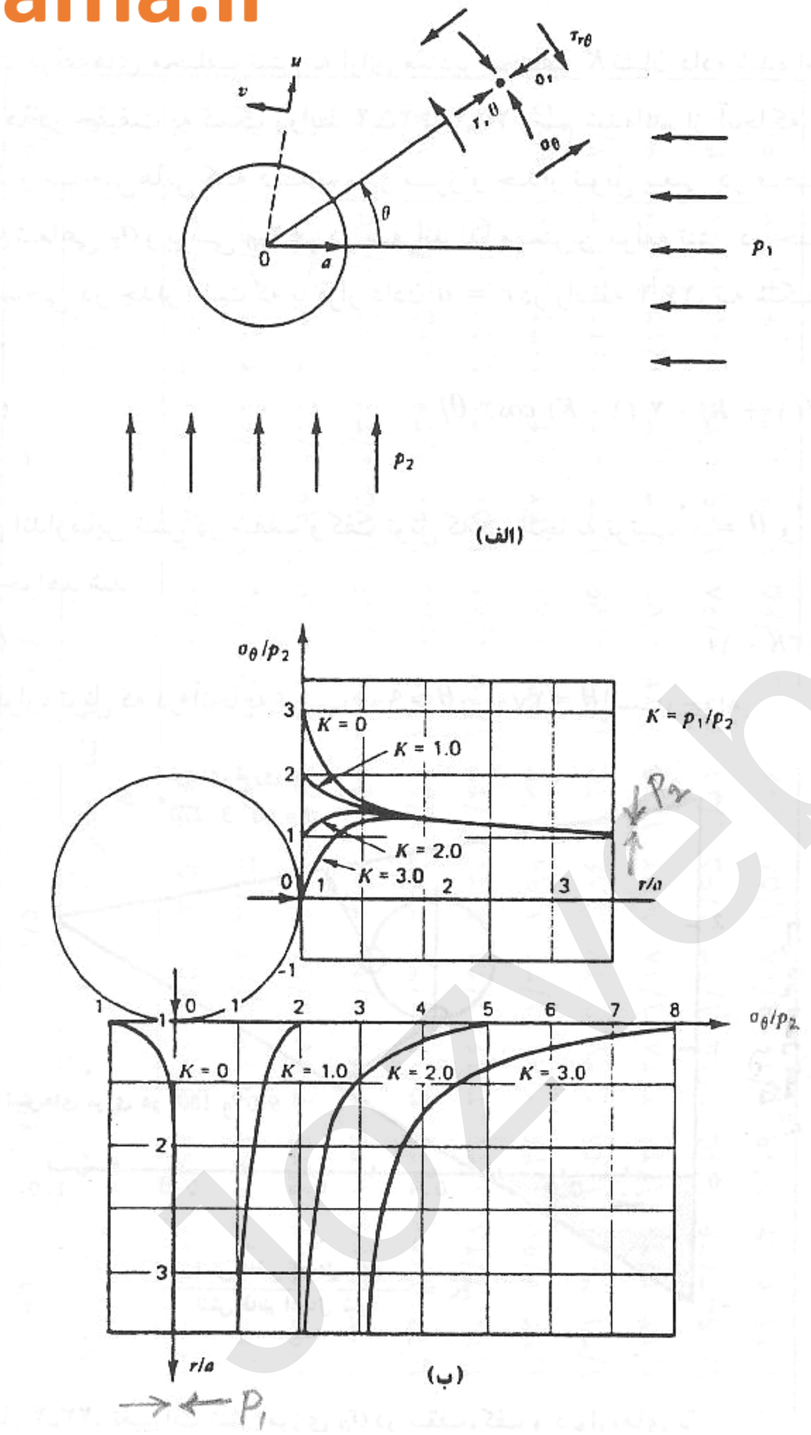
توزیع تنش در اطراف یک تونل دایره‌ای در حالت تنش یک محوره

تنش دو محوره (K=0.25):



توزیع تنش در اطراف یک تونل دایره‌ای در حالت تنش دو محوره

توزیع تنش مماسی در اطراف تونل به ازای مقادیر مختلف k



(الف)

(ب)

مقدار تنش مماسی در جداره تونل (سقف، کف و دیواره ها)

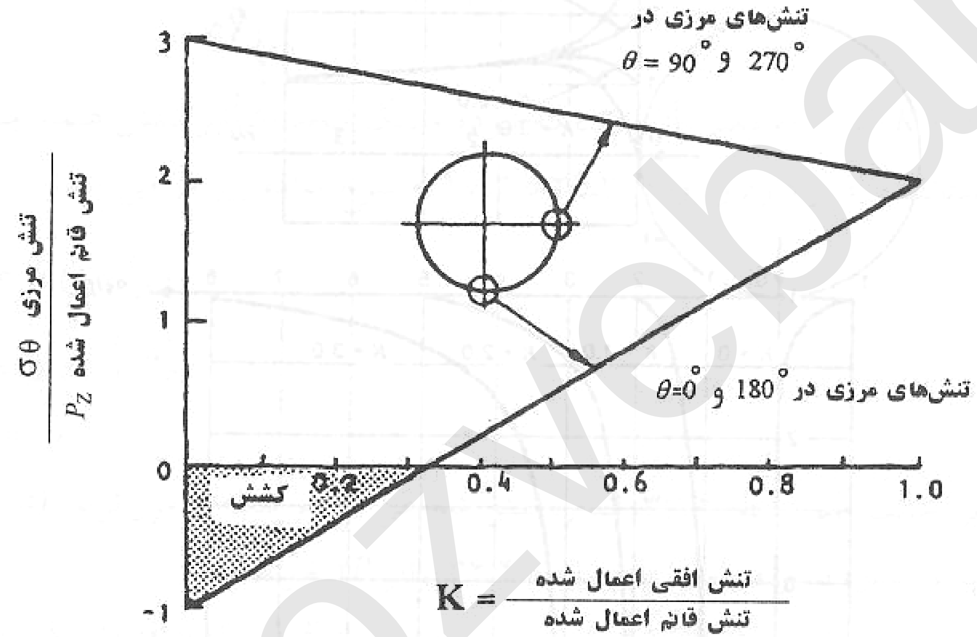
تنش مماسی در جداره تونل $\sigma_a = P\,[(۱ + K) - ۲\,(۱ - K)\cos ۲\theta]$

اندازه این تنش در سقف و کف تونل که در آنجا به ترتیب $\theta = ۰^\circ$ و $\theta = ۱۸۰^\circ$ است، خواهد شد:

$$\sigma_\theta = P\,(۳K - ۱)$$

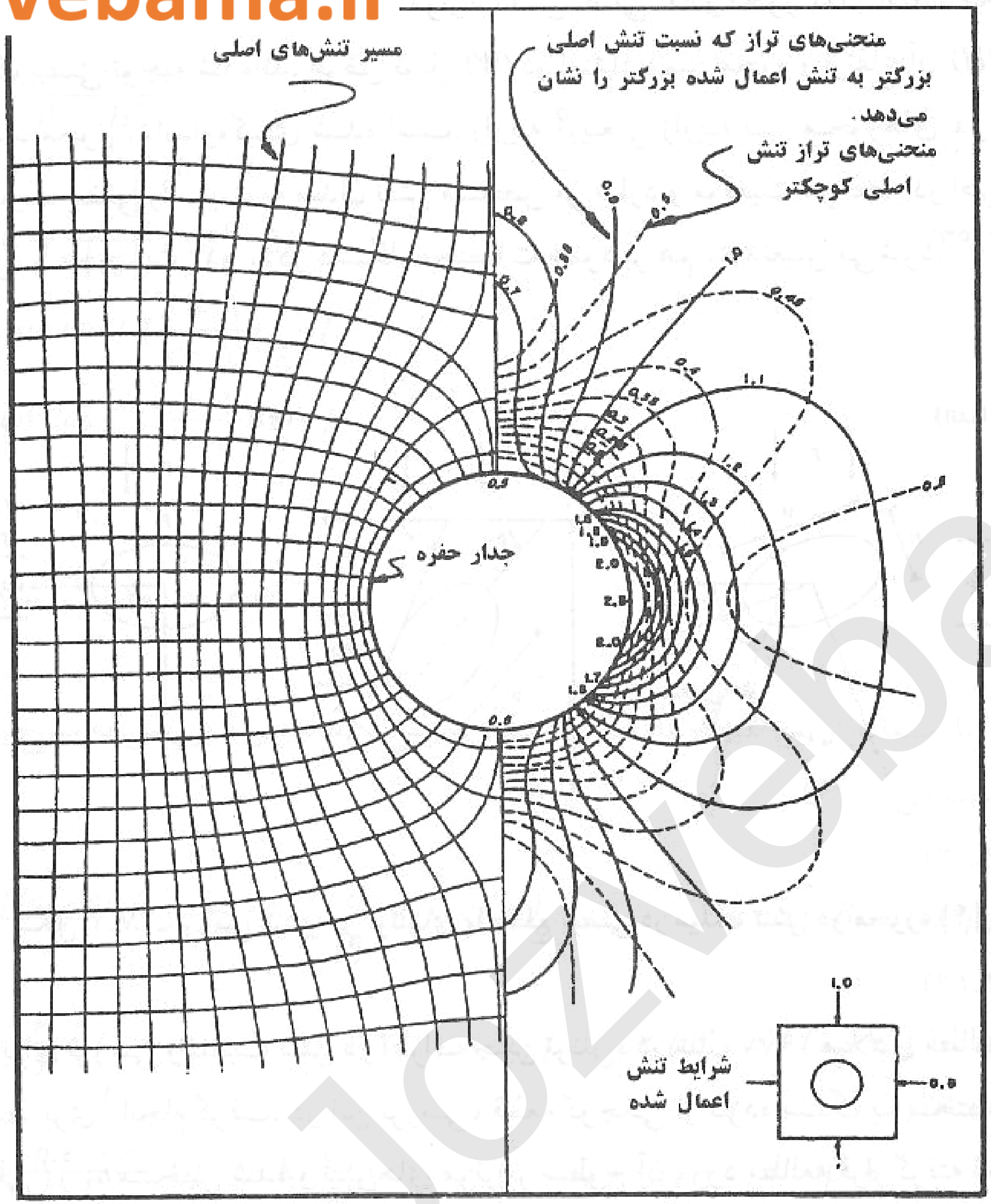
در دیواره تونل که در آنجا به ترتیب $\theta = ۹۰^\circ$ و $\theta = ۲۷۰^\circ$ است، خواهیم داشت:

$$\sigma_\theta = P\,(۳ - K)$$



تغییرات تنش مرزی σ_θ در سقف، کف و دیواره‌های یک تونل دایره‌ای به ازای مقادیر مختلف K

منحنی های میزان تنش های اصلی (σ_1 و σ_3):


مسیر تنش‌های اصلی
منحنی‌های تراز که نسبت تنش اصلی بزرگتر به تنش اعمال شده بزرگتر را نشان می‌دهد.
منحنی‌های تراز تنش اصلی کوچکتر
جدار حفره
شرایط تنش اعمال شده
1.0
0.5

منحنی‌های تراز تنشهای اصلی ماکزیمم و مینیمم در اطراف یک تونل دایره‌ای به ازای $K = ۰/۵$ همراه با مسیر آنها

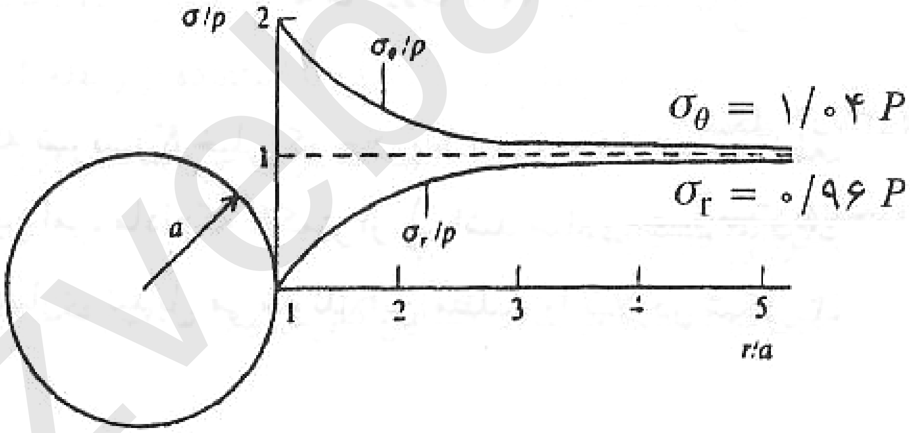
هدف از ترسیم منحنی های میزان تنش های اصلی چیست؟

شعاع تاثیر تونل

$$\sigma_r = P\left(۱ - \frac{a^۲}{r^۲}\right)$$

$$\sigma_\theta = P\left(۱ + \frac{a^۲}{r^۲}\right)$$

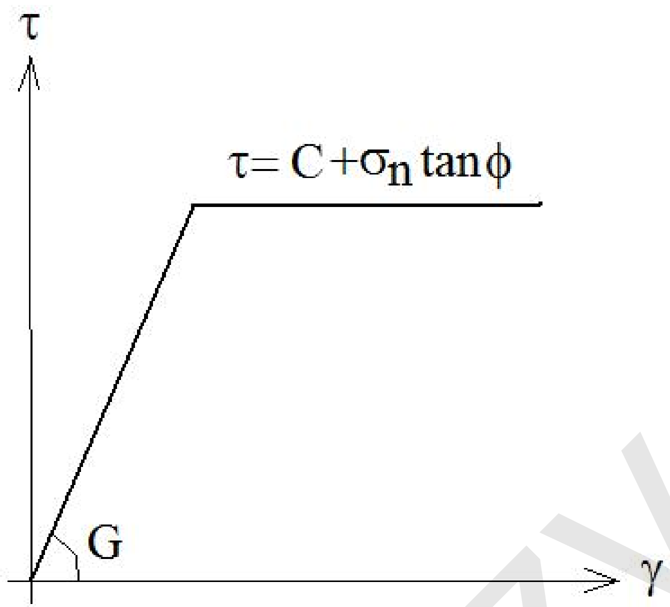
$$\tau_{r,\theta} = ۰$$

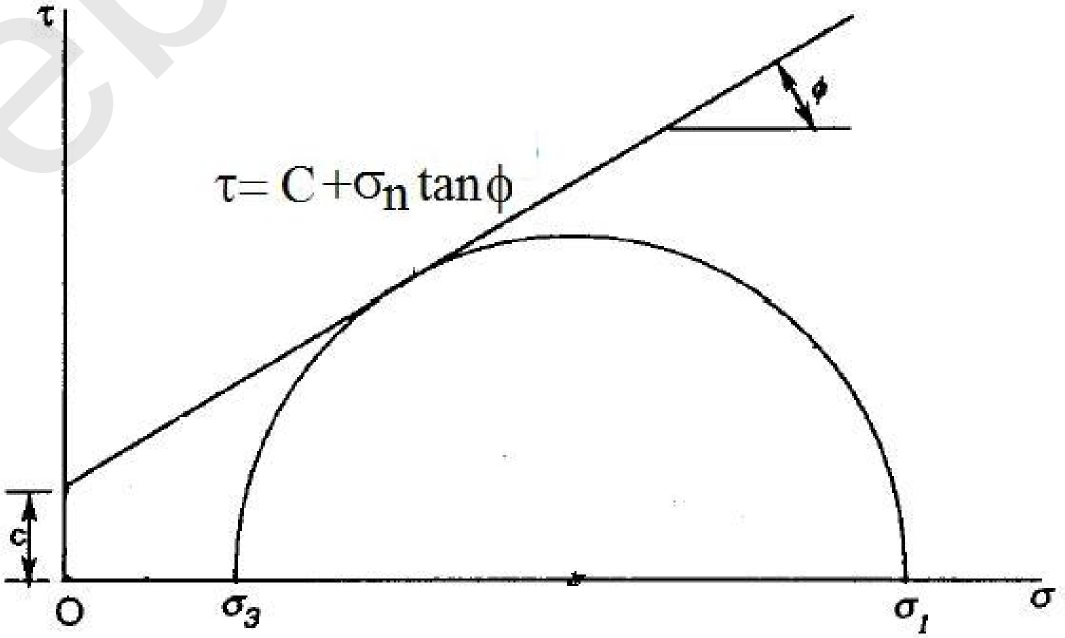


توزیع تنشها در اطراف یک تونل دایره‌ای در میدان تنش هیدروستاتیک

رفتار خمیری در اطراف تونل ها

رفتار مصالح خاک و سنگ الاستیک نبوده و به صورت الاستو پلاستیک است.


τ
τ= C+σn tanϕ
G
γ


τ
ϕ
τ= C+σn tanϕ
c
O
σ3
σ1
σ

$$R = a \left\{ \frac{۲p - q_u + [۱ + \tan^۲(۴۵ + \frac{\phi}{۲})] S_j \cot \phi_j}{[۱ + \tan^۲(۴۵ + \frac{\phi}{۲})] (p_i + S_j \cot \phi_j)} \right\}^{\frac{۱}{Q}}$$

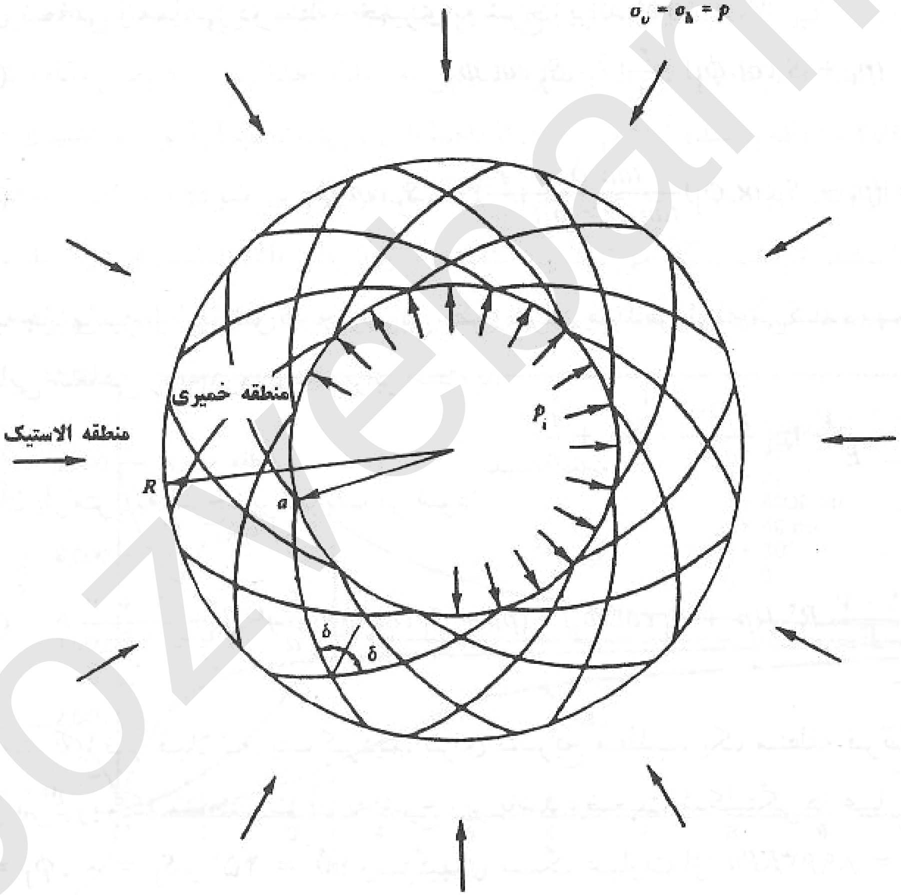
که در آن:

p = تنش اولیهٔ سنگ $(\sigma_v = \sigma_h = p)$

q_u = مقاومت فشاری نامحصور سنگ سالم

p_i = فشار داخلی در تونل که از سوی سیستم نگهداری اعمال می‌شود

ϕ_j = زاویهٔ اصطکاک داخلی سنگ سالم


$\sigma_v = \sigma_h = p$
منطقه خمیری
منطقه الاستیک
p_i
R
a
δ
δ

شرایط مفروض در راه حل الاستیک ـ خمیری بری

در داخل منطقهٔ الاستیک، تنشهای شعاعی و مماسی برحسب راه حل بری به شرح زیر حاصل می‌شوند [۵]:

$$\sigma_r = p - \frac{b}{r^۲}$$

و

$$\sigma_\theta = p + \frac{b}{r^۲}$$

در این روابط پارامتر b به شرح زیر است:

$$b = \left\{\frac{[\tan^۲ (۴۵ + \frac{\phi}{۲}) - ۱]\, p + q_u}{\tan^۲ (۴۵ + \frac{\phi}{۲}) + ۱}\right\} R^۲$$

تنشهای شعاعی و مماسی در منطقهٔ خمیری به شرح زیراند [۵]:

$$\sigma_r = (p_i + S \cot \phi_j) \left(\frac{r}{a}\right)^Q - S_j \cot \phi_j$$

و

$$\sigma_\theta = (p_i + S \cot \phi_j) \frac{\tan \delta}{\tan(\delta - \phi_j)} \left(\frac{r}{a}\right)^Q - S_j \cot \phi_j$$

جابه‌جاییها نیز از این نظر که چارچوبی نظری برای مهندس ارائه می‌کنند، مهم‌اند.

جابه‌جایی شعاعی روبه درون، u_r، برابر است با:

$$u_r = \frac{۱ - \nu}{E} \left(p_i \frac{r^{Q+۱}}{a^Q} - pr\right) + \frac{t}{r}$$

که در آن پارامتر t به شرح زیر تعریف می‌شود:

$$t = \frac{۱ - \nu}{E} R^۲ \left[(p + S_j \cot \phi_j) - (p_i + S_j \cot \phi_j)\left(\frac{R}{a}\right)^Q\right] + \frac{۱ + \nu}{E} b$$

مثال:

$$\phi_j = ۳۰^\circ$$

$$S_j = ۰$$

$$\delta = ۴۵^\circ$$

$$q_u = ۸۹۶۳ KPa$$

$$\phi = ۳۹/۹^\circ$$

تنش اولیه، $p = ۲۷۵۸۰ KPa$

فشار سیستم نگهداری، $p_i = ۲۷۵/۸ KPa$

با توجه به این داده‌ها.

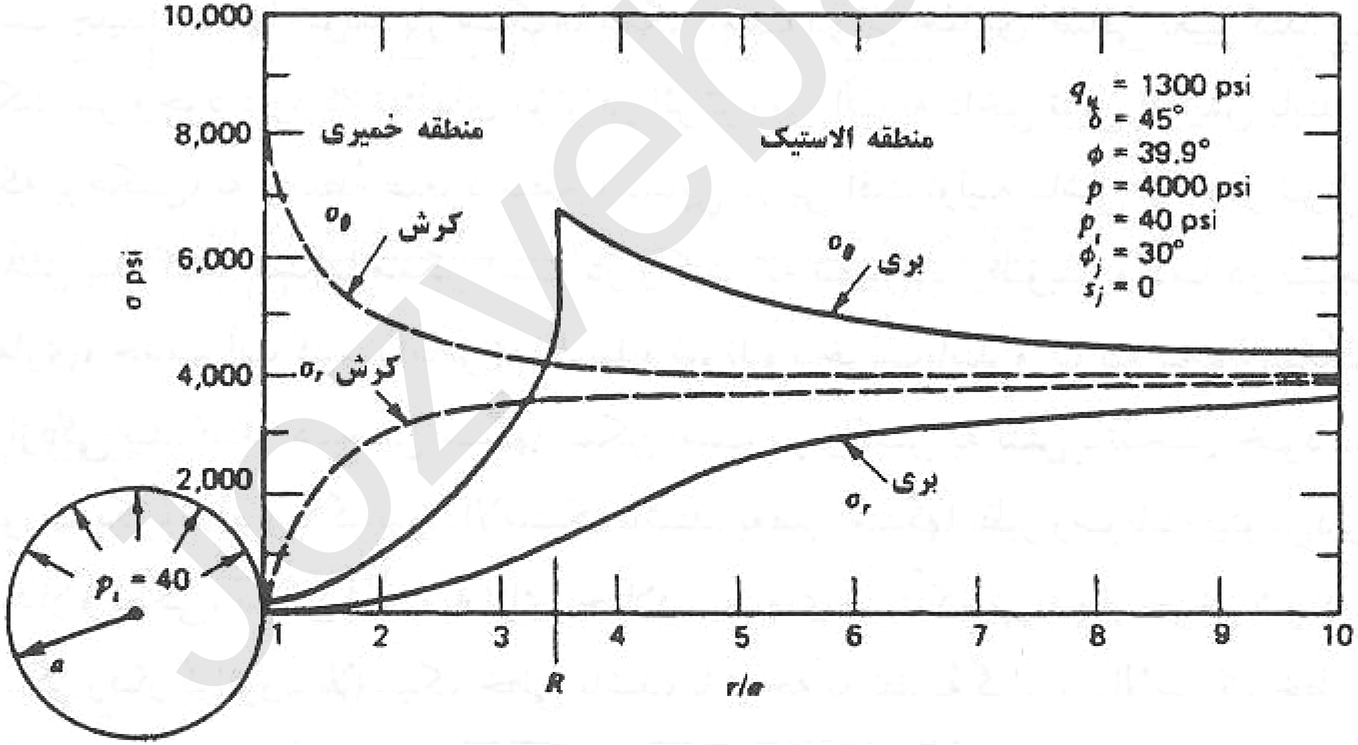
$Q = ۲/۷۳$ ،$R = ۳/۴۷a$ ،$b = ۳۳۷۳۲a^۲$

$$\sigma_r = ۲۷۵/۸(\frac{r}{a})^{۲٫۷۳} \; KPa$$

$$\sigma_\theta = ۱۰۲۷(\frac{r}{a})^{۲٫۷۳} \; KPa$$

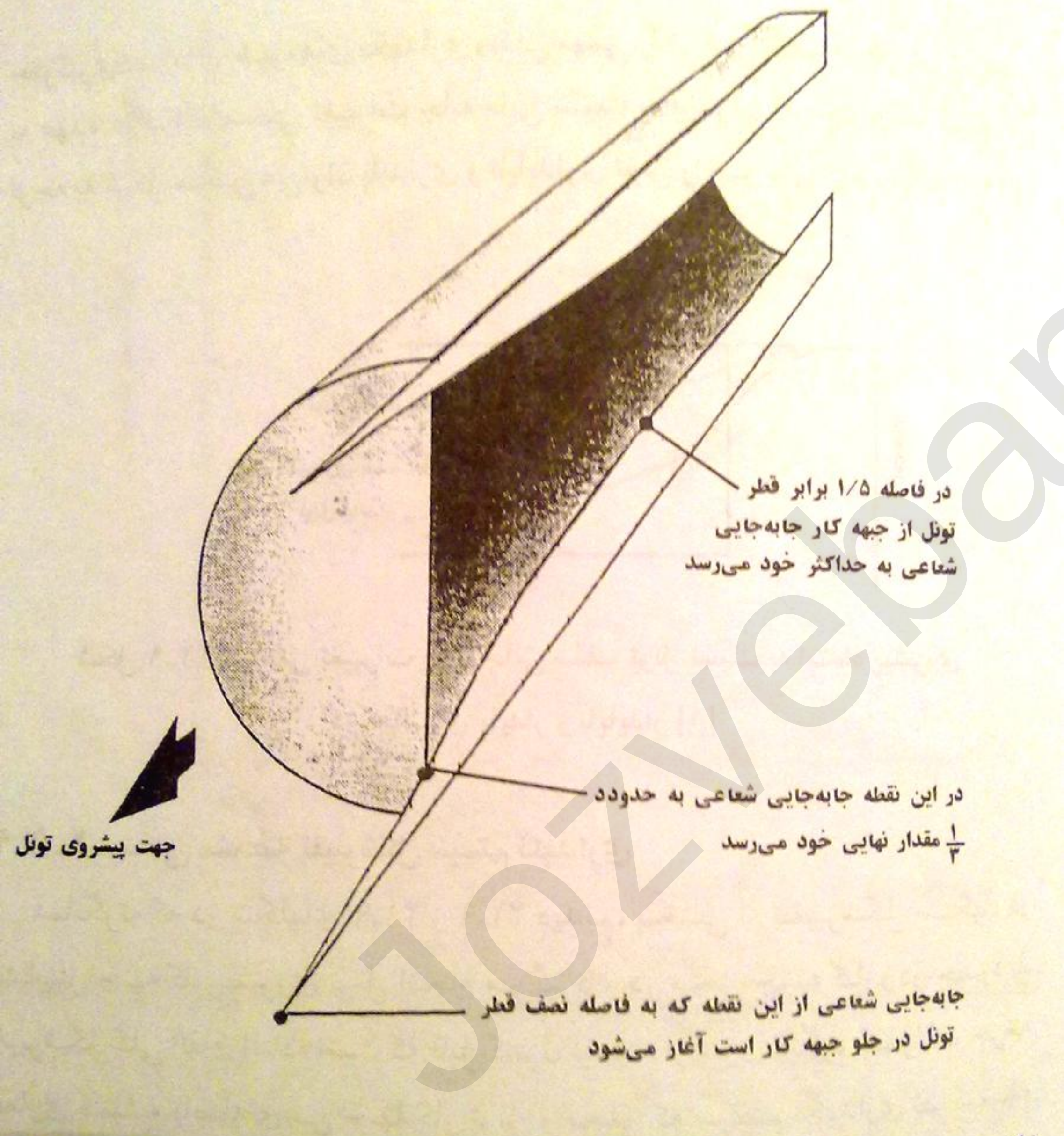
$$\sigma_r = ۲۷۵۸۰ - ۲۳۲۵۷۴ \; a^۲/r^۲ \; KPa$$

$$\sigma_\theta = ۲۷۵۸۰ + ۲۳۲۵۷۴ \; a^۲/r^۲ \; KPa$$



zvebama.ir

منحنی پانه، منحنی مشخصه و طراحی عددی تونل ها

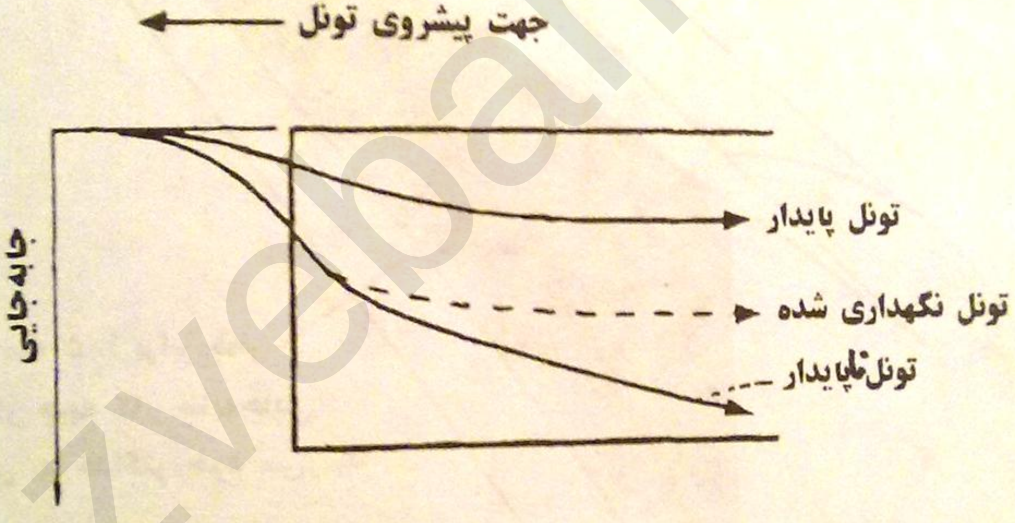

در فاصله ۱/۵ برابر قطر
تونل از جبهه کار جابه‌جایی
شعاعی به حداکثر خود می‌رسد
در این نقطه جابه‌جایی شعاعی به حدودد
$\frac{1}{۳}$ مقدار نهایی خود می‌رسد
جهت پیشروی تونل
جابه‌جایی شعاعی از این نقطه که به فاصله نصف قطر
تونل در جلو جبهه کار است آغاز می‌شود

شکل ۹-۲۱- وضعیت تغییرشکلهای شعاعی در سقف وکف یک تونل در حال پیشروی [۱]

با حفاری یک فضا در زمین محیط اطراف شروع به تغییر شکل به سمت داخل محل حفاری شده می نماید. روند تغییر شکل ها در یک تونل که به صورت بدون پوشش انجام می شود بدین صورت است که تغییر شکل های شعاعی از فاصله ای برابر با نصف قطر تونل قبل از جبهه حفاری شروع می شود. با پیشروی حفاری این تغییر شکل ها افزایش می یابند به نحوی در در محل جبهه حفاری به مقدار یک سوم مقدار نهایی خود می رسد. با گذر عمل حفاری از نقطه مربوطه، تغییر شکل ها افزایش یافته و در شرایط تونل های پایدار بدون پوشش (و بدون درزه و ترک قابل توجه) در فاصله حدودا ۱/۵ برابر قطر تونل، به مقدار نهایی خود می رسد.

zvebama.ir

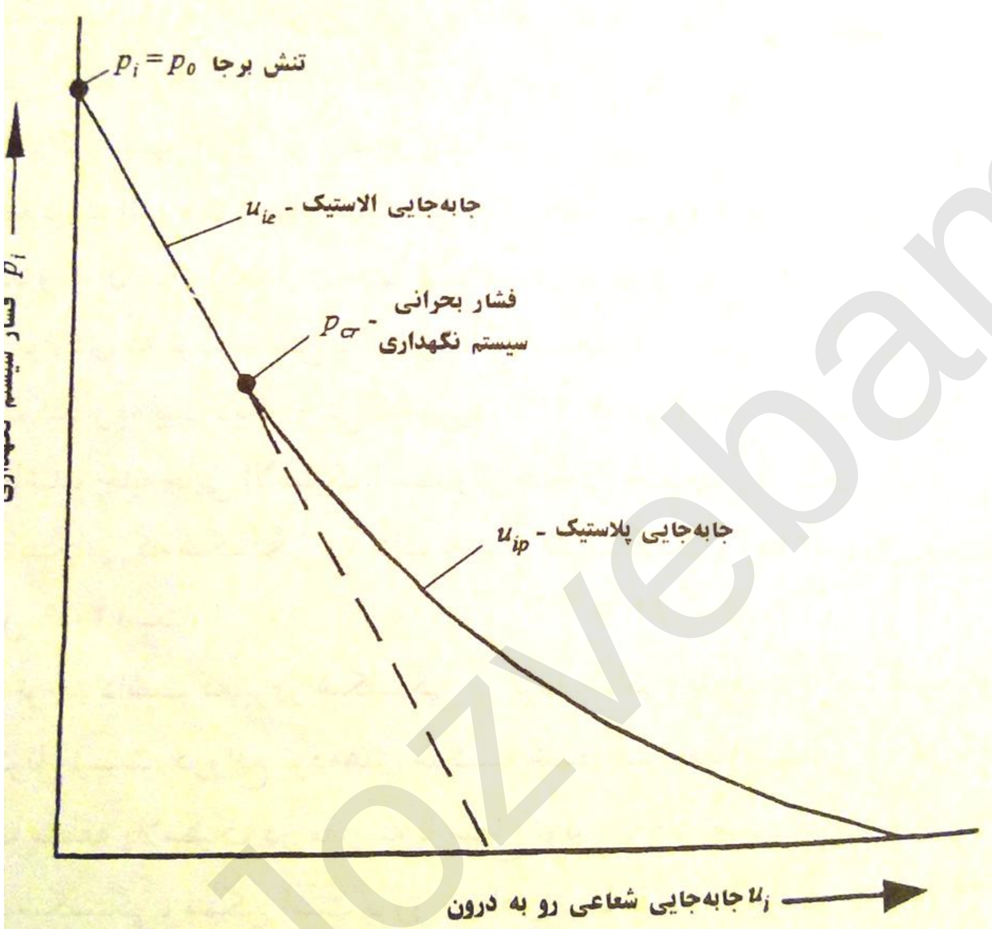
تغییر شکل ها در تونل های پایدار بدون پوشش به یک مقدار مشخص و محدودی می رسد. ولی در شرایط تونل های ناپایدار بدون پوشش، تغییر شکل ها به طور پیوسته افزایش یافته و سرانجام دچار ریزش می گردد.



منحنی تغییرات جابه‌جایی سقف تونل نسبت به امتداد پیشروی در حالتهای پایدار و ناپایدار [۱]

zvebama.ir

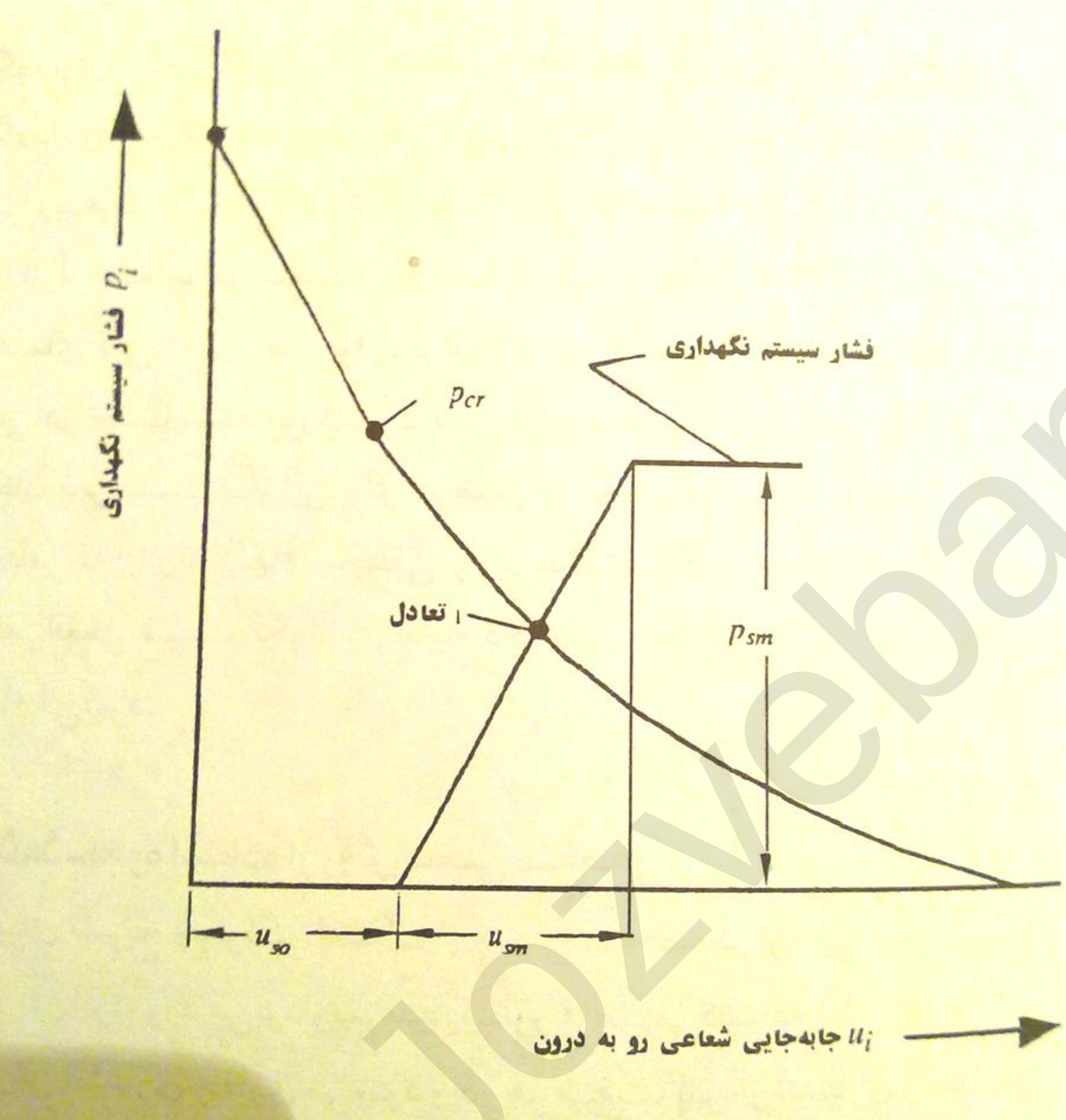
منحنی مشخصه زمین و عکس العمل سیستم نگهداری



شکل ۹ـ۲۰ـ نمایش ترسیمی رابطه بین فشار داخلی تونل و جابه‌جایی دیواره آ
در حالتهای مختلف [۱]

با حفاری تونل و برداشته شدن مصالح، عکس العمل بخش (نیز از جداره Piبرداشته شده) تونل کاهش یافته و در نهایت به صفر می رسد. منحنی فشار فرضی در دیواره تونل و جابه جایی شعاعی آن منحنی عکس مشخصه زمین نامیده می شود.

zvebama.ir



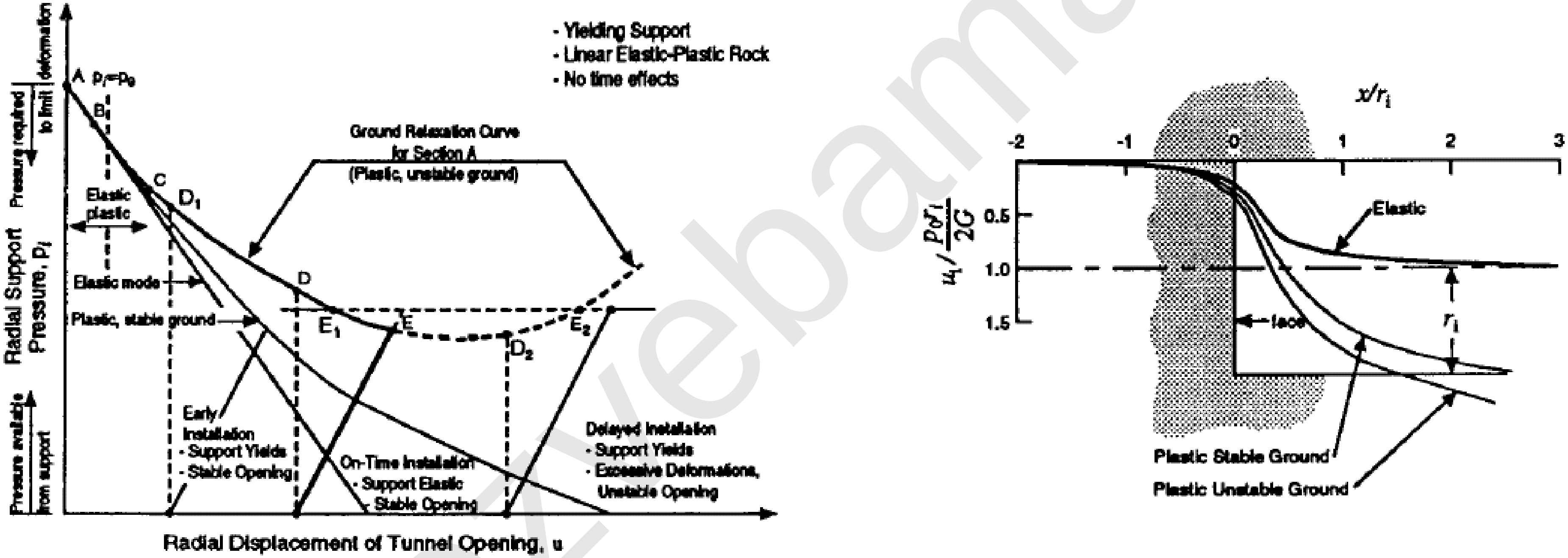
۲۳ـ منحنی عکس‌العمل سیستم نگهداری نسبت به جابه‌جایی شعاعی دیواره تونل

از طرفي تا رسيدن جبهه حفاري، يک سوم جابه جايی تونل رخ داده است و با توجه به مراحل حفاري و نگهداری تونل ها، تا لحظه نصب پوشش مقداري فاصله بين جبهه حفاري و پوشش وجود دارد. لذا در لحظه نصب پوشش مقدار بيشتری) رخ داده است. پس از آن u0جابه جايی اوليه (که پوشش نصب شد و در تماس کامل با جدار داخلی تونل قرار گرفت متناسب با پيشروی تغيير شکلهاي زمين، تغيير شکل های الاستيک سازه پوشش آغاز مي گردد. با رسيدن تغيير شکل ها به)، حداکثر فشار ناشی از آن Usmحد خود ( ) نيز به حد نهايی خود مي رسد (منحنی Psm(عکس العمل سيستم نگهداری).

برای اين که پايداری تونل تامين گردد اولا بايد اين دو منحنی همديگر را قطع نمايند. ثانيا مقاومت) از فشار وارده از طرف Psmسيستم نگهداری (زمين بيشتر باشد.

برای اين کار زمان نصب بايد درست انتخاب گردد يعنی نه زود و دير. اگر زود نصب شود بالطبع فشار بيشتري نيز به سيستم نگهداری وارد مي شود و سيستم غير اقتصادی می شود. اگر دير نصب شود ممکن است دو منحنی به هم نرسند و ديواره تونل بريزد.

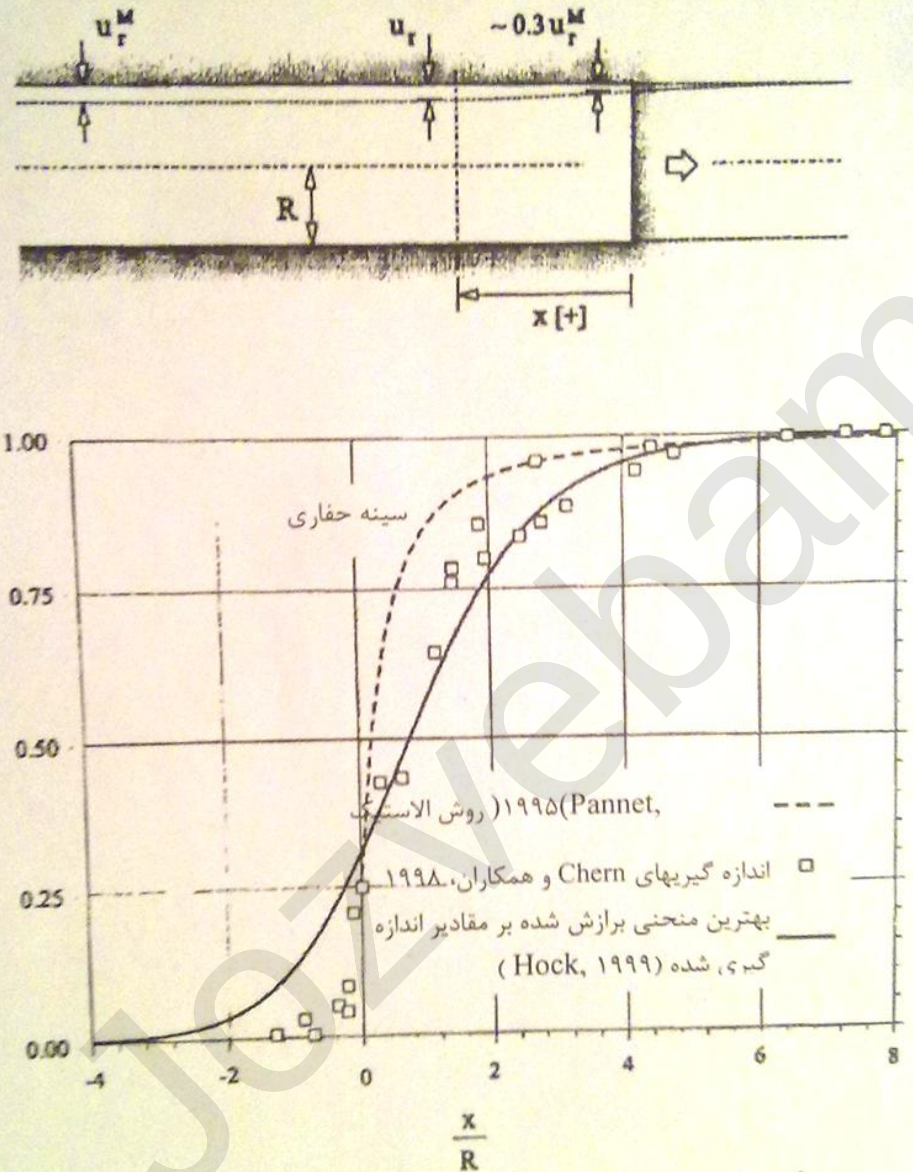
zvebama.ir


- Yielding Support
- Linear Elastic-Plastic Rock
- No time effects
Pressure required to limit deformation
Radial Support Pressure, p_i
Pressure available from support
A $p_i=p_0$
B
C
D_1
D
E_1
E
E_2
D_2
Elastic plastic
Elastic mode
Plastic, stable ground
Ground Relaxation Curve for Section A (Plastic, unstable ground)
Early Installation
- Support Yields
- Stable Opening
On-Time Installation
- Support Elastic
- Stable Opening
Delayed Installation
- Support Yields
- Excessive Deformations, Unstable Opening
Radial Displacement of Tunnel Opening, u
x/r_i
-2
-1
0
1
2
3
$u_i / \frac{p_0 r_i}{2G}$
0.5
1.0
1.5
Elastic
face
r_i
Plastic Stable Ground
Plastic Unstable Ground

اثر زمان نصب پوشش بر پایداری پوشش

zvebama.ir

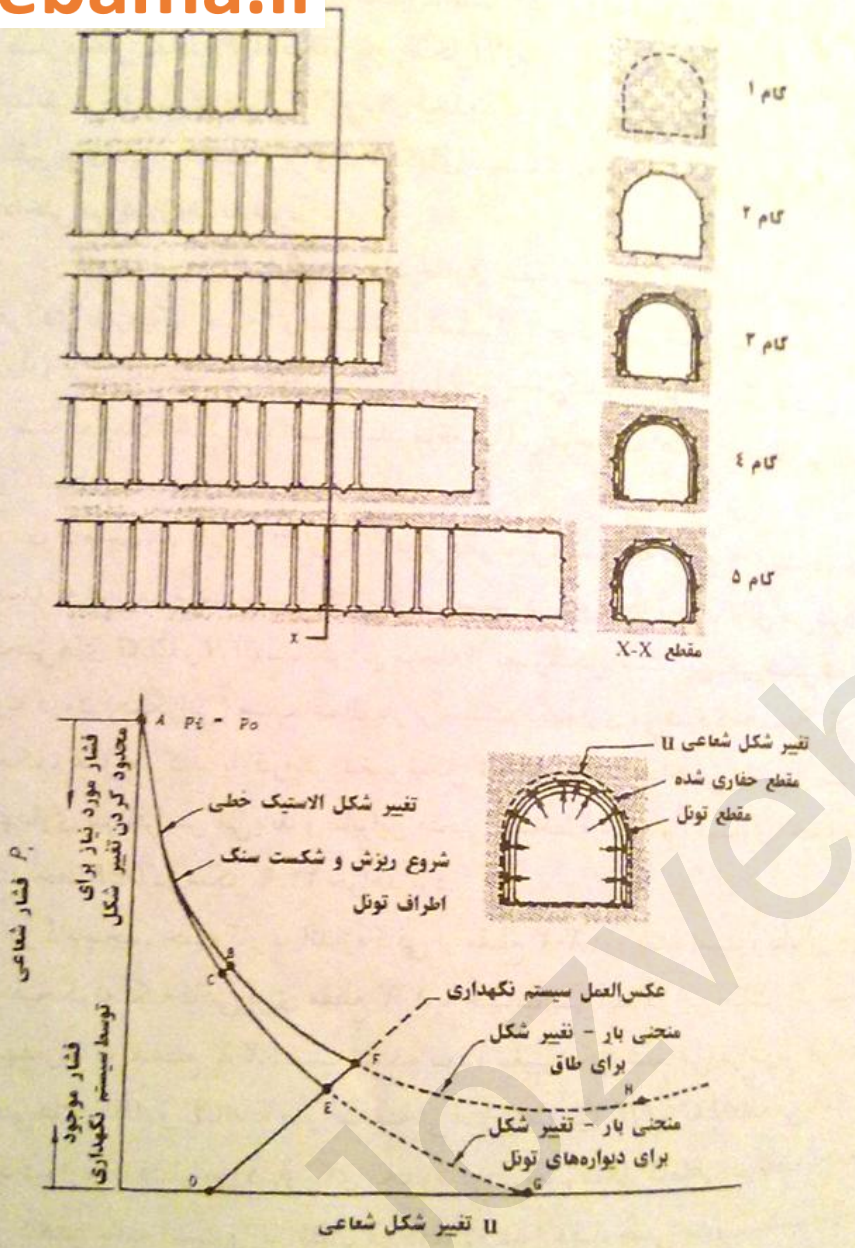
منحنی پانه



شکل ۱: منحنی پانه و استفاده از آن برای مدل سازی دو بعدی تونل [۱]

zvebama.ir

استفاده از منحنی مشخصه


گام ۱
گام ۲
گام ۳
گام ۴
گام ۵
X
مقطع X-X
A Pi = Po
فشار شعاعی Pi
فشار مورد نیاز برای محدود کردن تغییر شکل
تغییر شکل الاستیک خطی
شروع ریزش و شکست سنگ اطراف تونل
تغییر شکل شعاعی u
مقطع حفاری شده
مقطع تونل
B
C
عکس‌العمل سیستم نگهداری
منحنی بار - تغییر شکل برای طاق
F
H
E
منحنی بار - تغییر شکل برای دیواره‌های تونل
فشار موجود توسط سیستم نگهداری
D
G
u تغییر شکل شعاعی

شکل ۹-۲۴-منحنی‌های مشخصه توده سنگ و سیستم نگهداری در مورد تونلی که به شیوه آتشباری حفاری و با قابهای فولادی نگهداری می‌شود [۲]

را در نظر گرفته و xxمطابق با شکل مقطع جابه جایی های جداره تونل و اندر کنش آن با سیستم نگهداری مورد بررسی قرار می گیرد.

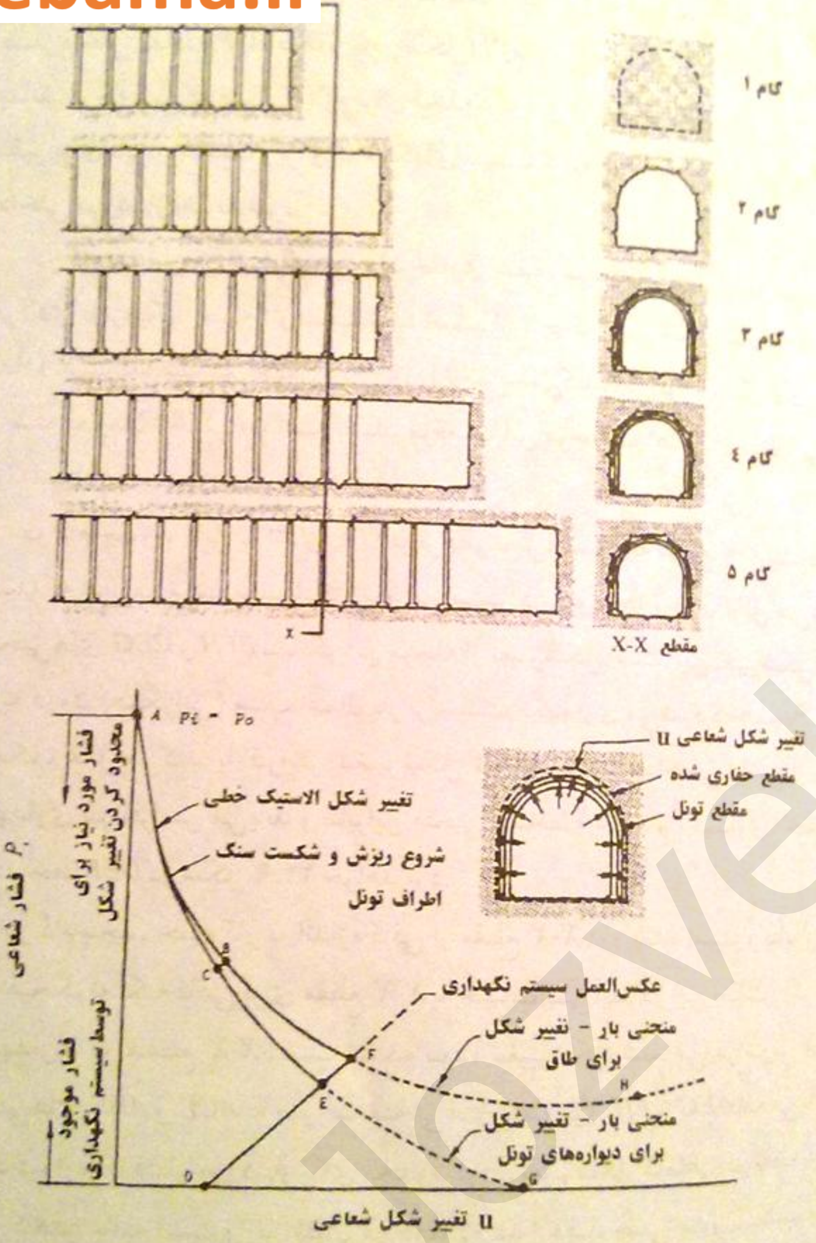
1. در مرحله اول جبهه حفاری به اندازه کافی از مقطع مورد نظر دور بوده و هنوز اثر حفاری در آن ظاهر نشده است. فشار اندرکنش زمین و محل مورد نظر حفاری (می pi=poبرابر فشار برجای زمین) باشد.
2. در مرحله دوم یک گام عمل حفاری صورت xxگرفته و بخش حفاری شده از مقطع عبور نموده است و فشاری که بخش حفاری شده به زمین اعمال می نمود صفر شده به ترتیب نقاط نظیر سقف C , Dاست (نقاط و دیواره تونل). ولی به دلیل عمل تکیه گاهی بخش حفاری نشده و پوشش قبلی فشار معادل آن عمل می نماید

zvebama.ir

۳. در مرحله سوم پوشش قاب خمشی تا جبهه کار نصب شده است. ولی به دلیل عدم تغییر شکل زمین و در نتیجه سیستم نگهداری، هیچ نیرویی در پوشش ایجاد نشده است. یعنی همان نقاط C بر روی منحنی مشخصه زمین و معادل آن D , بر روی منحنی عکس العمل سیستم (نقطه O) نگهداری.

۴. در مرحله چهارم، یک مرحله دیگر حفاری صورت گرفته و به اندازه کافی جابه جایی شعاعی در زمین و معادل آن در سیستم نگهداری رخ داده و فشار نگهداری لازم جهت حفظ تعادل زمین توسط سیستم نگهداری تامین شده است (نقاط E, F به ترتیب برای سقف و دیواره تونل).

۵. در مرحله پنجم: حفاری ادامه یافته و به اندازه کافی از مقطع و محل نصب سیستم نگهداری دور شده است و اثری در مقطع xx ندارد.

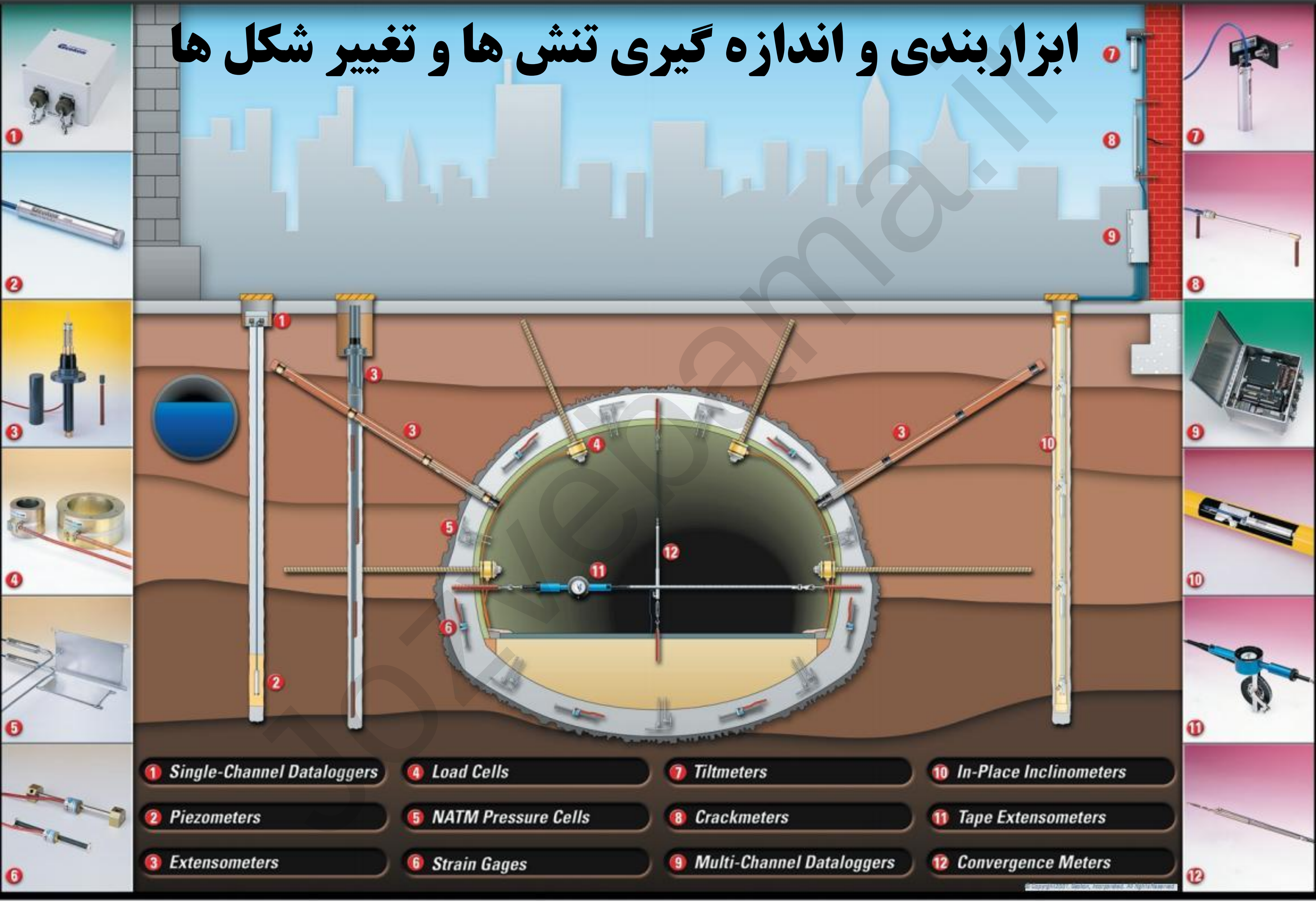

گام ۱
گام ۲
گام ۳
گام ۴
گام ۵
x
مقطع X-X
A Pi = Po
فشار مورد نیاز برای محدود کردن تغییر شکل
فشار شعاعی Pi
فشار موجود توسط سیستم نگهداری
تغییر شکل الاستیک خطی
شروع ریزش و شکست سنگ اطراف تونل
B
C
تغییر شکل شعاعی u
مقطع حفاری شده
مقطع تونل
عکس‌العمل سیستم نگهداری
منحنی بار - تغییر شکل برای طاق
F
H
E
منحنی بار - تغییر شکل برای دیواره‌های تونل
D
G
u تغییر شکل شعاعی

شکل ۹-۲۴-منحنی‌های مشخصه توده سنگ و سیستم نگهداری در مورد تونلی که به شیوه آتشباری حفاری و با قابهای فولادی نگهداری می‌شود [۲]

zvebama.ir

Tunnelling Instrumentation

ابزاربندی و اندازه گیری تنش ها و تغییر شکل ها



① Single-Channel Dataloggers
② Piezometers
③ Extensometers
④ Load Cells
⑤ NATM Pressure Cells
⑥ Strain Gages
⑦ Tiltmeters
⑧ Crackmeters
⑨ Multi-Channel Dataloggers
⑩ In-Place Inclinometers
⑪ Tape Extensometers
⑫ Convergence Meters

zvebama.ir

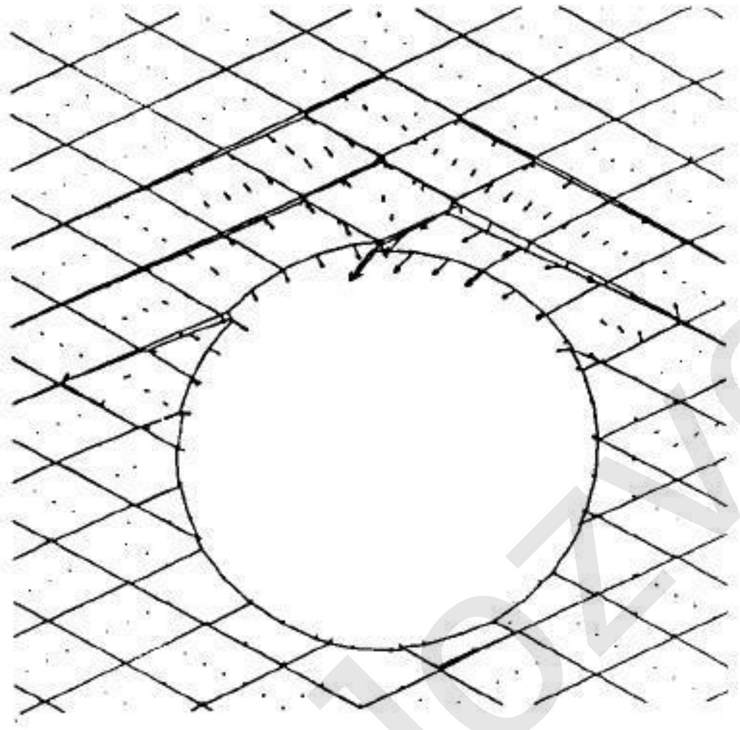
استفاده از منحنی پانه برای طراحی پوشش در مدل سازی های عددی دو بعدی (روش آزاد سازی تنش)

1. ابتدا مدل عددی زمین ساخته شده و تحلیل می گردد تا تنش های برجا ایجاد شوند.
2. عمل حفاری به صورت حذف آن در مدل شبیه سازی می گردد و مدل تحلیل می شود تا تعادل حاصل شده و جابه جایی ها و تنش های ناشی از عمل حفاری مشخص گردد. در این و یا سیکل های محاسباتی رسم می شود stepمرحله جابه جایی جداره تونل در برابر (شبیه منحنی مشخصه زمین).
3. سپس فاصله متوسط پوشش تا جبهه حفاری بر اساس روش های تجربی تخمین زده شده و از روی منحنی پانه مقدار جابه جایی معادل آن تعیین می گردد.
4. نظیر مقدار جابه جایی حاصل step های تحلیل، stepاز روی منحنی جابه جایی در برابر از مرحله ۳ تعیین می گردد.
5. یک بار دیگر تحلیل عددی از اول تکرار می گردد. ولی این بار مدل بعد از حذف منطقه تعیین شده در مرحله ۴ آنالیز می شود سپس سیستم پوشش مدل شده stepحفاری شده تا و آنالیز ادامه می یابد تا تعادل نهایی حاصل شده و نیرهای داخلی و جابه جایی های پوشش و زمین به دست آید.

zvebama.ir

بلوک ها و گوه های سنگی

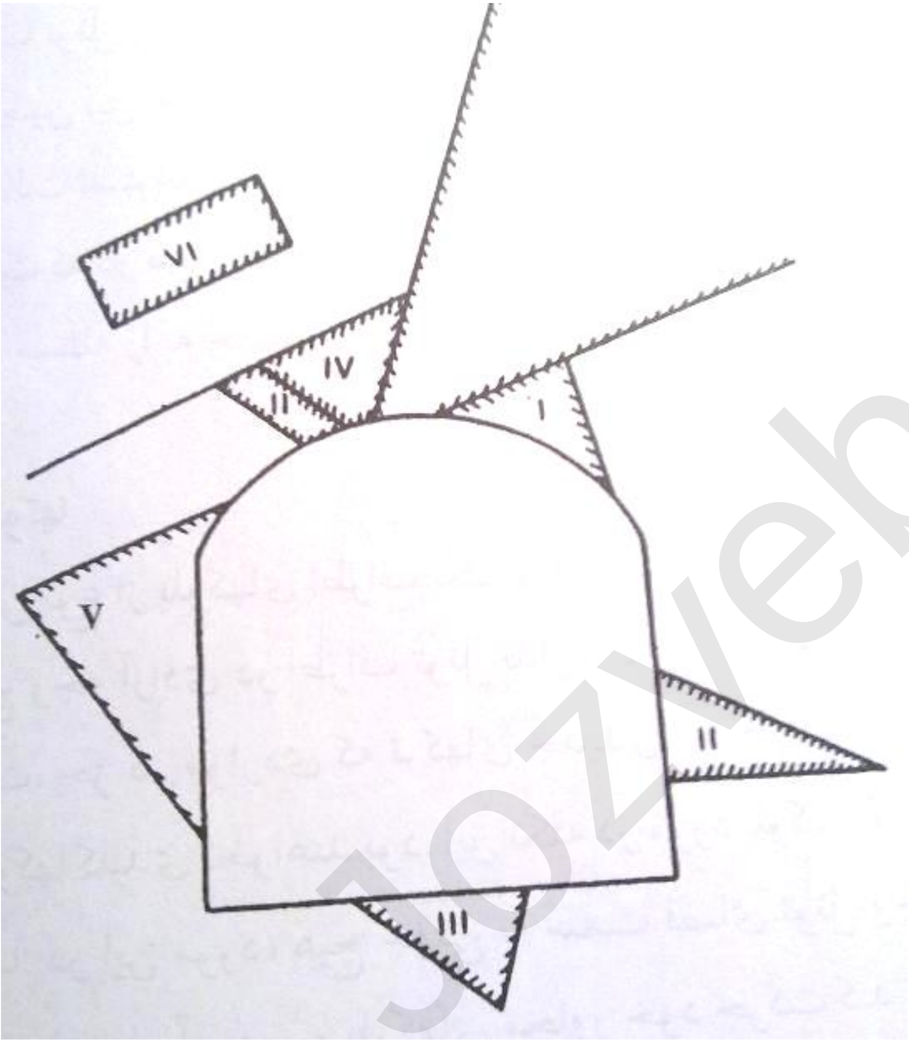
وجود ناپیوستگیها در زمین مانند گسلها، امتداد لایه بندی، ترک ها، شکستگیها و سطح ناشی از حفاری و تلاقی آنها با یکدیگر باعث به وجود آمدن قطعات یا بلوکهایی از سنگ در اطراف تونل ها می شود که ممکن است دچار لغزش، چرخش و سقوط به داخل تونل شوند. در صورت اجرای یک سازه و حائل در داخل فضای حفاری شده کل وزن و یا بخشی از وزن این قطعات به حائل وارد می شود. نیرو و فشار ناشی از این بلوک ها ممکن است اضافه بر نیرو ها و فشار حاصل از عکس العمل عمومی زمین باشد که در اثر حفاری زمین ایجاد می شود. اگر این بلوک ها در جای خود پایدار نشوند جابه جایی آنها و یا احیانا سقوط آنها می تواند باعث آزاد شدن و ناپایداری بلوک های دیگر شود. بنابراین تثبیت و پایداری سازی آنها لازم می باشد.



Movement of blocks around tunnel; velocities denoted by arrows

zvebama.ir

انواع بلوک ها



VI: یک بلوک درزه است که هیچ وجه آزادی در اطراف تونل نداشته و پایدار است.

V: یک وجه آزاد دارد و در صورتی که وجوه آن با سطح زیری در تماس بوده و مقاومت برشی آن بر نیروی محرک آن غلبه کند احتمال لغزش نخواهد داشت.

IV: یک وجه آزاد دارد ولی به خاطر محدودیت حرکت و قفل و بست با بلوکهای اطراف، در صورت عدم جابه جایی آنها بالفعل پایدار است.

III: بلوک آزادی است ولی با توجه به این که در کف قرار گرفته در اثر نیروی وزن پایدار می باشد.

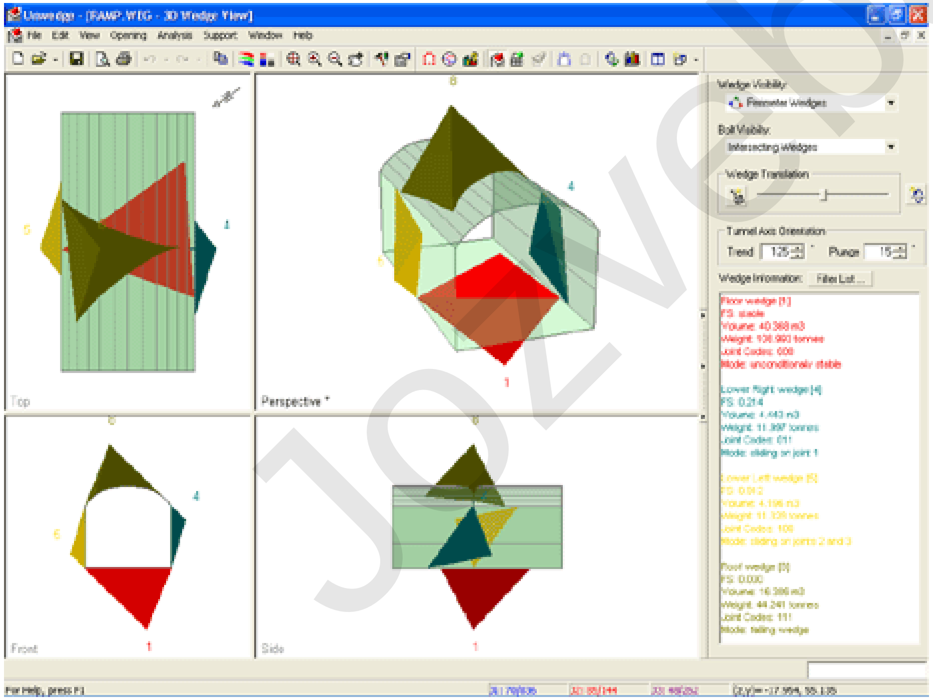
II: این بلوک شرایطی بین دو بلوک V و IV دارد و در صورت کافی بودن اصطکاک بین وجوه آن با سطوح بلوکهای بالا و پایین پایدار خواهد بود.

I: این بلوک در هیچ شرایط به خودی خود پایدار نیست و بلوک کلید نامیده می شود که باید با استفاده از یک سیستم مناسب مانند استفاده از مهارها، پیچ سنگ و یا شاتکریت پایدار شود.

zvebama.ir

انواع بلوک ها

بلوک II بالقوه بلوک کلید است. بلوک های I، II و III بلوکهای ایمن برداشتنی (removable) بلوک های IV، V و VI به اسم بلوک های نابرداشتنی (non-removable) نامیده می شوند.
تقسیم بندی انواع بلوکها اعم از بلوکهای کلیدی، بالقوه کلیدی، ایمن برداشتنی و نابرداشتنی و وزن آنها با استفاده از روش قضیه شی و تصاویر استریو گرافیک به صورت سه بعدی تعیین می گردد.
همچنین احتمال لغزش، چرخش و امکان ناپایداری و ضریب اطمینان پایداری بلوک ها و تثبیت و پایداری آنها با استفاده از روشهای تعادل حدی (limit equilibrium) مورد ارزیابی قرار می گیرید.
تمام این مراحل در قالب نرم افزارهایی مانند نرم افزار UNWEDGE تهیه و ارائه شده است.


Unwedge - [RAMP.WEG - 3D Wedge View]
File Edit View Opening Analysis Support Window Help
Top
Perspective
Front
Side
1
4
5
8
For Help, press F1

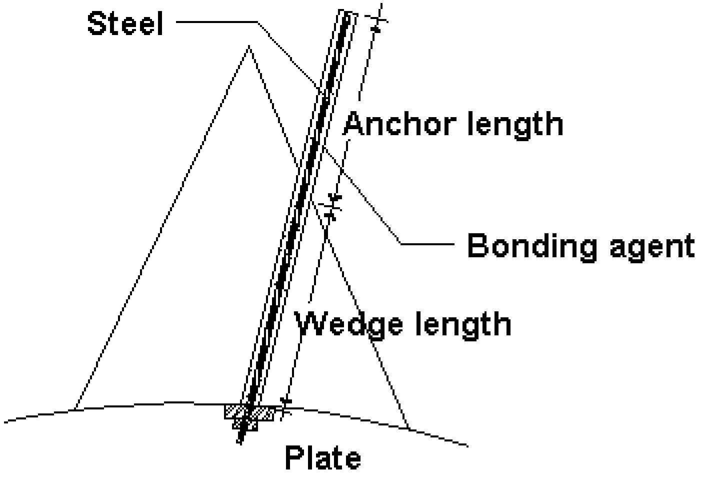
Wedge Visibility: Perimeter Wedges
Bolt Visibility: Intersecting Wedges
Wedge Translation
Tunnel Axis Orientation
Trend 125 ° Plunge 15 °
Wedge Information: Filter List...

Floor wedge [1]
FS: stable
Volume: 40.368 m3
Weight: 108.993 tonnes
Joint Codes: 000
Mode: unconditionally stable

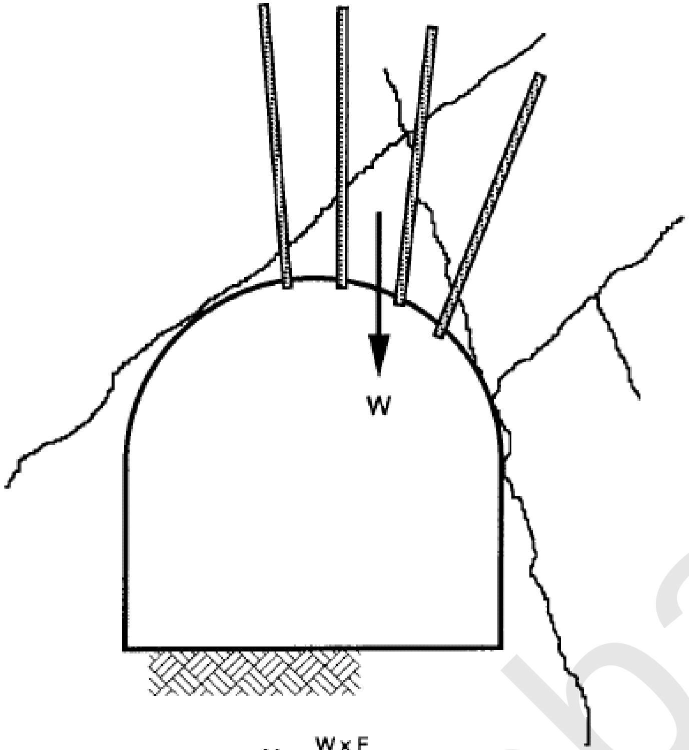
Lower Right wedge [4]
FS: 0.214
Volume: 4.443 m3
Weight: 11.997 tonnes
Joint Codes: 011
Mode: sliding on joint 1

Lower Left wedge [5]
FS: 0.012
Volume: 4.196 m3
Weight: 11.329 tonnes
Joint Codes: 100
Mode: sliding on joints 2 and 3

Roof wedge [8]
FS: 0.000
Volume: 16.386 m3
Weight: 44.241 tonnes
Joint Codes: 111
Mode: falling wedge

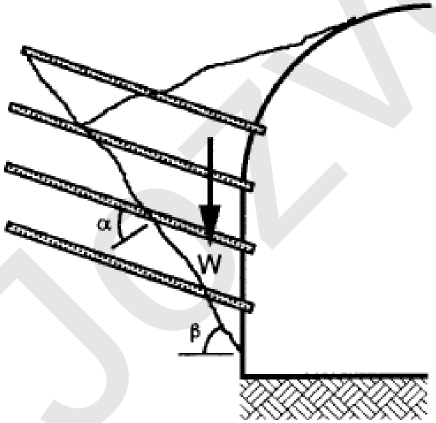

Steel
Anchor length
Bonding agent
Wedge length
Plate

zvebama.ir



$$N = \frac{W \times F}{B}$$

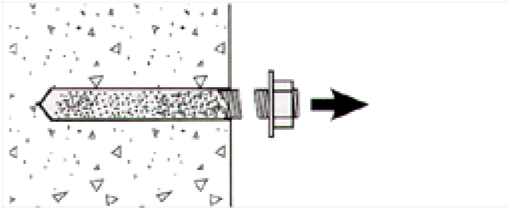
N = Number of bolts (dowels)
W = Weight of wedge
F = Safety factor (1.5 to 3.0)
φ = Friction angle of sliding surface
c = Cohesion of sliding surface
A = Area of sliding surface
B = Load bearing capacity of bolt (dowel)

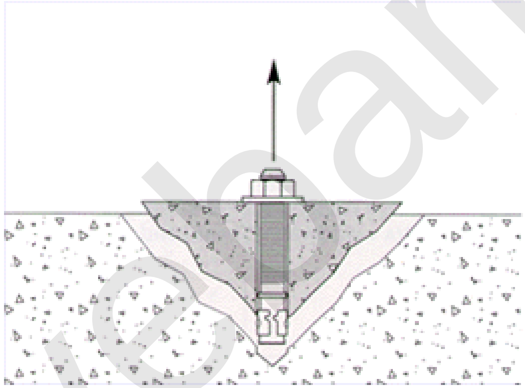


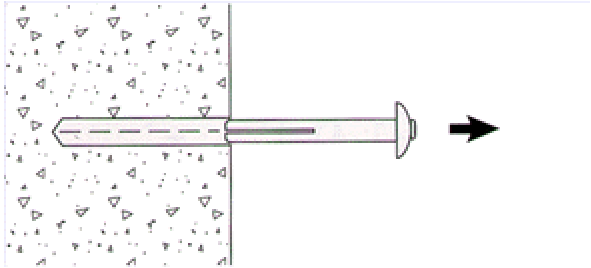
$$N = \frac{W\,(F \sin \beta - \cos \beta \tan \varphi) - cA}{B\,(\cos \alpha \tan \varphi + F \sin \alpha)}$$

zvebama.ir

مکانیزم های گسیختگی مهار







zvebama.ir

مکانیزم های گسیختگی شاتکریت

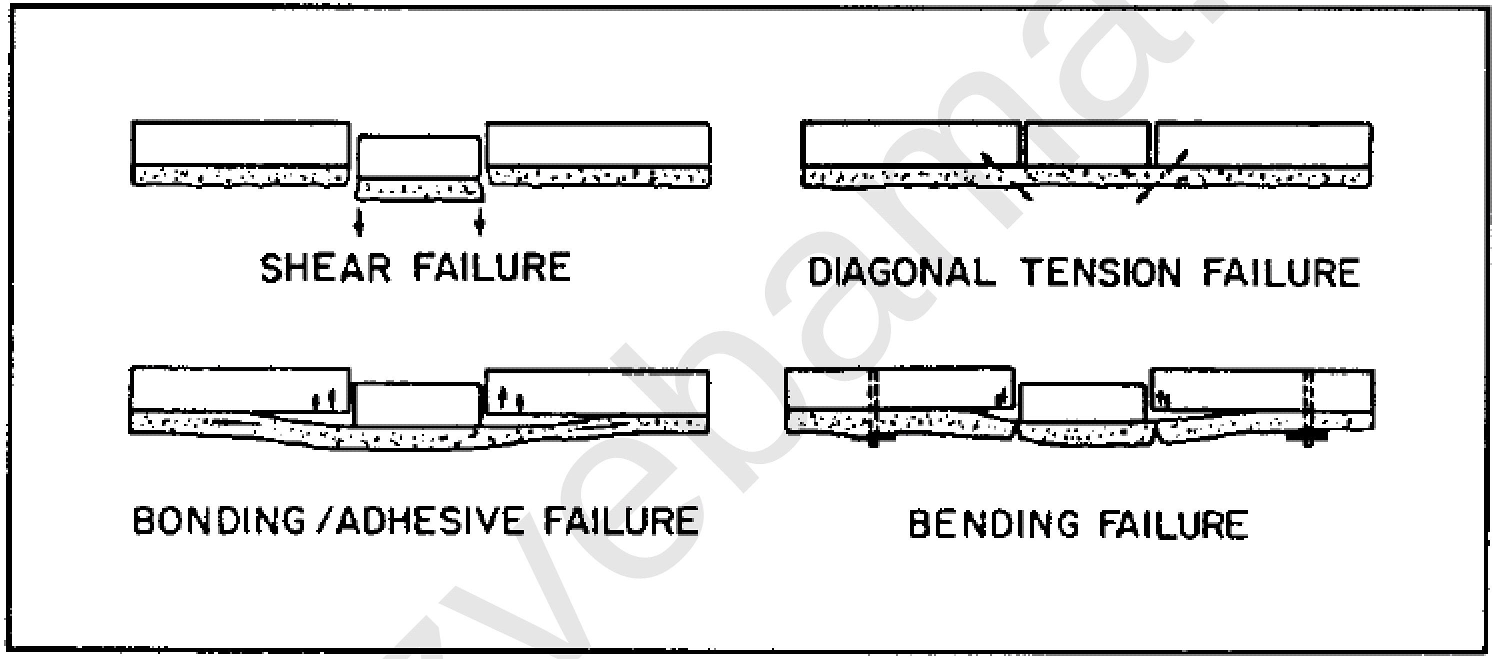

SHEAR FAILURE
DIAGONAL TENSION FAILURE
BONDING /ADHESIVE FAILURE
BENDING FAILURE

Figure 7-8. Shotcrete failure modes

zvebama.ir

تحلیل لرزه ای تونل ها و فضاهای زیرزمینی

به طور کلی مشاهدات و تجربیات نشان می دهند سازه های زیر زمینی و تونل ها نسبت به سازه های زیرزمینی در برابر زلزله مقاوم تر هستند. با این وصف در شرایط نامطلوب و خاص سازه های زیر زمینی نیز ممکن است در اثر زلزله دچار خسارت شوند.

۱– امواج لرزه ای عمدتا به صورت امواج فشاری و برشی در زمین منتشر می شوند. این امواج به طور عمده دو نوع تغییر شکل طولی (کشش و فشار و خمشی یا منحنی) و عرضی (بیضی شدگی) و ترکیبی از این دو ایجاد می کند.

۲– این تغییر شکل ها متناسب با خود، تنش های فشاری، کششی و خمشی و برشی در پوشش ایجاد می کند.

۳– امواج تنش برشی که به صورت قائم انتشار یافته و به تونل می رسد سبب بیضی شدن آن می شود یعنی یک قطر را کم و یک قطر را زیاد می کند و سبب ایجاد لنگر خمشی در محیط تونل می شود.

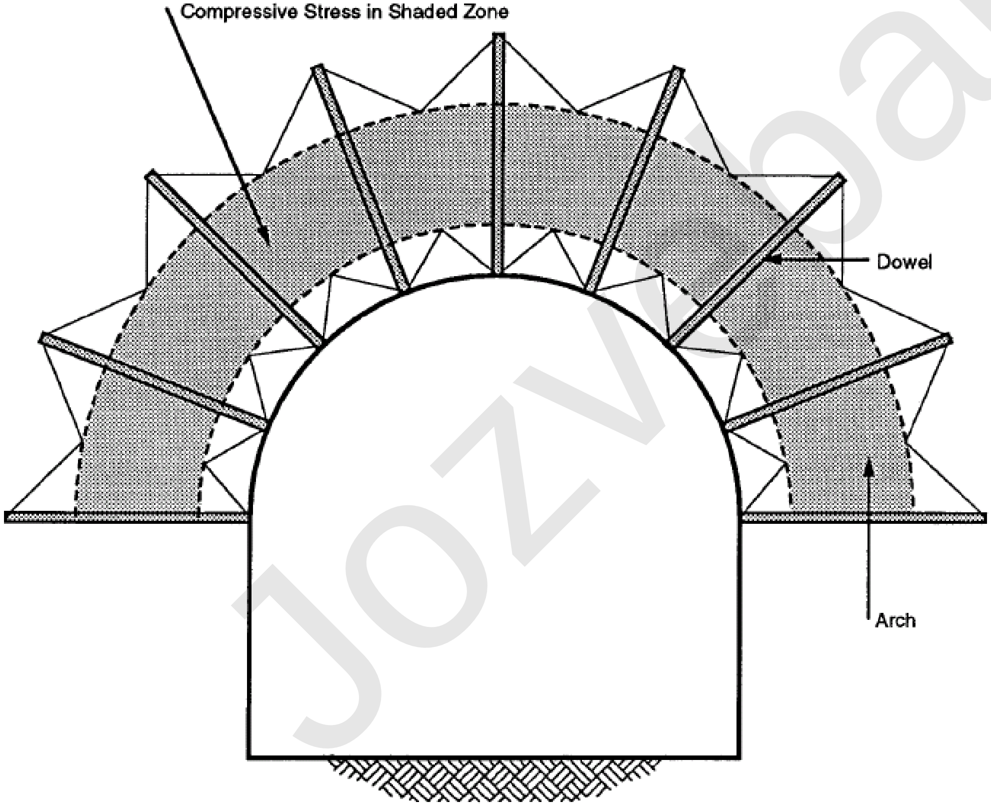
۴– اگر تنش های مماسی اولیه (معمولا فشاری) کوچک باشد تنش های کششی در اطراف تونل رخ می دهد. این تنش ها به تنش های اولیه اضافه می شوند. از آنجاییکه معمولا ابعاد مقطع تونل ها کمتر از یک طول موج لرزه ای است تنش های دینامیکی کمی در مقطع تونل ایجاد می شود.

zvebama.ir

۵– در تونلهای بدون پوشش معمولا تنش های لرزه ای قابل توجه نمی باشد و ترک های کششی ایجاد شده بلافاصله بسته می شوند. ولی احتمال سقوط گوه های سنگی احتمال وجود دارد.

۶– در صورت استفاده از مهارهای پیش تنیده تحت کشش که زمین را تحت فشار قرار می دهد یک حلقه فشاری در اطراف تونل ایجاد کرده و از تحت کشش قرارگرفتن زمین جلوگیری نموده و به حفظ مقاومت برشی زمین کمک کرده و از سقوط بلوک های سنگی جلوگیری می کند. این پدیده بعد از ایجاد کشش در مهارهای معمولی نیز در حد کمتر از مهار های پیش تنیده ایجاد می شود.

روشهای تحلیل لرزه ای:



۵–

zvebama.ir

۱– روشهای تجربی

در این روش از روی مطالعه آماری خسارت های ایجاد شده براساس شتاب و سرعت ذره ای رخ داده در تونلهای گذشته اقدام به ارزیابی مقاومت لرزه ای طرح موجود می نمایند.

در این روش خسارتهای ناشی از زلزله های رخ داده در برابر بیشینه شتاب و سرعت لرزه ای به صورت نمودارهایی رسم شده است. شتاب بیشینه شتاب در بالای تونل و در سطح زمین محاسبه می شود.

براساس سرعت و شتاب ذره ای، اندازه صدمات محتمل از روی نموداری تجربی به دست می آید.
سه سطح خسارت به صورت تعریف می شود:

۱– بدون آسیب: نشان دهنده هیچ گونه آسیب از قبیل ترک خوردگی یا سقوط سنگ در تونل می باشد که در ۰/۲ رخ می دهد.۸g و یا در بیشینه شتابهای زیر حدودا in/secبیشینه سرعت ذره ای زیر حدودا

۲– آسیب کم: نشان دهنده مقداری سقوط و ریزش محلی و ترک خوردکی در تونل است که در بیشینه سرعت ۰/۵–۰/۲ رخ می دهد.۸–۳۷g و یا بیشینه شتاب in/secذره ای حدودا

۳– آسیب زیاد: نشان دهنده ریزش قطعات بزرگ سنگ، ایجاد ترک های بزرگ ومسدود شدن تونل ۰/۵ رخ می دهد.۳۷g و یا شتابهای بالای in/secمی باشد که در بیشینه سرعت های ذره ای بالای حدودا

zvebama.ir

اثر مشخصات تونل ها

۱– عمق تونل: هرچقدر عمق یا سرباره تونل بیشتر باشد آسیب وارده بر آن نیز کمتر خواهد بود. معمولا تونل های با عمق کمتر از ۵۰ متر دچار آسیب های بیشتری می شوند و در تونل های عمیقتر از ۳۰۰ متر انتظار کمترین آسیب می رود.

۲– سیستم نگهداری جداره تونل: کمترین خسارت گزارش شده مربوط به سازه های نگهدارنده با بتن مسلح می باشد. بیشترین خسارت نیز برای تونل های بدون پوشش مشاهده شده است. در پوشش های بتن غیر مسلح و مصالح بنایی نیز سطح خسارت متوسطی ملاحضه گردیده است. با افزایش ضخامت پوشش میزان آسیب وارده بیشتری نیز ملاحظه شده است.

۳– نوع سنگ و خاک دربرگیرنده تونل: بیشترین خسارت در تونل های واقع در سنگ های رسوبی و کمترین آن در سنگ های دگرگون ملاحظه شده است. سنگ های آذرین) نیز در شرایط متوسط قرار داشته اند.colluvimusو واریزه ها (

روشهای ریاضی:

در این روش میزان کرنش حداکثر، تنشهای مماسی و نرمال ایجاد شده در پوشش در اثر برخورد امواج فشاری، برشی و رایلی حاصل از زلزله تخمین زده شده و با میزان قابل تحمل و یا حد گسیختگی مصالح مقایسه می شود. این روش جزو دقیق ترین روش های حال حاضر می باشد. ولی دارای محدودیتهایی به لحاظ شکل تونل، پارامترهای ورودی بار زلزله، تاثیر درزه و شکافها، در انتشار موج و مدل رفتار زمین می باشد.

تحقیقات انجام گرفته توسط Hashash و همکاران در سالهای ۲۰۰۱ و ۲۰۰۵ این روش را به طور کامل بیان می دارد.

zvebama.ir

۳– تحلیل شبه استاتیکی

در این روش تنش دینامیکی به صورت یک تنش استاتیکی معادل معرفی شده و تنش های حاصل از آن در داخل بدنه پوشش محاسبه می گردد.

۴– روش های عددی

در این روش، به کمک روش های عددی شامل المان های محدود، المان های مجزا، تفاضل های محدود، المانهای مرزی و یا گاهی با ترکیبی از آنها انتشار امواج لرزه ای در محیط شبیه سازی می گردد. این روشها به دو صورت انجام می گیرد:

۱– تحلیل شبه دینامیکی: تنش دینامیکی به صورت یک تنش استاتیکی معادل تعریف می شود. از آنجایی که در این حالت میرایی و استهلاک انرژی امواج در نظر گرفته نمی شود نتایج آن محافظه کارانه تر خواهد بود.

۲– تحلیل دینامیکی کامل: در این حالت امواج زلزله به صورت تاریخچه زمانی شتاب، سرعت، جابه جایی و یا تنش به مدل اعمال شده و انتشار امواج درون محیط شبیه سازه شده و کرنشها و تنش ها تخمین زده می شود.

zvebama.ir

خلاصه روش ریاضی

در اثر زلزله کرنش های کششی در وجه خارجی و داخلی پوشش ایجاد می شود که کشش در وجه خارجی اهمیت چندانی ندارد و حتی ترک های داخلی نیز بلافاصله بسته می شوند و در کل ضخامت گسترش نمی یابند.

لذا هیچ کدام نمی توانند مکانیز شکست کلی پوشش تونل را ایجاد نمایند. یک روش ساده برای طراحی لرزه ای تونل ها تعیین کرنش های حاصله در اثر زلزله و مقایسه آن با کرنش آستانه مصالح پوشش (معمولا بتن) می باشد.

zvebama.ir

Box 6-6. Seismic Analysis of Circular Tunnel Linings (Continued)

1. Longitudinal Bending and Extension or Compression

Obtain seismic input parameter from seismologist:

V_s = maximum particle velocity from shear wave

A_s = maximum particle acceleration from shear wave

Obtain effective shear wave propagation velocity C_s of rock medium from in situ seismic survey or from relationship with effective shear modulus G (under earthquake shear strain level):

$C_s = \surd G/\rho$

where ρ = specific gravity of rock mass. Shear modulus is related to Young's modulus E_r by

$G = E_r/2(1 + v_r)$

where v_r is Poisson's ratio for the rock mass

With the assumption that the tunnel structure is flexible relative to the ground, then the tunnel structure will conform to the free-field motion of the ground, and the maximum and minimum (compression, extension) strain of the tunnel structure is

$E_{max/min} = \pm(V_s/C_s) \sin \theta \cos \theta \pm (A_s R/C_s^2) \cos^3 \theta,$

where R = tunnel radius (strictly speaking, R = distance from extreme compression fiber to neutral axis) and θ = angle of incidence of seismic shear wave. The greatest/smallest strain is usually found for $\theta = 45°$:

$E_{max/min} = \pm 0.5\ V_s/C_s \pm 0.35\ A_s R/C_s^2$ -

zvebama.ir

2. Ovaling or Racking

A seismic shear wave impinging on a circular tunnel structure at a right angle will cause the structure to rack or ovalize, shortening one diameter D by Δ D and lengthening the orthogonal diameter by an equal amount. In the free field rock mass, the shear strain can be approximated by

$$\gamma_{max} = V_s/C_s,$$

and an unlined hole driven through the rock mass would suffer an ovalizing distortion of

$$\Delta D / D = \pm \gamma_{max} (1 - \nu_r)$$

The maximum strain in the lining, then, is

$$E_{max} = V_s/C_s [(3(1 - \nu_r)t/R + 1/2 R/t E_r/E_c \{(1 - \nu_c^2)/(1 + \nu_r)\}]$$

where t = lining thickness, R = tunnel radius, E_c = concrete modulus, ν_c = Poisson's ratio for concrete.

3. Notes

Ovalizing strains are superimposed on strains pre-existing from static loads.
For a maximum earthquake design, usable compressive strain is about 0.003.
Tension cracks due to excessive extension dynamic strains usually cannot be avoided. They will, however, generally close again after the seismic event. Tension cracks can be reduced in size and distributed by appropriate crack reinforcement.

zvebama.ir

4. Example - Los Angeles Metro, Circular Tunnel in San Fernando Formation

$A_s = 0.6g$, $V_s = 3.2$ ft/sec, $C_s = 1360$ ft/sec

$R = 10$ ft, $t = 8.0$ in., $E_c/(1 - v_c^2) = 662{,}400$ ksf, $E_r = 7200$ ksf, $v_r = 0.33$

1. Longitudinal:

$$E_{max/min} = \pm 0.5 \times 3.2/1360 \pm 0.35 \times 0.6 \times 32.2 \times 10/1360^2$$

$$= \pm 0.00118 \pm 0.000037 = \pm 0.00122 < 0.003 \text{ - ok}$$

2. Ovalizing:

$$\Delta D/D = + 2 * 3.2/1360\ (1 - 0.33) = 0.0031$$

$$E_{max/min} = \pm 3.2/1360\ [3(1 - 0.33)(8/120) \pm 1/2 * 120/8 * 7200/\ (1 + 0.33) \times 1/662{,}400)]$$

$$= \pm 3.2/1360\ (0.134 + 0.122) = 0.0006 < 0.003 \text{ - ok}$$

This example is for a concrete tunnel through a weak, soil-like material. Tunnels through stronger, rock-like materials would be subjected to lower seismic strains.

Reference: Wang (1985)

zvebama.ir

رفتار واقعی لرزه ای تونل ها در زمین

مهمترین فرض در روش مشروح این است که زمین نسبت به تونل صلب است و تونل و زمین اطراف در حین زلزله با همدیگر و هماهنگ حرکت می کنند و باهم اندر کنش ندارند. ولی با توجه به این که در اثر زلزله تغییر شکل های مختلفی در جهات مختلف به صورت تصادفی ایجاد می شود لذا تحلیل، طراحی و مقاوم سازی سیستم در برابر این تغییر شکل ها بسیار مشکل و حتی در برخی موارد غیر ممکن است.

از طرفی صلبیت بیش از حد سازه زیرزمینی منجر به آسیب پذیرتر شدن آن می گردد. بنابراین بهتر است سازه های زیر زمینی انعطاف پذیر ساخته شود.

اندرکنش خاک و سازه در سازه های زیرزمینی حائز اهمیت است. ولی اگر سازه طوری ساخته شود که از حرکات زمین طبعیت کند آنگاه از شدت این مسئله کم می گردد. معمولا سعی می گردد در طراحی سازه های زیرزمینی در زمین های غیرسنگی سازه از تغییر شکل های زمین طبعیت نماید ولی اگر خاک خیلی سست باشد اثر اندرکنش قابل توجه بوده و باید لحاظ گردد.

zvebama.ir

تاثیر گسل ها

۱– در جانمایی تونل ها باید تا حد ممکن از برخورد آنها با گسل اجتناب گردد. چرا که طراحی یک سازه مقاوم در برابر گسل امکان پذیر نیست. در صورت عدم امکان این مسئله باید تمهیداتی اندیشید تا خسارات وارده حداقل باشد.

۲– در تونل های ریلی بهتر است ابعاد تونل بزرگتر از اندازه لازم باشد تا در صورت تغییر شکل ها و کوچک شدن ابعاد تونل، فضای لازم برابر تردد باقی بماند. در ضمن لازم است زمین اطراف تقویت شده تا در حین جابه جایی دچار ریزش نگردد. همچنین توصیه می گردد پوشش تونل در این ناحیه انعطاف پذیر ساخته شود. مثلا پوشش اولیه ترکیبی از لاتیس گیردر، شبکه فولادی، مهارها و شاتکریت ساخته شود.

۳– در تونل های آبی کم عمق راه حل ساده تعمیر و برداشته شدن محل آسیب دیده و جایگزینی آن است. ولي این کار ممکن است در تونل عمیق آسان نباشد. در این حالت توصیه می شود تونل بزرگتر از اندازه خود ساخته شده و لوله ای انعطاف پذیر درون آن

zvebama.ir

پایداری پرتال ها (ورودی و خروجی)

پرتال ها آسیب پذیری زیادی در جابه جایی های دائمی در هنگام زمین لرزه دارند. لذا پایداری شیبهای پرتال ها باید در شرایط دینامیکی ارزیابی شده و اقدامات لازم برای پایدار سازی آنها مانند استفاده از مهارها صورت گیرد. از مشکلات دیگر در پرتال ها، سقوط سنگ های سست ولق شده در اثر زلزله است. در این مورد نیز اقدامات لازم برای جلو گیری از لق شدن سنگ ها مانند استفاده از پوشش شاتکریت صورت گیرد.

جزوه باما

دانلود جزوات ، نمونه سوالات
و پاورپوینت‌های دانشگاهی

Jozvebama.ir