



Pattin bolt



Goldenberg bolt



Bail bolt

(a) Standard types



(b) Shells for large diameter drillholes or for use in soft rock

شکل ۵-۵- نمونه هایی از پوسته های منبسط شونده

### ۵-۵-۲ راکبولت‌های گیردار شده با رزین

راک بولتهای نصب شده به طریقه مکانیکی هنگامیکه در معرض ارتعاش یا لرزش ناشی از عملیات انفجار قرار می‌گیرند یا در سنگهای ضعیف استفاده می‌شوند، عملکرد مناسبی ندارند، در نتیجه در این موارد بهتر است از راک بولتهای رزین دار استفاده شود.



شکل ۵-۶- نمونه ای از کپسول رزین دو قسمتی

همانطور که در شکل ۵-۶ نشان داده شده است، رزینها بطور معمول تشکیل شده‌اند از دو محفظه جداگانه که یکی شامل رزین و دیگری شامل کاتالیست می‌باشد. ابتدا رزین‌ها در داخل چال حفاری شده قرار داده می‌شوند و سپس بولت به داخل رزین فروبرده می‌شود. بدین ترتیب پوشش پلاستیکی محفظه‌ها پاره شده و رزین و کاتالیست با یکدیگر مخلوط می‌گردند. نصب راکبولت‌های رزین‌دار فقط چند دقیقه طول می‌کشد (بستگی به مشخصات رزین دارد) و مهار بسیار مقاومی را ایجاد می‌کنند.

این نوع مهار در اکثر سنگها خوب عمل می‌کند مانند شیل‌های ضعیف و گل‌سنگهایی که برای آنها راکبولت‌های منبسط شونده مناسب نمی‌باشد. برای مصارف دائمی باید از راکبولت‌های با تزریق کامل رزین استفاده کرد. در این موارد، تعدادی از کپسول‌های رزین‌کننده در کنار کپسولهای شامل رزین زودگیر کننده جا داده می‌شوند. پس از گیرش رزین تند گیر، بولت کشیده می‌شود و سپس گیرش رزین‌کننده آغاز می‌شود.

قسمت عمده‌ای از هزینه بالای رزینها توسط سرعت بالای نصب آنها جبران می‌شود. رویه شرح داده شده منجر به نصب راکبولتی پس کشیده و تزریق شده در یک مرحله می‌شود که توسط سیستمهای دیگر بدست نمی‌آید.

اکثر سیستمهای رزین را مدت محدودی می‌توان در انبار نگهداری کرد، این مدت بستگی به درجه حرارت انبار دارد. ممکن است حتی کمتر از ۶ ماه باشد. به همین دلیل در هنگام خرید آنها باید دقت کرد تا در طول مدت مجاز مقدار مورد نیاز برای نگهداری خریداری شود. همچنین باید دقت شود که جعبه‌ها در همان شرایطی که کارخانه سازنده پیشنهاد کرده نگهداری شوند. در کارهای حساس بهتر است قبل از استفاده از رزینها در تونل از هر جعبه یک نمونه امتحان شود. به این صورت که می‌توان جداکننده رزین و کاتالیست را با دست پاره کرد و پس از مخلوط کردن آنها، زمان لازم برای گرفتن آنها را اندازه گرفت و آن را با زمان داده شده توسط کارخانه مقایسه کرد.

پاره کردن پوشش پلاستیکی بسته‌های رزین و کاتالیست و مخلوط کردن مناسب آنها نیز یک مسئله است. بریدن انتهای بولتها با زاویه‌ای مناسب به این مسأله کمک می‌کند. تعداد چرخش بولت به منظور مخلوط کردن رزین و کاتالیست توسط کارخانه‌های سازنده رزین مشخص می‌شود.

در برخی سنگهای سست‌تر، سطح سوراخ در هنگام حفاری توسط رس پوشیده می‌شود که موجب لیز خوردن کپسول‌های رزین در هنگام چرخش بولت در آنها می‌شود و موجب مخلوط شدن ناقص و پیوند ضعیف می‌گردد. در توده سنگهای با درز و شکاف فراوان ممکن است رزین قبل از گیرش در لابه‌لای درزها نفوذ کند و سبب ایجاد حفراتی در رزین اطراف راک بولت شود در هر دو این حالات، بهتر است از تزریق دوغاب سیمان به جای رزین استفاده گردد.

در مورد مقاومت دراز مدت رزین در مقابل خوردگی و همچنین واکنش برخی از رزینها در برابر آبهای خورنده عدم اطمینانهایی وجود دارد. البته برای مصارف موقت این مشکلات چندان مهم نیستند، اما هنگامیکه استفاده بلند مدت مد نظر است، بدلیل مشکلات اشاره شده استفاده از دوغاب سیمان پیشنهاد می‌شود.

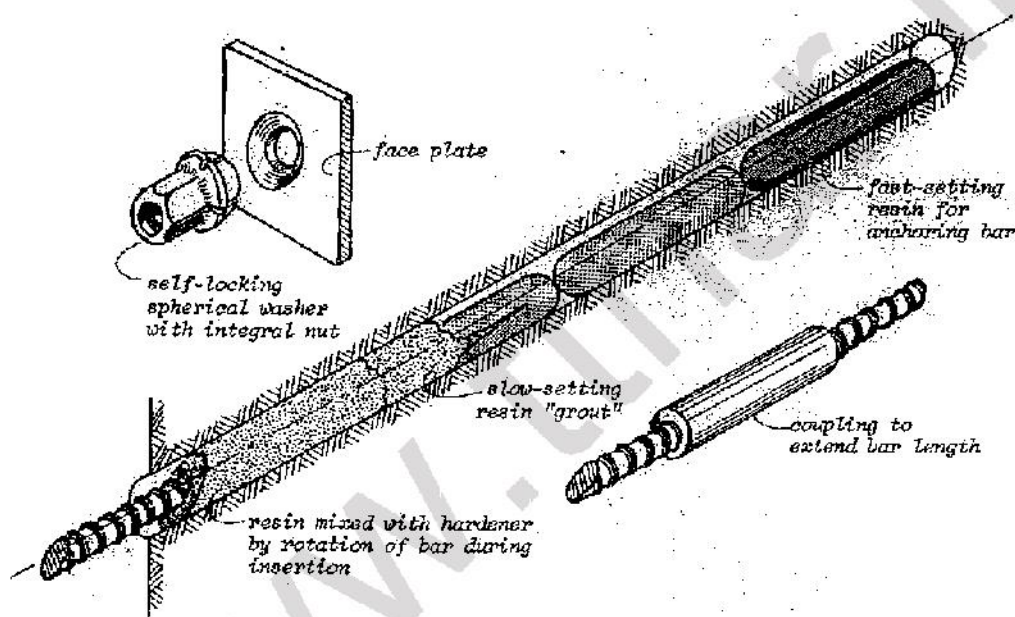
مزایای راکبولتهای گیردار شده با رزین:

- ۱- سرعت بالا: نصب سریع بولتها را ممکن می‌سازد. بولتها را می‌توان در عرض چند دقیقه نصب و پس کشیده کرد و به این ترتیب به سرعت برای تونلها حائل فراهم نمود.
- ۲- دوام: این نوع رزین بولتها را در مقابل خوردگی در برابر آب، نمک و اسیدها و بازهای رقیق محافظت می‌کند.

- ۳- مقاومت در برابر لرزش: این نوع راک بولتها تحت تأثیر لرزش قرار نمی گیرند و به پس کشیدن مجدد پس از انفجار احتیاج ندارند.
- ۴- مقاومت گیرداری نسبتاً زیادی می توان توسط آن در سنگ های با کیفیت ضعیف بوجود آورد.

معایب:

قیمت رزین گران بوده و عمر نگهداری آن در انبار خیلی کوتاه است بویژه در هوای گرم. اصولاً بیشترین مصرف کپسول های محتوی رزین در کشورهای است که خود آنها را تولید می کنند و لذا سرعت در دسترس بوده و مشکل نگهداری در انبار وجود ندارد.



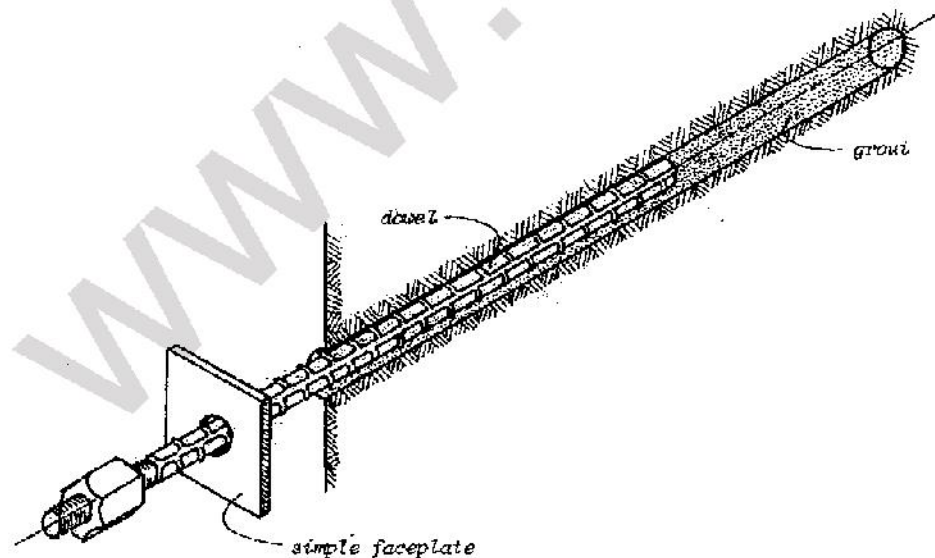
شکل ۵-۷- راکبولت گیردار شده با رزین

### ۵-۵-۳ میل مهارهای تزریق شده

در شرایطی که امکان نصب میل مهار در نزدیکی سینه کار وجود دارد یا انتظار تغییرات تنش در مراحل بعدی حفاری می رود میل مهارها را می توان به جای راکبولتها به کاربرد. تفاوت اساسی این دو سیستم در این است که راکبولتهای پس کشیده نیروی مثبت به سنگ اعمال می کنند، در حالیکه میل مهارها برای بوجود آمدن نیرو در آنها و موثر واقع شدنشان نیاز به حرکت سنگ (تغییر شکل تونل) دارند. ساده ترین نوع میل مهار که امروزه به کار می رود میل مهار با تزریق سیمان است که در شکل ۵-۸ نشان داده شده است.

تزریق دوغاب (معمولا با نسبت آب به سیمان ۰/۳ یا ۰/۳۵) با گذاشتن لوله تزریق در انتهای سوراخ و با پیشروی تزریق، کشاندن آن به سمت بیرون انجام می‌گیرد. چنانچه ویسکوزیته دوغاب مورد استفاده مناسب باشد از حفره بیرون نمی‌ریزد. میل‌مه‌ار تا نیمه در داخل سوراخ فرو می‌رود و قبل از فرو کردن تمام آن، خم کوچکی به آن داده می‌شود. این خم سبب می‌شود تا در هنگام گرفتن دوغاب، میل‌مه‌ار در جای خود نگه داشته شود. پس از گرفتن دوغاب، صفحه پیشانی در محل خود قرار داده شده و مهره را سفت می‌نمایند. گذاشتن صفحه پیشانی ضروری است بدلیل اینکه اگر میل‌مه‌ار طوری باشد که در برابر تغییر مکان سنگ واکنش نشان دهد، سنگ مجاور سوراخ تمایل به کشیده شدن از کنار میل‌مه‌ار دارد، مگر اینکه توسط صفحه پیشانی نگه داشته شده باشد.

سیستم‌هایی هم عرضه شده اند که از کیسولهای حاوی پودر سیمان در آنها استفاده می‌شود که در آنها کیسولهای کوچکتر حاوی آب وجود دارد. عملیات نصب و چرخاندن میل، باعث خورد شدن کیسول‌ها شده و یک دوغاب زودگیر ایجاد می‌شود. این سیستم در سالهای پایان دهه ۱۹۷۰ توسط انجمن معدن ایالات متحده آمریکا عرضه شد ولی در سالهای اخیر استفاده از آن کمتر شده است. از مزایای این میل‌مه‌ارها، ساده و ارزان بودن آنهاست. از معایب آن این است که این راکولت‌ها را نمی‌توان کشید و بنابراین باید قبل از اینکه برای توده سنگ تغییر شکل قابل ملاحظه و زیادی رخ بدهد نصب شود.

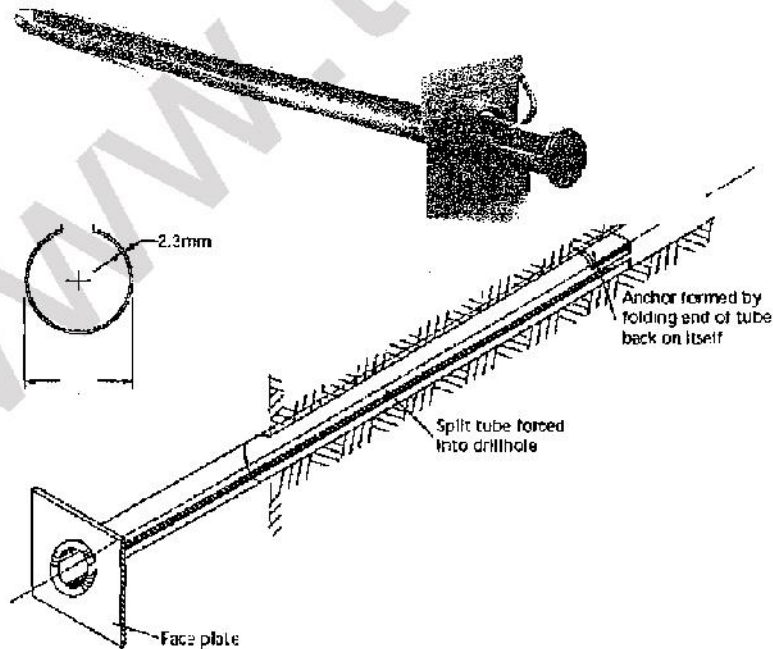


شکل ۵-۸- میل‌مه‌ار تزریق شده

## ۵-۴ میل‌مهاری اصطکاکی یا مجموعه شکافدار

این میل‌مهاری توسط Scott در سال ۱۹۷۶ ابداع شد (Scott, 1976) و در حال حاضر توسط شرکت Ingersoll-Rand ساخته می‌شود. این سیستم همانطور که در شکل ۵-۹ نشان داده شده است از یک لوله شکافدار متشکل از فولاد با مقاومت بالا و یک صفحه پیشانی تشکیل شده است. این سیستم با فشار دادن Split Set در سوراخی با قطر کوچکتر نصب می‌شود و نیروی شعاعی بوجود آمده توسط فشار لوله C شکل باعث ایجاد مهاری اصطکاکی در سرتاسر طول سوراخ می‌شود. به دلیل نصب ساده این سیستم، استقبال خوب و سریعی از آن به عمل آمده است. لیستی از انواع تینپ این مهاری همراه اندازه و ظرفیت آنها در جدول ۵-۱ آورده شده است. اگر ظرفیتی بیش از حد مجاز بر این سیستم تحمیل نگردد، کارایی آنها بسیار خوب خواهد بود.

از آنجا که محافظت از سطح خارجی لوله شکافدار عملی نیست، خوردگی یکی از مشکلات عمده مجموعه شکافدار است. گالوانیزه کردن لوله آن خوردگی را کم می‌کند ولی به عنوان راه حلی برای استفاده بلند مدت آنها در محیط‌های خورنده به حساب نمی‌آید. برای بالا بردن قابلیت انتقال بار می‌توان اطراف لوله شکافدار را پس از نصب اولیه آن با دوغاب سیمان پر کرد. تزریق دوغاب سیمان تا ۲۰٪ انتقال بار را افزایش می‌دهد.



شکل ۵-۹- میل‌مهاری اصطکاکی یا مجموعه شکافدار

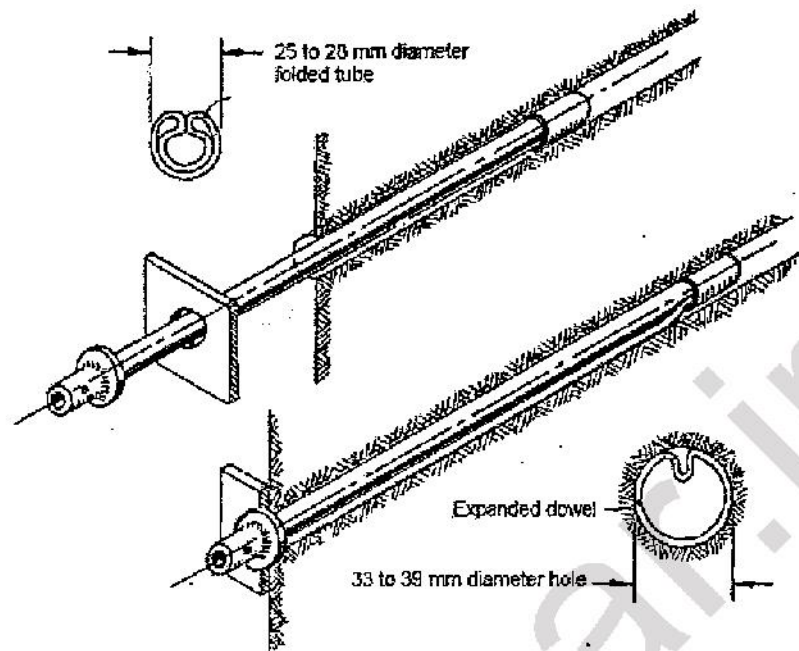
جدول ۱-۵- مشخصات انواع مجموعه شکافدار

مدل مجموعه شکافدار	SS-۳۳	SS-۳۹	SS-۴۶
قطر پیشنهادی سرمه	۳۱ تا ۳۳ mm	۲۵ تا ۲۸ mm	۴۱ تا ۴۵ mm
متوسط ظرفیت شکست	۱۰/۹ تن	۱۲/۷ تن	۱۶/۳ تن
حداقل ظرفیت شکست	۷/۳ تن	۹/۱ تن	۱۳/۶ تن
مهار اولیه پیشنهادی	۲/۷ تا ۵/۴ تن	۲/۷ تا ۵/۴ تن	۴/۵ تا ۸/۲ تن
طول لوله	۰/۹ تا ۲/۴ متر	۰/۹ تا ۳/۰ متر	۰/۹ تا ۳/۶ متر
قطر خارجی لوله	۳۳ mm	۳۹ mm	۴۶ mm
ابعاد ورق پیشانی	۱۵۰x۱۵۰ mm	۱۵۰x۱۵۰ mm	۱۵۰x۱۵۰ mm
	۱۲۵x۱۲۵ mm	۱۲۵x۱۲۵ mm	-
سیستم گالوانیزه	موجود است	موجود است	موجود است
سیستم ضد زنگ	موجود نیست	موجود است	موجود نیست

از مزایای این نوع میل مهار آن است که نصب آن ساده و سریع انجام می‌شود و از راکبولتهای تزریقی با ظرفیت مشابه ارزان تر است. از معایب این میل مهار آن است که قطر چال حساس و بحرانی است و بسیاری از مشکلاتی که هنگام نصب پیش می‌آید بعلمت بزرگ بودن یا کوچک بودن قطر چال است. در مواردی زنگ زدگی خیلی سریع اتفاق می‌افتد و ثابت شده است که این زنگ زدگی وقتی که راکبولت بعنوان حائل و تقویت کننده در دراز مدت استفاده می‌شود مشکل آفرین است.

#### ۵-۵-۵ میل مهارهای از نوع Swellex

سیستم Swellex که در شکل ۱-۵-۱۰ نشان داده شده است، توسط شرکت Atlas Copco ساخته و وارد بازار شده است. طول مهار ممکن است به ۱۲ m برسد و از یک لوله با قطر ۴۲mm ساخته شده است که در هنگام ساخت مجاله می‌شود تا به قطر ۲۵mm تا ۲۸ برسد و می‌تواند داخل سوراخهایی با قطر ۳۲mm تا ۳۹ نصب شود. در هنگام داخل کردن آن به داخل سوراخ نیروی فشاری مورد نیاز نمی‌باشد و پس از آن با فشار زیاد آب (حدود ۳۰MPa یا ۴۳۰۰psi) لوله مجاله شده را باز می‌کنند تا در تماس با جدار سوراخ قرار گیرد.



شکل ۵-۱۰ سیستم Swellex

از آنجا که سطح بیرونی لوله در تماس مستقیم با سنگ قرار دارد، خوردگی لوله Swellex مشکلی است که باید مورد توجه قرار گیرد. شرکت Atlas Copco برای مقابله با این مشکل، پوششهایی مقاوم در برابر خوردگی طراحی کرده است. سرعت نصب Swellex در مقایسه با سیستم های دیگر راکبوت یک مزیت اساسی برای آن بشمار می آید.

براساس ظرفیت باربری می توان Swellex ها را طبقه بندی کرد. Swellex استاندارد، ظرفیت  $100\text{ kN}$  را دارد. در حالیکه Swellex سوپر، برای بار  $190\text{ kN}$  طراحی شده است.

امروزه از Swellex در تونل ها زیاد استفاده می شود، دلایل این استفاده گسترده عبارتند از:

- امکان استفاده از سوراخهای با قطر متفاوت.
- مهارهای Swellex قابلیت تطبیق با حرکت بزرگ زمین را دارا هستند.
- عدم حساسیت در برابر لرزه های ناشی از انفجار.
- قابلیت نصب سریع و آسان.
- ظرفیت بالا.
- انواع بسیار زیاد آنها (با طولهای بزرگ) و امکان استفاده از آنها در نواحی باریک و کوچک.
- امکان محافظت از آنها در برابر خوردگی.
- عدم احتیاج به مواد شیمیایی زیان آور.



در سال ۱۹۹۳، Swellex EXL جانشین Swellex اولیه شد که با فولاد با مقاومت بالا ولی تغییر شکل پذیر (ductile) ساخته شده بود. این فولاد می تواند تغییر شکل زیادی را بدون کاهش مقاومت داشته باشد.

#### ۵-۶ مشخصات بار-تغییر شکل انواع راکبولت‌ها و میل‌مهاریا

Stillborg (1994) یک سری آزمایش بر روی بولتها و داولهای نصب شده در جهت عمود بر یک درزه مدل‌سازی شده که با استفاده از دو بلوک بتنی مسلح با مقاومت بالا (دارای مقاومت فشاری  $60 \text{ MPa}$ ) ساخته شده بود. این نوع آزمایش شرایط واقعی‌تری را نسبت به آزمایش کشش (pull-out test) ایجاد می‌کند.

راک بولتها و داول‌های مورد آزمایش در چالهای حفر شده با چکش ضربه‌ای و با همان روشهایی که در شرایط واقعی کار گذاشته می‌شوند، نصب شدند. سپس این سیستم‌های حائل با کشیدن دو بلوک بتنی به سمت خارج (در جهت مخالف یکدیگر) با سرعتی ثابت و اندازه‌گیری تغییر اندازه شکاف مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌های Stillborg در شکل ۵-۱۱ خلاصه شده است که منحنی‌های بار تغییر شکل را برای انواع بولت‌ها و داول‌های مورد آزمایش ارائه می‌دهد.

#### ۵-۷ توری سیمی

توری سیمی برای نگهداری قطعات کوچک سنگ یا بعنوان مسلح کننده شاتکریت مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده از دو نوع توری سیمی در تونل‌ها متداول است:

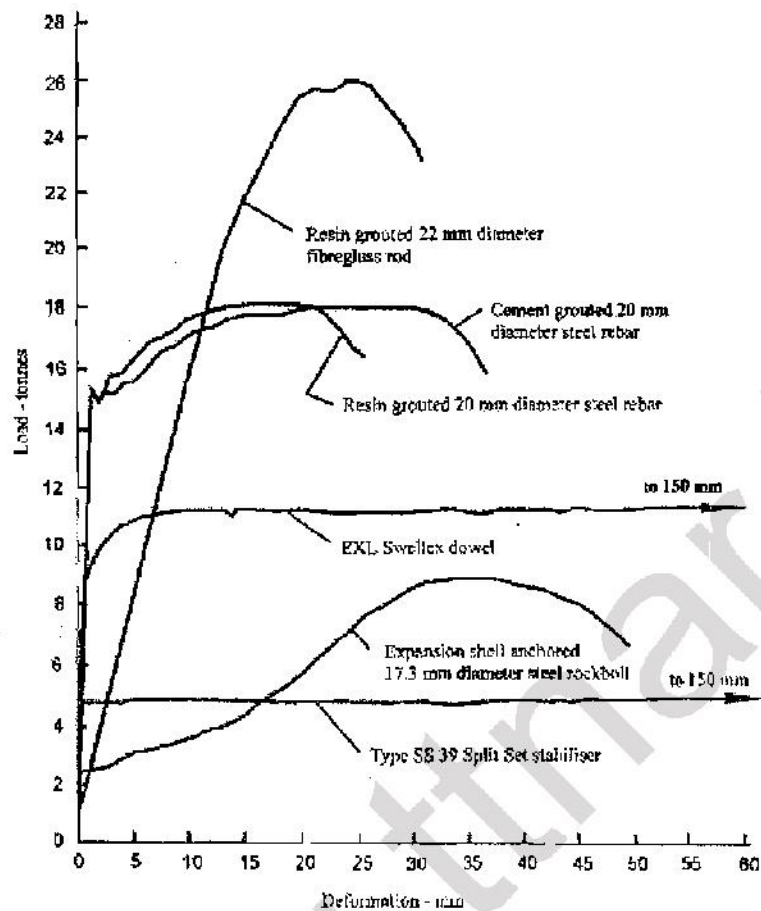
الف - توری بافته یا توری سرندي (chainlink mesh)

ب - توری جوش شده (weld mesh).

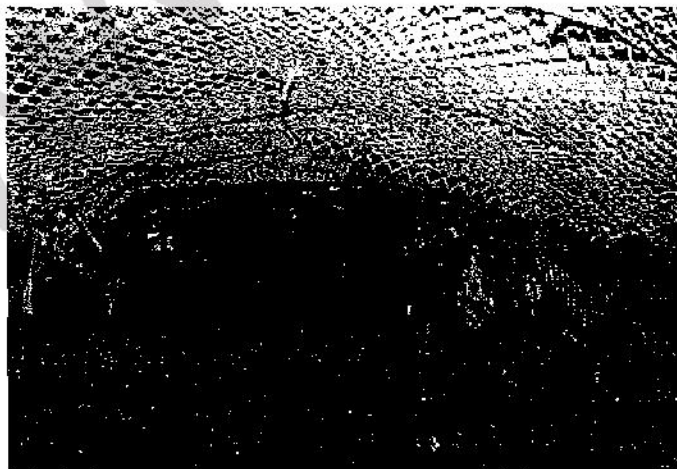
#### ۵-۷-۱ توری بافته یا توری سرندي

این توری که معمولا برای حصارکشی هم بکار می‌رود مرکب از سیم یا مفتول بافته است. مفتول را می‌توان برای جلوگیری از خوردگی، گالوانیزه کرد. این توری حالت انعطاف پذیر داشته و نسبتا محکم است. یک مورد از کاربرد آن در شکل ۵-۱۲ مشاهده می‌شود که توری سرندي به سقف تونل توسط راکبولت متصل شده است. قطعات کوچک سنگ که از سقف جدا می‌شوند توسط توری نگهداری می‌شوند، که بسته به فاصله نقاط تکیه گاهی می‌تواند بار قابل ملاحظه‌ای از سنگها را تحمل نماید.

توری سرندي برای مسلح کردن شاتکریت مناسب نیست زیرا شاتکریت از این توری براحتی عبور نمی‌کند. بنابر این، استفاده از این نوع توری در مسلح کردن بتن توصیه نمی‌شود و در این موارد استفاده از توری جوش شده ارجحیت دارد.



شکل ۵-۱۱- نتایج آزمایشات Stillborg بر روی انواع راکبولت و میل مهار



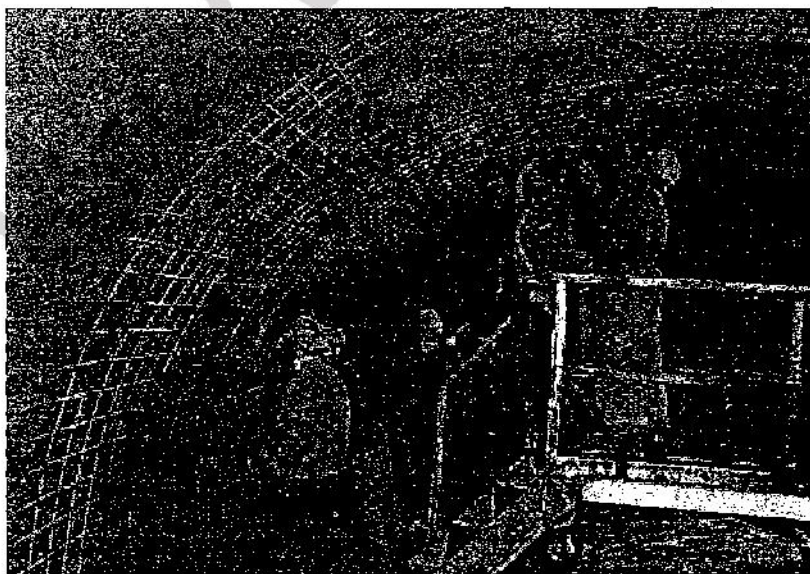
شکل ۵-۱۲- نمونه توری سرنبدی

## ۵-۷-۲ توری جوش شده

توری جوش شده عموماً برای مسلح کردن شانکریت مورد استفاده قرار می‌گیرد و مرکب از شبکه‌ای مربعی از سیم فولادی است، که در نقاط تقاطع جوش شده است. نمونه ای از این توری برای استفاده در کارهای زیرزمینی، شامل مفتول های به قطر ۴/۲ میلیمتری است. که بصورت شطرنجی به فواصل ۱۰۰ میلیمتر از یکدیگر قرار گرفته و تحت عنوان توری ۴/۲ x ۱۰۰ x ۱۰۰ مشخص می‌شود و در اندازه های محدود و کوچک تهیه می‌شود بطوریکه حمل و نصب آن توسط یک یا دو نفر امکان پذیر باشد.

توری جوش شده معمولاً توسط واشرو مهره اضافی که روی راکبولتها قرار می‌دهند به بدنه سنگ متصل می‌گردد. در فواصل بین راکبولتها نیز بر حسب لزوم توری توسط میله های کوتاه که به دیواره تونل متصل می‌شود، نگهداری می‌شوند. این میله ها باید به تعدادی باشند که توری را هر چه بیشتر نزدیک به سطح سنگ متصل نماید. با آنکه مسئول بتن پاش ماهر می‌تواند توری را که تا فاصله ۲۰ سانتی‌متری (۸ اینچی) از سینه کار فرار گرفته بتن پاشی کند، فاصله زیاد موجب هدر رفتن بتن می‌گردد، زیرا باید آنقدر بتن پاشی ادامه یابد تا توری را کاملاً بپوشاند.

توری ها در مقابل پرتاب قطعه سنگ های ناشی از آتشکاری های مجاور به آسانی آسیب می‌بینند، از اینرو نصب آن را باید تا زمانی که آتشکاری تا فاصله کافی از کار دور نشده به تاخیر انداخت، یا اینکه با استفاده از پوشش های مقاوم در مقابل انفجار از آسیب رسیدن به توری جلوگیری نمود. قسمت هایی از توری که آسیب می‌بیند باید از شبکه جدا شده و با توری سالم جایگزین شود، تا بطور کافی قسمت های مجاور را بپوشاند و پیوستگی توری در بتن تامین شود. توری های جوش شده نسبت به توری های سرندی از این امتیاز برخوردارند که در اثر آسیب دیدگی از هم باز نمی‌شوند. نمونه ای از توری جوش شده در شکل ۵-۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۳- نمونه‌ای از توری جوش شده و نصب آن در تونل گاوشان

تهیه نوری های جوش شده گالوانیزه (ضدزنگ) مشکل بوده و لذا توری باید به اندازه کافی در داخل بتن قرار گیرد تا از خوردگی مصون بماند. باید دقت کافی مبذول گردد تا حباب های هوا در پشت مفتول ها یا در نقاط تقاطع سیم های شبکه تشکیل نشود. این کار با حرکت مداوم سربتن پاش امکان پذیر است. زیرا به این ترتیب با تغییر زاویه برخورد بتن با توری کلیه حباب ها پر می شود.

### ۵-۸ شاتکریت (shotcrete)

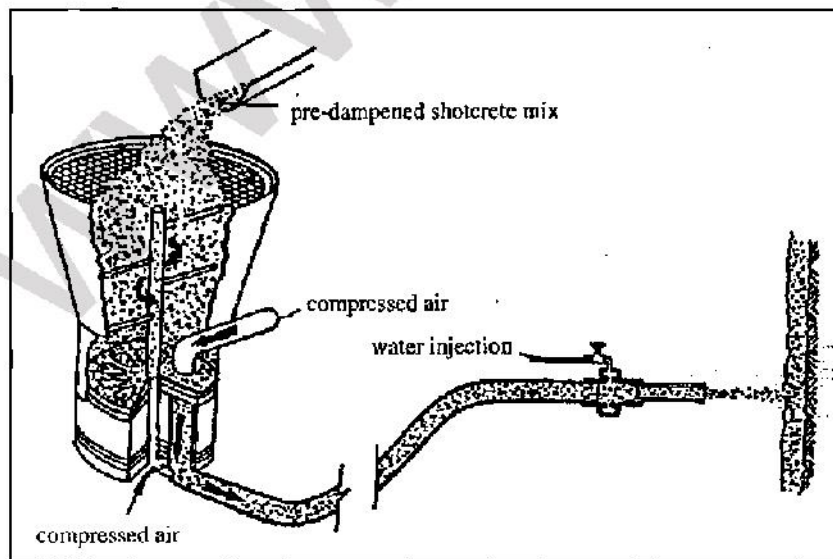
#### ۵-۸-۱ انواع شاتکریت

ملات یا بتنی که با کمک فشار هوا پاشیده می شود شاتکریت نامیده می شود که امروزه بطور وسیعی در حائل بندی تونل ها مورد استفاده قرار می گیرد. اساسا دو نوع شاتکریت وجود دارد:

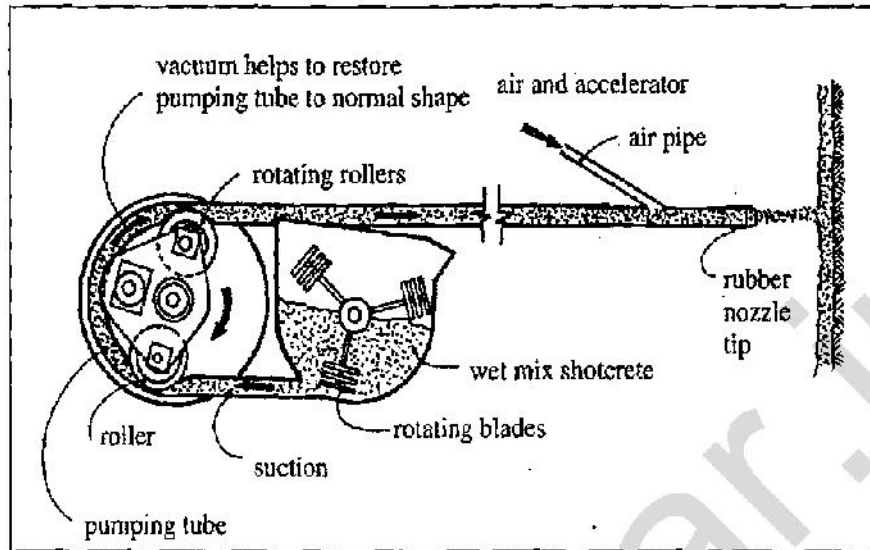
- شاتکریت خشک (dry-mix shotcrete)

- شاتکریت تر (wet-mix shotcrete)

اجزای شاتکریت خشک بصورت خشک با هم مخلوط شده و در هنگام پاشیدن روی سطح کار توسط شیپوره (nozzle) آب به آن اضافه می شود. شاتکریت تر بصورت بتنی با اسلایم پایین تهیه می شود و سپس به شیپوره پمپ شده و پخش می گردد. در صورتیکه از شاتکریت خشک استفاده شود. از ماده زود گیر کننده در مخلوط می توان استفاده کرد، لیکن چنانچه از شاتکریت تر استفاده شود ماده زود گیر کننده باید هنگام پاشیدن بتن در محل شیپوره اضافه شود. در شکل های ۵-۱۴ و ۵-۱۵ اجزای دستگاه شاتکریت خشک و تر نشان داده شده است. در جدول ۵-۲ نیز مزایا و معایب این دو روش با هم مقایسه شده است.



شکل ۵-۱۴- اجزای دستگاه شاتکریت خشک



شکل ۵-۱۵ - اجزای دستگاه شاتکریت تر

#### ۵-۸-۲ طرح اختلاط

روش کلی در طرح اختلاط برای هر دو نوع خشک و تر یکسان است. لیکن تفاوت های مهمی در جزئیات با هم دارند که بستگی به روش مورد استفاده دارد. هر دو روش طرح اختلاط باید معیارهای زیر را تامین نماید:

- ۱ - قابلیت پاشش خوب (shootability) - طرح اختلاط باید به گونه ای باشد که با حداقل ریخت و پاش همراه باشد.
- ۲ - مقاومت اولیه و کوتاه مدت (early strength) - باید به اندازه کافی مقاوم باشد تا نگهداری و حائل در مقابل زمین در طول کمتر از ۴ تا ۸ ساعت ایجاد نماید.
- ۳ - مقاومت دراز مدت (long-term strength) - با در نظر گرفتن مقدار ماده تند گیر لازم برای حصول قابلیت پاشش خوب و مقاومت اولیه، باید مقاومت ۲۸ روزه مشخصی بدست آید.
- ۴ - دوام (durability) - مقاومت دراز مدت نسبت به شرایط محیطی باید حاصل شود.
- ۵ - اقتصاد (economy) - کاهش هزینه مصالح و و به حداقل رساندن ریخت و پاش

جدول ۵-۲- مقایسه شاتکریت خشک و تر

مخلوط خشک	مخلوط تر
- انطباق بیشتر با شرایط متغیر زمین دارد.	- هنگام پخش ریخت و پاش کمتر است.
- بویژه وقتی که با آب مواجه می‌شود.	- گرد و غبار کمتر تولید می‌کند.
- وسایل و دستگاههای مورد نیاز در مخلوط خشک معمولاً ارزان‌تر بوده و مجموعه بیشتری از وسایل در اختیار است.	- کنترل نسبت آب به سیمان عملی است.
- ماشین های مخلوط خشک کوچکتر هستند و به این ترتیب قابلیت انطباق بیشتر در تونل هایی که با محدودیت فضا روبرو هستند دارند.	- نحوه اجرای شاتکریت تر چندان به مهارت اپراتور حساسیت ندارد زیرا تنظیم آب بعهده وی نمی‌باشد.
	- اپراتور مستقیماً سرعت برخورد ذرات و دانه ها را کنترل میکند و به این ترتیب تراکم مخلوط با تنظیم جریان هوا در دهانه پخش عملی می‌شود.
	- دستگاه به آسانی تمیز می‌شود.
	- هزینه های نگهداری کمتر است.

## نسبت اختلاط

مخلوط شاتکریت بطور معمول شامل نسبت های زیر از مصالح بصورت خشک می‌باشد

(Hock & Brown, 1994)

۱۵ - ۲۰٪

- سیمان

۳۰ - ۴۰٪

- سنگدانه‌های درشت

۴۰ - ۵۰٪

- سنگدانه‌های ریز یا ماسه

نسبت آب به سیمان در شاتکریت به روش خشک بین ۰/۳ تا ۰/۱۵ در صد قرار دارد که با توجه به شرایط محلی، توسط اپراتور شاتکریت تنظیم می‌گردد. در شاتکریت تر نسبت آب به سیمان بین ۰/۴ تا ۰/۱۶ در صد است.

## ۵-۸-۳ انتخاب مصالح

## سیمان

سیمان پرتلند تیپ I - بطور گسترده در شاتکریت مورد استفاده قرار می‌گیرد که این به علت فراوانی آن بوده و عمده مشخصات مورد نیاز شاتکریت معمولی را تامین می‌کند.

سیمان تیپ II (نسبتاً ضد سولفات) و تیپ V (شدیدا ضد سولفات) - وقتی که سنگ، آب زیرزمینی یا آب مورد استفاده برای اختلاط سولفات باشد مورد نیاز است. سرعت گیرش و حصول مقاومت این دو نوع سیمان نسبتاً ملایم است.

سیمان تیپ III - بعلت ترکیبات این سیمان و ریز دانه بودن آن مقاومت فوری و اولیه زیاد ایجاد می کند. معمولاً سیمان تیپ I همراه با مواد تند گیر استفاده می شود که این بعلت فراوانی این سیمان و انعطاف پذیری آن نسبت به تغییرات کوچک در طرح اختلاط است. باید توجه کرد که بین سیمان و ماده زودگیرکننده سازگاری وجود داشته باشد، زیرا رفتار اولیه و نهایی شاتکریت توسط مصالح تشکیل دهنده مخلوط وقتی که با یکدیگر سازگار نباشند تحت تاثیر قرار می گیرد.

#### سنگدانه ها

شن و ماسه طبیعی به سنگدانه های شکسته ارجح است، زیرا این مصالح بعلت گردگوشه بودن خصوصیات پمپ پذیری بهتری دارند. از جهات دیگر، کیفیت سنگدانه های مورد نیاز برای شاتکریت مشابه بتن معمولی با کیفیت مرغوب است.

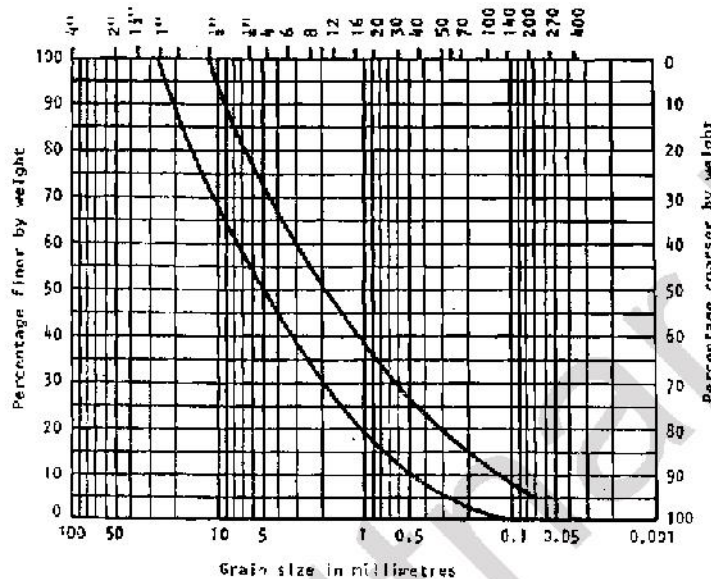
سنگدانه ها باید تمیز (clean)، سخت (hard)، سفت (tough)، محکم (strong) و بادوام (durable) باشد. نباید بیش از ۲٪ از مصالح سنگی از الک شماره ۲۰۰ (۰/۰۷۵mm) عبور نماید. سنگدانه ها باید عاری از مواد سیلتی و دانه های نرم یا پوشیده شده از مواد بوده و نیز میکا و مواد مضر قلیایی و آلی نباید در آن یافت شود. از مصرف سنگدانه های با واکنش های قلیایی باید اجتناب کرد.

اصولاً بزرگترین اندازه دانه ها نباید از یک سوم قطر لوله انتقال در باریکترین قسمت ها تجاوز نماید. دستگاه های شاتکریت که دانه های تا قطر ۳۲ میلیمتر را می تواند بپاشد در بازار وجود دارند، لیکن روال معمول این است که اندازه بزرگترین دانه های مورد استفاده ۱۹ میلیمتر یا کمتر است.

دانه بندی مصالح شاتکریت در طرح اختلاط، قابلیت پمپ شدن، جریان یافتن در داخل لوله های انتقال، اختلاط با آب در دهانه بخش، چسبیدن بتن به سطح مورد نظر، وزن مخصوص و اقتصادی بودن محصول نهایی، نقش اساسی دارد. شکل ۵-۱۶ حدود دانه بندی پیشنهادی برای ترکیب مصالح ریز و درشت جهت استفاده در شاتکریت را نشان می دهد.

چنانچه درصد مصالح درشت دانه افزایش داده شود تراکم بهتر، وزن مخصوص بیشتر، نیاز به آب و سیمان کمتر، افت کمتر و مقاومت چسبندگی و مقاومت خمشی بیشتر حاصل خواهد شد. در عین حال

افزایش نسبت مصالح درشت دانه، پمپ کردن شاتکریت را مشکل تر نموده و ریخت و پاش را هنگام پخش افزایش می دهد. بنابراین باید راه حل بینابینی را برگزید و پیشنهاد می شود از شکل ۵-۱۶ بعنوان نقطه شروع در یافتن دانه بندی مناسب استفاده شود.



شکل ۵-۱۶- حدود دانه بندی پیشنهادی برای سنگدانه های شاتکریت آب

آب مورد استفاده در شاتکریت باید معیارها و استانداردهای بتن معمولی را دارا باشد. آب باید تمیز و عاری از مواد غیر مجاز و مضر نفتی، چربی ها، نمک ها، مواد قلیایی و مواد آلی باشد. بطور کلی آبی که برای نوشیدن مناسب و عاری از بو و طعم خاصی باشد برای مصرف در شاتکریت نیز مناسب است.

#### مواد زودگیرکننده (accelerators)

وقتی دستیابی سریع به مقاومت اولیه شاتکریت برای ایجاد حائل فوری در مقابل سنگ مورد نیاز است، مواد تند گیر به مخلوط اضافه می شوند. از مواد زودگیرکننده به منظور بهبود شرایط پخش شاتکریت، جلوگیری از ریخت و پاش و خصوصاً وقتی شاتکریت در قسمتهای فوقانی و در سقف اجرا می گردد نیز استفاده می شود.

کلرور کلسیم که مواد زودگیرکننده معمول در بتن است، گاهی در شاتکریت هم مصرف می گردد، لیکن به اندازه کافی بیشتر مواقع در شرایط سازه های زیرزمینی سریع عمل نمی کند. اضافه کردن آن با نسبت ۵٪ سرعت گیرش زیادی ایجاد می کند، لیکن این عمل به قیمت کاهش مقاومت نهایی و دوام بتن تمام می شود بنابراین استفاده از کلرور کلسیم توصیه نمی شود.



تعدادی مواد زودگیر کننده مخصوص برای استفاده در شاتکریت به بازار عرضه شده است و این مواد به مراتب سریع تر از مواد معمول زودگیر کننده مورد استفاده در بتن عمل می کنند. این مواد زودگیر کننده معمولاً حاوی نمکهای قابل انحلال در آب شامل، کربنات سدیم، آلومینات سدیم و هیدروکسید کلسیم می باشند. نسبت اختلاط این مواد و سایر مواد زودگیر کننده از یک تولید کننده به تولید کننده دیگر متفاوت است و برای ساختن مخلوط آزمایشی بعنوان شروع کار باید از مقررات و دستور العملی که سازنده ارائه می دهد استفاده کرد. مواد زودگیر کننده هم بصورت مایع و هم بصورت پودر به بازار عرضه می شوند. و بخاطر خطر اشتعال آنها، باید دقت کافی در جابجایی و استفاده از آنها بعمل آورد.

برای بتن باشی قسمت های بالا دست و در سقف ها و دیواره ها یعنی قسمت هایی که ضخامت شاتکریت قابل ملاحظه است بطور معمول از مواد زودگیر کننده استفاده می شود. در بتن ریزی کف تونلها و در قسمت هایی که ضخامت شاتکریت با بتن کم است و بتن ریزی روی سنگ خشک و تمیز انجام می شود یا شاتکریت روی سطحی انجام میشود که قبلاً بتن ریزی شده است، نیازی به استفاده از مواد زودگیر کننده نیست. در پاره ای موارد که مقاومت دراز مدت شاتکریت در محیطی نامساعد مطرح بوده و از اهمیت برخوردار است، ممکن است لازم باشد که لایه های نهایی شاتکریت بدون استفاده از مواد زودگیر کننده اجرا شوند.

#### ۵-۸-۴ مشخصات فنی شاتکریت

برخی از مشخصات فنی و مهندسی بر رفتار شاتکریت در مواردی که بعنوان حائل در سازه های زیرزمینی استفاده می شود تاثیر می گذارند. این مشخصات عبارتند از مقاومت فشاری، مقاومت چسبندگی، مقاومت خمشی، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته. وقتی از شاتکریت بعنوان حائل در سنگ های ضعیف استفاده می شود، دستیابی به مقاومت سریع فشاری در طول زمان ضروری است. نمونه های از تغییرات مقاومت فشاری شاتکریت با زمان در جدول ۵-۳ آمده است.

جدول ۵-۳- نمونه ای از تغییرات مقاومت فشاری شاتکریت با زمان

۲۸ روزه	۱ روزه	۳-۸ ساعت	۱-۳ ساعت	شاتکریت بدون مواد زودگیر کننده
۴۱/۴ MPa	۵/۲ MPa	۰/۲ MPa	صفر	
۳۴/۵ MPa	۱۰/۳ MPa	۵/۲ MPa	۰/۶۹ MPa	شاتکریت با ۳٪ مواد زودگیر کننده

مدول الاستیسیته شاتکریت به میزان خیلی زیاد وابسته به مقاومت فشاری است و با گذشت زمان روندی افزایشی تقریباً هماهنگ با مقاومت فشاری دارد.

### ۵-۸-۵ آماده سازی سطح و پاشیدن شاتکریت

کیفیت شاتکریت پاشیده شده بستگی به مصالح استفاده شده در شاتکریت و به طرح اختلاط و نیز نحوه پاشیدن شاتکریت دارد. بویژه مهارت اپراتور شاتکریت در آماده سازی سطح کار، کنترل سرعت بتن پاشی و ضخامت آن، و در صورت استفاده از شاتکریت خشک کنترل نسبت آب به سیمان تاثیر مهم و اساسی در کیفیت نهایی کار دارد.

آماده سازی سطحی که باید شاتکریت شود از قسمت های اساسی کار است. لقی گیری (scaling) سطح کار از نظر فراهم سازی ایمنی مجریان شاتکریت و نیز کاهش احتمال طبله کردن بتن بعثت پاشیدن آن در قسمت های سست، از اهمیت زیادی برخوردار است. روشن است که اگر سنگ خیلی ضعیف باشد، لقی گیری ممکن است امکانپذیر نباشد و بتن پاشی باید بلافاصله بعد از حفاری اجرا شود تا موجبات پایداری تونل را فراهم آورد. در اینگونه موارد لایه دیگری از شاتکریت که با توری جوش شده مسلح می گردد ممکن است مورد نیاز باشد تا باعث تکمیل عمل پایدارسازی بشود.

سطح کاری که قرار است شاتکریت شود باید عاری از هر گونه مواد خارجی یا مواد لقی چسبیده به سطح باشد تا یکپارچگی و چسبندگی کامل بدست آید. گرد و غبار حاصل از آتشکاری و خاک و مواد نرم حاصل از درزها باید بوسیله آب از سطح شسته شود و این امر به راحتی با استفاده از شلینگ آب تحت فشار عملی است. آب پاشی سطح را می توان با دستگاه بتن پاش که با فشار معمول برای بتن پاشی ( $0.3 - 0.4 \text{ MPa}$ ) تنظیم شده باشد، انجام داد. آب را باید به اندازه کافی در دستگاه وارد نمود تا کلبه مواد زائد ولق جدا شوند. شیپوره باید حدوداً در فاصله یک تا دو متری از سپنه کار قرار گیرد.

آماده سازی سطوح خیلی صاف و آینه ای (slickensided) به آسانی از طریق جت آب عملی نیست و گاهی استفاده از ماسه پاشی (sandblasting) برای زبر کردن و بهبود سطح کار لازم خواهد بود. برای ماسه پاشی از دستگاه معمول شاتکریت خشک استفاده می شود. با این تفاوت که شیپوره بتن پاشی با شیپوره مناسب ماسه پاشی تعویض می گردد. از آنجائیکه این عملیات از لحاظ صرف وقت و تامین مصالح گران تمام می شود، صرفاً باید در شرایط خاص و پس از اینکه جت آب موثر واقع نشد مورد استفاده قرار گیرد.

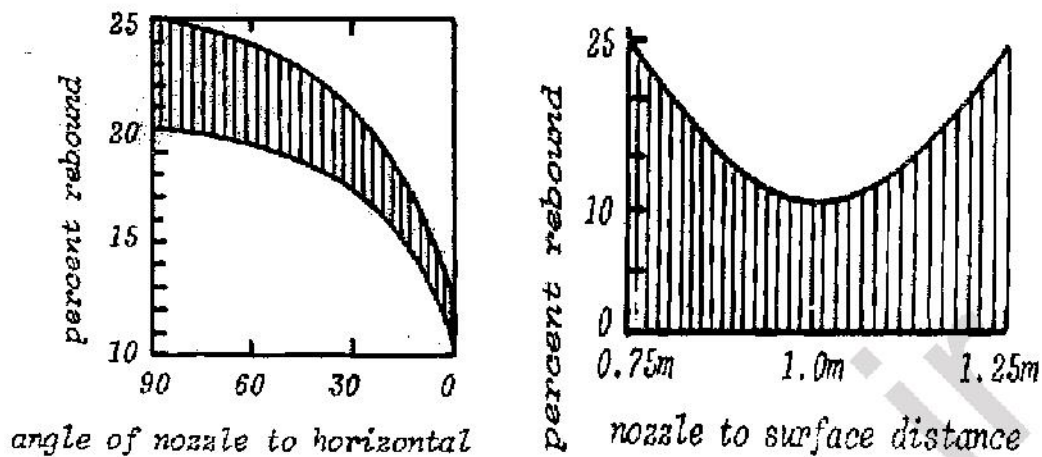
در مواردی که سطح مورد اجرا درزه های آبدار مشخصی داشته باشد، باید تمهیداتی را برای زهکشی آب از درون لایه شاتکریت اجرا شده به کار بست. بدین منظور، معمولاً تعدادی لوله پلاستیکی در شاتکریت کار می گذارند تا آب از طریق آنها خارج شود. (شکل ۵-۱۷).



شکل ۵-۱۷- کار گذاشتن لوله های پلاستیکی در شاتکریت برای زهکشی آب

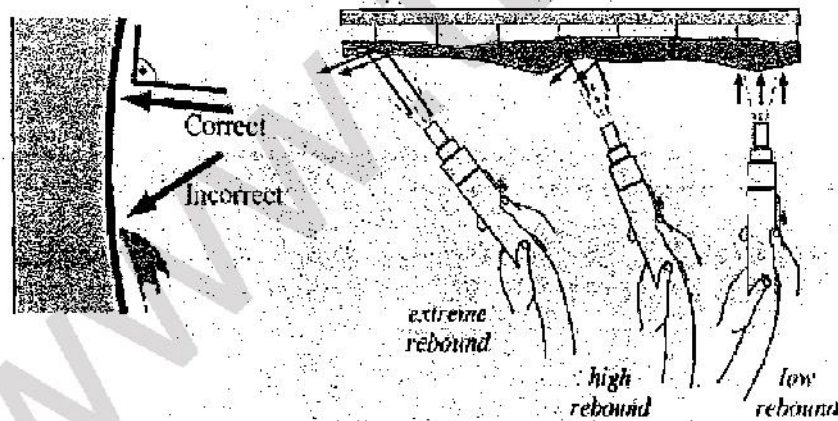
در صورتی که خروج آب از سطح مورد اجرا، محدود به نقاط مشخصی نباشد، قبل از اجرای شاتکریت حصیر الیافی متخلخلی (porous fibre mat) را می توان به سطح مورد اجرا نصب نمود. در ضمن اجرا، آب از طریق الیاف این حصیر زهکشی شده و از طریق نهر کنار تونل به بیرون هدایت می شود.

پس از اینکه سطحی که قرار است شاتکریت شود کاملاً تمیز و آماده شد، عملیات بتن پاشی را می توان شروع کرد. فاصله بهینه و مناسب بین شیپوره و سطح کار حدوداً یک متر است. مقدار ریخت و پاش همانطور که در شکل ۵-۱۸ مشاهده می شود، شدیداً تحت تاثیر این فاصله است. میزان ریخت و پاش همانگونه که در شکل ۵-۱۹ دیده می شود به زاویه شیپوره نسبت به افق نیز بستگی دارد.



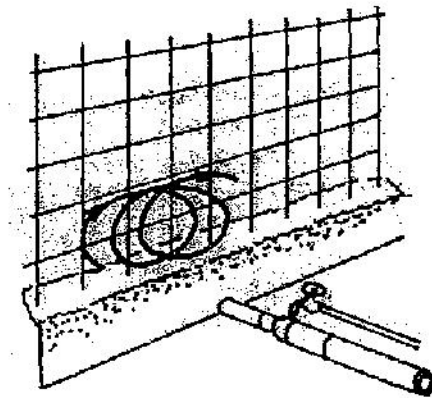
شکل ۵-۱۸- اثر فاصله و زاویه شیبوره بر ریخت و پاش شاتکریت

کمترین میزان ریخت و پاش شاتکریت موقعی بدست می آید که شیبوره عمود بر سطح کار در نظر گرفته شده باشد. این مطلب در شکل ۵-۱۸ نیز نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۹- نحوه صحیح پاشیدن شاتکریت

هنگام بتن پاشی، باید شیبوره بتن پاش در مسیر مشخص حرکت درآید. اگر این عمل درست انجام نشود، بتن پاشی بصورت یکنواخت و با ضخامت یکسان انجام نخواهد شد. توصیه شده است که بتن پاشی در امتداد حلقه های دایره ای یا بیضی شکلی که رویهم را می پوشانند مطابق شکل ۵-۲۰ انجام پذیرد. طول حلقه های بیضی معمولاً ۵۰ سانتی متر و عرض آنها ۲۰ سانتی متر در نظر گرفته می شود. فاصله دو حلقه ۱۰ سانتی متر انتخاب می شود.



شکل ۵-۲۰- نحوه صحیح حرکت شیپوره در اجرای شاتکریت

هنگامیکه بتن پاشی روی توری های جوش شده انجام می شود، باید دقت کرد که در پشت سیم ها حفره خالی تشکیل نگردد. یک روش برای غلبه بر این کار نزدیک تر کردن شیپوره به سطح کار می باشد. روش دیگر که خصوصا وقتی از دستگاه خودکار (ریبات) برای بتن پاشی استفاده می شود، موفقیت آمیز است، تغییر زاویه شیپوره نسبت به سطح کار است. این کار با راندن بتن به پشت سیم ها از تشکیل حباب جلوگیری می کند.

ضخامت لایه شاتکریت عموماً توسط حجم مصالح مصرف شده و با اضافه کردن ضریب مربوط به ریخت و پاش تعیین می گردد. وقتی که بتن پاشی روی سطوح خیلی نامنظم انجام می شود، تقریباً غیر ممکن است که به یک ضخامت یکنواخت دست یافت و ممکن است لازم باشد شاتکریت بیشتری از آنچه طرح و محاسبه شده مصرف کرد تا مطمئن گردید که تمام سطح سنگ پوشیده شده است. وقتی که تور سیمی جوش شده به سطح سنگ اضافه می شود می توان از آن بعنوان شاخص و وسیله اندازه گیری ضخامت شاتکریت استفاده کرد.

همچنین اگر از راکبولت در سیستم حائل سازه استفاده شده است می توان انتهای میله های راکبولت را روی سطح کار باقی گذاشت تا از آنها به عنوان شاخص اندازه گیری ضخامت شاتکریت استفاده کرد. برخی از ضراحان پیشنهاد می کنند که باید میخ های کوتاه فولادی با طول مورد نیاز در فواصل مختلف به سطح سنگ متصل گردد تا توسط آنها ضخامت شاتکریت را اندازه گرفت. این کار در عمل، بعلت گرانی اجرای آن و نیز خطرات نصب میخ ها قبل از اجرای شاتکریت، بندرت انجام می شود.

## ۵-۸-۶ شاتکریت مسلح شده با الیاف (fibre reinforced shotcrete)

یکی از معایب شاتکریت معمولی مقاومت کششی پایین آن است و لذا مشاهده ترک‌های زیاد و متعدد در شاتکریت در اثر حرکت توده سنگ پس از گرفتن شاتکریت غیر معمول و دور از انتظار نیست. قرار دادن تور سیمی جوش شده در شاتکریت همانطور که قبلاً بحث شد، می‌تواند برای این مسئله غلبه نماید، لیکن نصب تور سیمی وقت گیر است و بنابراین گران تمام می‌شود. فکر استفاده از رشته‌های فولادی که مستقیماً با شاتکریت مخلوط شده و اجرا شود، توجه زیادی را به خود جلب نموده و تحقیقات زیادی در این زمینه طی سالهای گذشته انجام شده است.

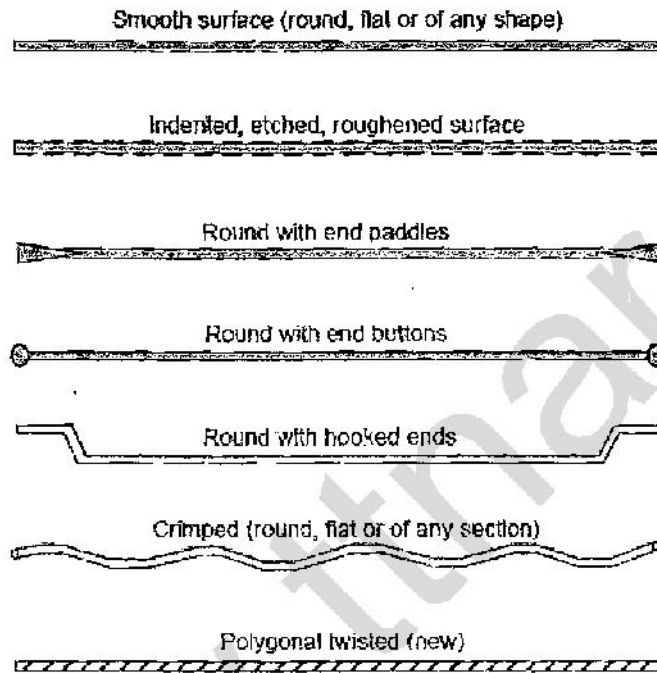
در بیشتر تحقیقات و کارهای آزمایشگاهی اخیر، الیاف فولادی بطول ۲۵ میلیمتر و قطر ۰/۲۵ میلیمتر و با نسبت ۳ تا ۶ درصد وزنی به سیمان و سنگدانه‌ها اضافه گردیده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که استفاده از الیاف بیش از این درصد، آمیختن آن با شاتکریت و پاشیدن شاتکریت را با مشکل روبرو می‌سازد. اشکالات ناشی از در هم پیچیده شدن الیاف، و ریخت و پاش بتن تا ۶۰٪ گزارش شده است.

تحقیقات نشان می‌دهد که مخلوط کردن الیاف با بتن در دهانه شیپوره، اتلاف آنها را تا حدود ۱۵٪ کاهش داده و مشکلات مربوط به در هم پیچیده شدن الیاف را نیز کم می‌کند. در یک تحقیق مقاومت ۲۸ روزه شاتکریت مسلح با الیاف فولادی ۸MPa بدست آمد که در مقایسه با شاتکریت غیر مسلح با مقاومت ۲-۵MPa قابل ملاحظه است.

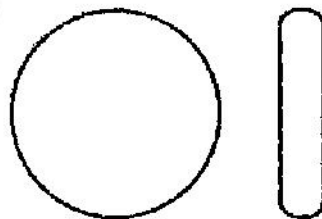
برای افزایش چسبندگی بین الیاف و ملات می‌توان الیاف را با زبر نمودن سطح آن یا با ایجاد تغییر شکلهای مکانیکی اصلاح نمود. بنابراین الیاف می‌تواند به فرم‌های صاف، آجدار، مارپیچ، موج دار و تابیده شده باشد همراه با انتهای قلاب شکل، پره‌ای، دکمه‌ای یا دیگر شکلهای مهاری به عنوان مثال نمونه‌های متداول الیاف فولادی در شکل ۵-۲۱ نشان داده شده است که شامل موارد زیر است:

- ۱- سطح صاف (گرد، تخت یا اشکال دیگر)
- ۲- سطح زبر، آجدار و کنده شده
- ۳- گرد با انتهای پره‌ای
- ۴- گرد با انتهای دکمه‌ای
- ۵- گرد با انتهای قلاب دار
- ۶- موج دار (گرد، تخت یا اشکال دیگر)
- ۷- چند ضلعی تابیده شده (جدید)

در برخی انواع الیاف، به منظور افزایش چسبندگی در مقیاس بسیار کوچک، سطح کنده کاری شده و یا با پلاستما اندود می‌شود. همچنین انواع دیگری از الیاف فولادی با اشکال بسته نظیر حلقه و گیره مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۵-۲۲) که منجر به افزایش قابل توجه طاقت (toughness) بتن در فشار شده است اگر چه کاربرد الیاف اخیر از مرحله تحقیق جلوتر نرفته است.



شکل ۵-۲۱- انواع الیاف فولادی متداول در بتن و شاتکریت

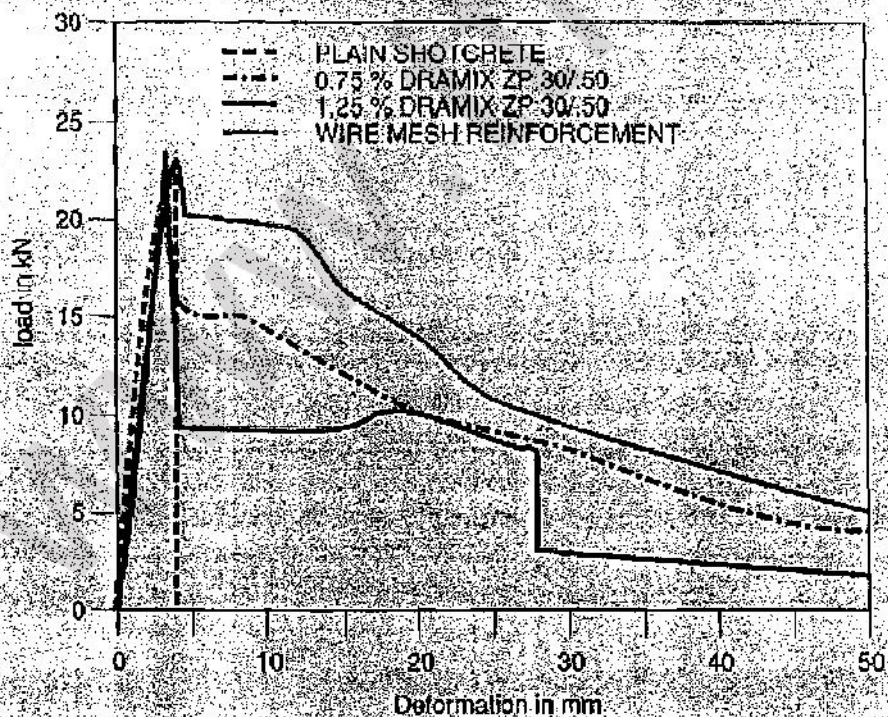


شکل ۵-۲۲- الیاف با شکل حلقه بسته

در جدول ۴-۵ نمونه طرح اختلاط شاتکریت مسلح شده با الیاف آورده شده است. در شکل ۵-۲۳ ظرفیت انتقال بار شاتکریت ساده (غیر مسلح)، شاتکریت مسلح شده با توری فلزی و شاتکریت مسلح شده با الیاف فولادی با هم مقایسه شده‌اند.

جدول ۵-۴- نمونه طرح اختلاط شاتکریت مسلح شده با الیاف

مخلوط تر		مخلوط خشک		
درصد وزنی	kg/m <sup>3</sup>	درصد وزنی	kg/m <sup>3</sup>	
۱۸.۱	۴۲۰	۱۹.۰	۴۲۰	سیمان
۱.۷	۴۰	۲.۲	۵۰	دوده سیلیس
۶۸.۹	۱۶۰۰	۷۵.۵	۱۶۷۰	سنگدانه
۲.۶	۶۰	۲.۷	۶۰	الیاف فولادی
۰.۶	۱۳	۰.۶	۱۳	زودگیرکننده
۰.۳	۶ لیتر	-	-	روان کننده
۰.۱	۲ لیتر	-	-	کاهنده آب
در صورت لزوم		-	-	مواد هوازا
۷.۷	۱۸۰	در شیپوره کنترل می شود		آب
۱۰۰	۲۳۳۱	۱۰۰	۲۲۱۳	مجموع



شکل ۵-۲۳- مقایسه ظرفیت انتقال بار بین شاتکریت ساده، شاتکریت مسلح شده با توری فلزی و شاتکریت مسلح شده با الیاف فولادی



### ۵-۸-۷ توصیه‌های انجام شده در مورد استفاده از شاتکریت

Hoek و همکارانش با بررسی روش‌های مختلف برای تعیین مقدار شاتکریت لازم برای استفاده در تونل‌ها و نیز با در نظر گرفتن تجارب خود در زمینه کاربرد شاتکریت، توصیه‌هایی را در مورد کاربرد شاتکریت در شرایط مختلف توده‌سنگ بعمل آوردند که در جدول ۵-۵ خلاصه شده است.

www.ttnar.ir

جدول ۵-۵- خلاصه‌ای از توصیه‌های بعمل آمده در زمینه کاربرد شاتکریت در تونل برای شرایط مختلف توده‌سنگ

مشخصات توده‌سنگ	رفتار توده‌سنگ	حامل مورد نیاز	توصیه‌ها از شاتکریت
سنگ مترکم دگرگونی یا آذرین، شرایط تنش پایین	پوسته پوسته نمی‌شود، زرقه‌زرقه نمی‌شود، دچار خرابی نمی‌شود.	لازم نیست.	لازم نیست.
سنگ مترکم رسوبی، شرایط تنش پایین	در اثر تغییر رطوبت ممکن است سطوح بعضی از شیل‌ها، لای سنگها و یا گل‌سنگها فرو نیفتد.	آب‌بندی سطوح برای جلوگیری از فروپاشی	استفاده از شاتکریت ساده به ضخامت ۲۵ میلیمتر در سطوح دهن هر چه سریعتر بعد از حفاری. در صورت لزوم تعمیر شاتکریت در اثر صدمات ناشی از آتشباری.
سنگ مترکم یا یک گسل پهن منفرج یا ناحیه برشی	مواد پرکننده گسل ممکن است مسست و قابل فرسایش باشد و باعث بروز مشکلات پایداری در سنگ درزه‌دار مجاور بشود	حائل‌بندی و آب‌بندی سطحی در اطراف مناطق مسست ناشی از گسل یا ناحیه برشی	برداشت مواد مسست تا عمقی برابر با عرض گسل یا ناحیه برشی و نصب میلگرد تا سنگ سالم جانی. در صورت لزوم می‌توان برای نگهداری موقت ریزش سنگ از توری سیعی جوش شده استفاده کرد. قسمتهای خالی را باید با شاتکریت پر کرد. شاتکریت مسلح با الیاف فولادی را به طور عرضی و حداقل به اندازه عرض بر شدگی گسل باید به کار برد.
سنگ مترکم دگرگونی یا آذرین، شرایط تنش بالا	لایه‌لایه شدن سطحی (surface slabbing) پوسته پوسته شدن (spalling) و امکان خطر ناشی از ترکش سنگ (rock burst)	حفظ سنگ شکسته و کنترل تورم با انبساط توده‌سنگ	استفاده از یک لایه شاتکریت به ضخامت ۵۰ میلیمتر بر روی توری سیعی جوش شده که به پشت صفحات پیشانی راکبولت وصل شده است. یا کاربرد شاتکریت تقویت شده با الیاف فولادی به ضخامت ۵۰ میلیمتر بر روی سنگ و نصب راکبولت با صفحات پیشانی سیعی اجرای لایه دوم شاتکریت به ضخامت ۲۵ میلیمتر. ادامه استفاده از شاتکریت تا پایین دیوارهای جانی در موارد لزوم.
سنگ مترکم رسوبی، شرایط تنش بالا	لایه‌لایه شدن سطحی و پوسته‌پوسته شدن و امکان فشارندگی در شیل‌ها و سنگهای نرم	حفظ سنگ شکسته و کنترل فشارندگی	اجرای یک لایه ۷۵ میلیمتری شاتکریت مسلح به الیاف فولادی که مستقیماً بر روی سنگ تمیز پاشیده می‌شود. استفاده از راکبولت یا مس‌مهار نیز برای نگهداری گامستر لازم است.
سنگ دگرگونی یا آذرین با تعداد کمی درزه‌های به فاصله زیاد از هم، شرایط تنش پایین	امکان ریزش یا لغزش گوهها یا بلوکها در اثر نیروی وزن	تأمین نگهداری علاوه بر راکبولت و یا کابلهای مهار	استفاده از شاتکریت مسلح با الیاف فولادی به ضخامت ۵۰ میلیمتر بر روی سطوح سنگ در نهالی که درزه‌ها رخنمون دارند.
سنگ رسوبی با تعداد معدودی صفحات لایه‌بندی و درزه‌های فاصله‌دار، شرایط تنش پایین	امکان ریزش یا لغزش گوهها یا بلوکهای سنگی در اثر وزن وجود دارد.	تأمین نگهداری علاوه بر راکبولتها یا کابلهای مهار موجود. آب‌بندی رخنمون سطوح لایه‌بندی ضعیف	استفاده از شاتکریت ساده به ضخامت ۷۵ میلیمتر بر روی توری فلزی جوش خورده که به صفحات پیشانی راکبولتها متصل شده است یا استفاده از شاتکریت تقویت شده با الیاف فولادی به ضخامت ۷۵ میلیمتر بر روی سنگ، نصب راکبولت با صفحات پیشانی و سپس اجرای لایه دوم شاتکریت به ضخامت ۲۵ میلیمتر.
سنگ دگرگونی یا سنگ آذرین درزه‌دار، شرایط تنش بالا	ترکیب شکسته‌های ساختری و تنشی پیرامون محدوده تونل	جلوگیری ز ریزش سنگ شکسته و کنترل انبساط توده‌سنگ	

ادامه جدول ۵-۵- خلاصه‌ای از توصیه‌های بعمل آمده در زمینه کاربرد شاتکریت در توتل برای شرایط مختلف توده‌سنگ

مشخصات توده‌سنگ	رفتار توده‌سنگ	حالت مورد نیاز	استفاده از شاتکریت
سنگ ضعیف لایه‌لایه و درزه‌دار رسوبی شرایط تنش بالا	پوسته پوسته شدن، خورد شدن و احتمال فشارندگی	کنترل فشارندگی و شکستگی توده‌سنگ	اجرای هرچه سریعتر شاتکریت مسلح به الیاف فولادی به ضخامت ۷۵ میلیمتر بر روی سطوح تمیز سنگ، نصب راکبولت همراه با صفحه پیشانی، اجرای لایه دوم شاتکریت به ضخامت ۷۵ میلیمتر.
سنگ دگرگونی یا آذرین، با درزه‌های زیاد، شرایط تنش پایین	ریزش گوه‌ها و بلوکهای کوچک ناشی از برخورد صفحات درزه	جلوگیری از ریزش بیشتر رونده	اجرای شاتکریت مسلح به الیاف فولادی به ضخامت ۵۰ میلیمتر بر روی سطوح تمیز سنگ در سقف توتل، ممکن است برای نگهداری کاملتر بلوکهای بزرگ، راکبولت یا میل‌مهار نیز لازم باشد.
سنگ رسوبی لایه‌لایه و با درزه زیاد، شرایط تنش پایین	جدیمی لایه‌ها در توفش‌های با دهانه بزرگ و ریزش در امتداد لایه‌بندی در سینه کارهای شیب‌دار	کنترل جدایش لایه و ریزش	برای کنترل جدایش لایه‌ها باید از راکبولت و میل‌مهار استفاده کرد. اجرای شاتکریت مسلح به الیاف فولادی به ضخامت ۷۵ میلیمتر بر روی آثار صفحات لایه‌بندی قبل از نصب راکبولت.
سنگهای بسیار پر درزه دگرگونی یا آذرین، کنگومرا یا سنگ سیمانی شده، شرایط تنش بالا	فشارندگی و جریان پلاستیک توده‌سنگ در اطراف حفاری، سنگهایی که رس زیاد داشته باشند، ممکن است دچار تورم شوند.	کنترل شکستگی و انبساط توده‌سنگ	اجرای هرچه سریعتر شاتکریت مسلح به الیاف فولادی به ضخامت ۵۰ میلیمتر، نصب شبکه فولادی یا قزبه‌های فولادی سبک در مکانهای ضروری، سپس اجرای لایه دوم شاتکریت مسلح به الیاف فولادی برای پوشش دادن قابها یا شبکه، ممکن است استفاده از سیستم پیش نگهداری و پیش حالت‌زنی برای پایداری جلوی جبهه کار حفاری لازم شود. در لایه آخری شاتکریت باید فاصله‌هایی را در نظر گرفت تا امکان حرکت و جابجایی کنترل شده ناشی از فشارندگی و تورم ممکن باشد، بعد از حصول پایداری باید فضای خالی را پر نمود.
شرایط ترکش (rockburst) سنگ ملایم در توده‌سنگ تراکم که در شرایط تنش بالا قرار دارد	خرد شدن و پوسته‌پوسته شدن و امکان ترکش سنگ ملایم	جلوگیری از ریزش سنگ شکسته و کنترل گسترش شکستگی	اجرای شاتکریت به ضخامت ۵۰ تا ۱۰۰ میلیمتر بر روی توری سیمی یا کابلی که با کمک راکبولت یا کابل مهار به طور محکم به سنگ متصل شده است.

## ۵-۹ نگهداری تونل با قطعات پیش ساخته بتنی

### ۵-۹-۱ کلیات و تاریخچه

در پوشش قطعانی، با اتصال قطعات پیش ساخته بتنی یک حلقه کامل بوجود آمده و سطح تونل را پوشش می‌کند. قطعات بتنی بوسیله بازوی مکانیکی مخصوصی در محل خود قرار می‌گیرد و پس از تکمیل یک حلقه در پشت آنها ملات شل سیمان و ماسه تزریق می‌شود تا فضای بین سطح خارجی قطعات و دیواره های تونل به خوبی پر شود. این تزریق علاوه بر افزایش استحکام سیستم نگهداری و یکپارچه کردن آن تا حدودی نیز آنرا در برابر آب نفوذ ناپذیر می‌نماید.

استفاده از قطعات بتنی به سال ۱۹۰۳ برمی‌گردد. در این سال روش مربور توسط یک پیمانکار انگلیسی ابداع گردید و در تونلی در Glasgow واقع در اسکاتلند بکار برده شد. این قطعات برخلاف قطعات امروزی که معمولاً از بتن مسلح ساخته می‌شوند دارای میلگرد در داخل قطعات نبود.

استفاده از قطعات بتنی بعداً گسترش بیشتری یافت و در سال ۱۹۱۱ چندین تونل به قطر تا ۲/۹ متر با استفاده از آن ساخته شد. انگیزه اصلی گسترش کاربرد قطعات بتنی، کمبود مواد اولیه برای تهیه قطعات چدنی قبل از جنگ دوم جهانی بود. در سال ۱۹۳۷ برای گسترش خط مرکزی متروی لندن به سمت شرق قطعات بتنی که مشابه با قطعات چدنی ساخته می‌شد بکار رفت. این قطعات بطور مسلح تولید می‌شد و نسبت به قطعات مشابه چدنی مزایا و معایبی داشت از جمله:

- ۱- هزینه ساخت پوشش قطعانی بتنی حدود ۶۰٪ هزینه پوشش مشابه چدنی بود.
- ۲- وزن قطعات بتنی ۱/۴ تن و کمتر از وزن پوشش چدنی بوزن ۱/۶ تن بود.
- ۳- برای نصب یک رینگ پوشش قطعانی بتنی همانند پوشش چدنی حدود ۲۰ دقیقه وقت صرف می‌شد.
- ۴- قطعات بتنی در مقایسه با قطعات چدنی مقاومت کمتری در مقابل بارهای ناشی از حمل و نقل دارند.

امتیازات قطعات بتنی سبب شد که در اکثر موارد قطعات پیش ساخته بتنی بعنوان جایگزین مناسبی برای قطعات چدنی شناخته شود.

## ۵-۹-۲ مشخصات پوشش

معمولا یک حلقه کامل از پنج تا هفت قطعه تشکیل می‌شود. تعداد قطعات و اندازه آنها باید بسته به ویژگی‌های خاص هر پروژه انتخاب شود. از جمله عواملی که در تعداد قطعات موثرند عبارتند از (Herrenknecht and Bappler, 2003):

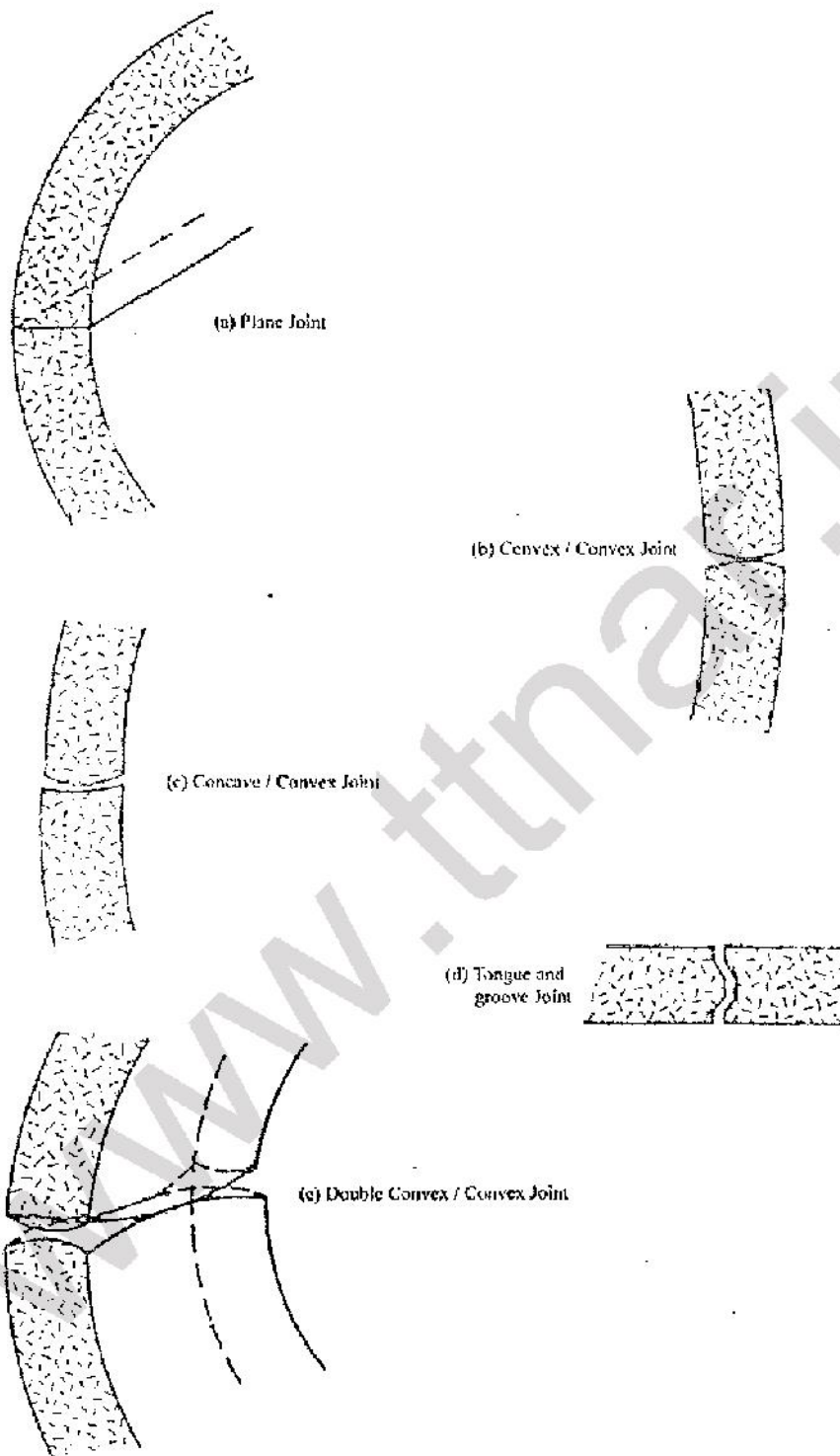
- ۱- قطر تونل
- ۲- حداکثر ابعاد مجاز قطعات برای حمل و نقل
- ۳- توانایی دستگاه نصب قطعات
- ۴- تعداد جک‌های رانش و نحوه توزیع آنها در محدوده حلقه.

## ۵-۹-۳ اتصالات قطعات بتنی

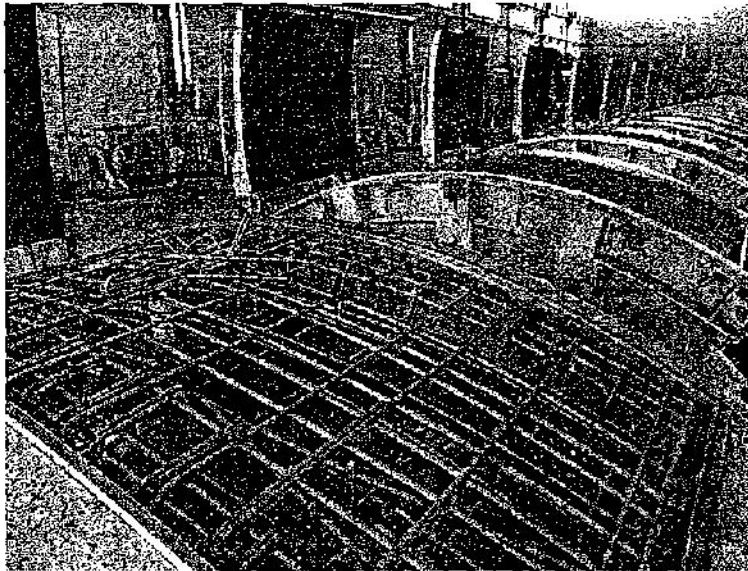
پنج نوع اصلی اتصال وجود دارد که در ساخت پوشش قطعاتی بین قطعات مورد استفاده قرار می‌گیرد. انواع این اتصالات در شکل ۵-۲۴ نشان داده شده است (Whittaker and Firth, 1990).

در مواردی که قطعات بتنی بعنوان سیستم نگهداری اولیه مورد استفاده قرار می‌گیرند اگر در مجاورت سینه کار نصب شوند بار قابل ملاحظه‌ای از طرف زمین به آن وارد خواهد شد. هرگاه تونل در زمینهای نرم و به کمک سپر حفر شود در این صورت نصب قطعات بتنی بلافاصله در پشت سپر و یا در داخل سپر در نزدیکی سینه کار انجام می‌گیرد و بنا بر این تحت تاثیر بار زیادی واقع می‌شود. در چنین مواردی مشکل اصلی طراحی پوشش بتنی مقابله با تنشهای کششی ناشی از لنگر خمشی در اثر خمش پوشش میباشد. در این موارد استفاده از پوشش با قطعات پیچ نشده راه حل مناسبی است. زیرا وقتی که این نوع پوشش تحت خمش قرار گیرد در اثر چرخش قطعات در محل اتصالات لنگرهای خمشی کمتری بر قطعات وارد می‌شود. بعلاوه، نصب صحیح قطعات و ایجاد امکان چرخش آنها در محل اتصال قطعات بهم از جمله نکاتی است که باید مد نظر قرار گیرد. اگر امکان چرخش قطعات نباشد امکان ایجاد تنشهای خمشی ثانویه در آنها وجود دارد که ممکن است باعث ایجاد ترک شود.

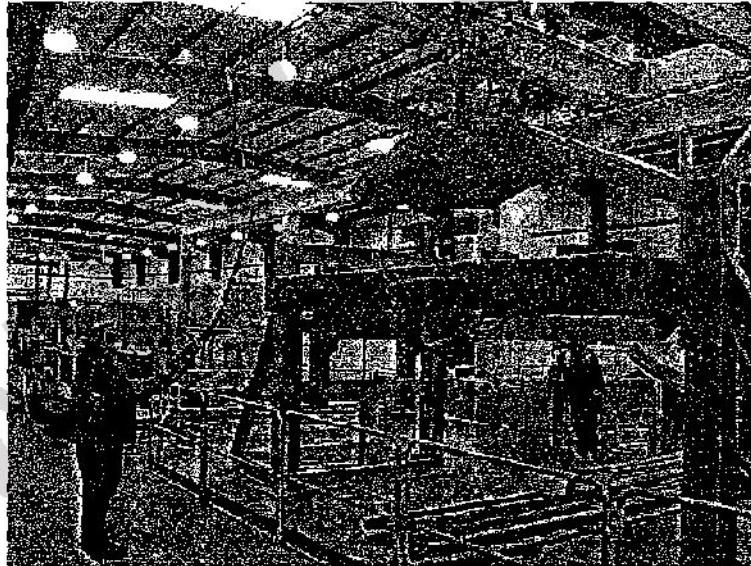
در شکل ۵-۲۵ و ۵-۲۶ دو تصویر مرتبط به سگمنت بتنی نشان داده شده است.



شکل ۵-۲۴- انواع اتصالات مورد استفاده در پوشش قطعاتی



شکل ۵-۲۵- نمونه قالب و آرمانوربندی سگمنت بتنی (مربوط به مترو اصفهان)



شکل ۵-۲۶- جایجایی سگمنت بتنی در کارخانه

### ۵-۱۰ انتخاب حائل مناسب برای شرایط مختلف زمین

برای تعیین حائل مورد نیاز یک تونل روش‌های مختلفی وجود دارد که شامل روش‌های تحلیلی، روش‌های تجربی، و روش‌های عددی می‌باشد. روش‌های تحلیلی کاربردهای محدود به شرایطی است که بتوان زمین محل حفاری تونل را بصورت یک محیط پیوسته فرض نمود که این فرض در غالب موارد صادق نمی‌باشد. روش‌های عددی نیازمند اطلاعات اولیه‌ای هستند که این اطلاعات معمولاً بسهولت قابل تعیین نمی‌باشند. بنابراین در اکثر موارد برای تعیین حائل مورد لزوم، بخصوص حائل مورد نیاز در حین حفاری تونل، از روش‌های تجربی استفاده می‌شود. مهمترین این روش‌ها روش RMR و روش Q می‌باشد که نحوه تعیین آنها در بخش‌های قبلی آمده‌است و ذیلاً نحوه استفاده از این روش‌ها برای تعیین حائل مورد نیاز تونل‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

برای انتخاب حائل مورد نیاز در سیستم RMR جدولی ارائه شده‌است (جدول ۵-۶) که با توجه به مقدار RMR می‌توان هم تعداد مراحل حفاری را مشخص نمود و هم حائل مورد نیاز از قبیل راکبولت، شاتکریت و قاب فولادی را تعیین کرد. باید توجه نمود که پیشنهادات بعمل آمده در این جدول بر اساس شرایط و فرضیات زیر استوار می‌باشد:

- روش مورد استفاده برای حفاری تونل، روش چالزنی و انفجار می‌باشد.
- شکل مقطع تونل نعل‌اسبی و دهنه آن ۱۰ متر می‌باشد.
- تنش بر جای قائم (insitu vertical stress) توده سنگ محل حفاری تونل کمتر از ۲۵ مگاپاسکال می‌باشد (معادل عمق حدود ۹۰۰ متری از سطح زمین).

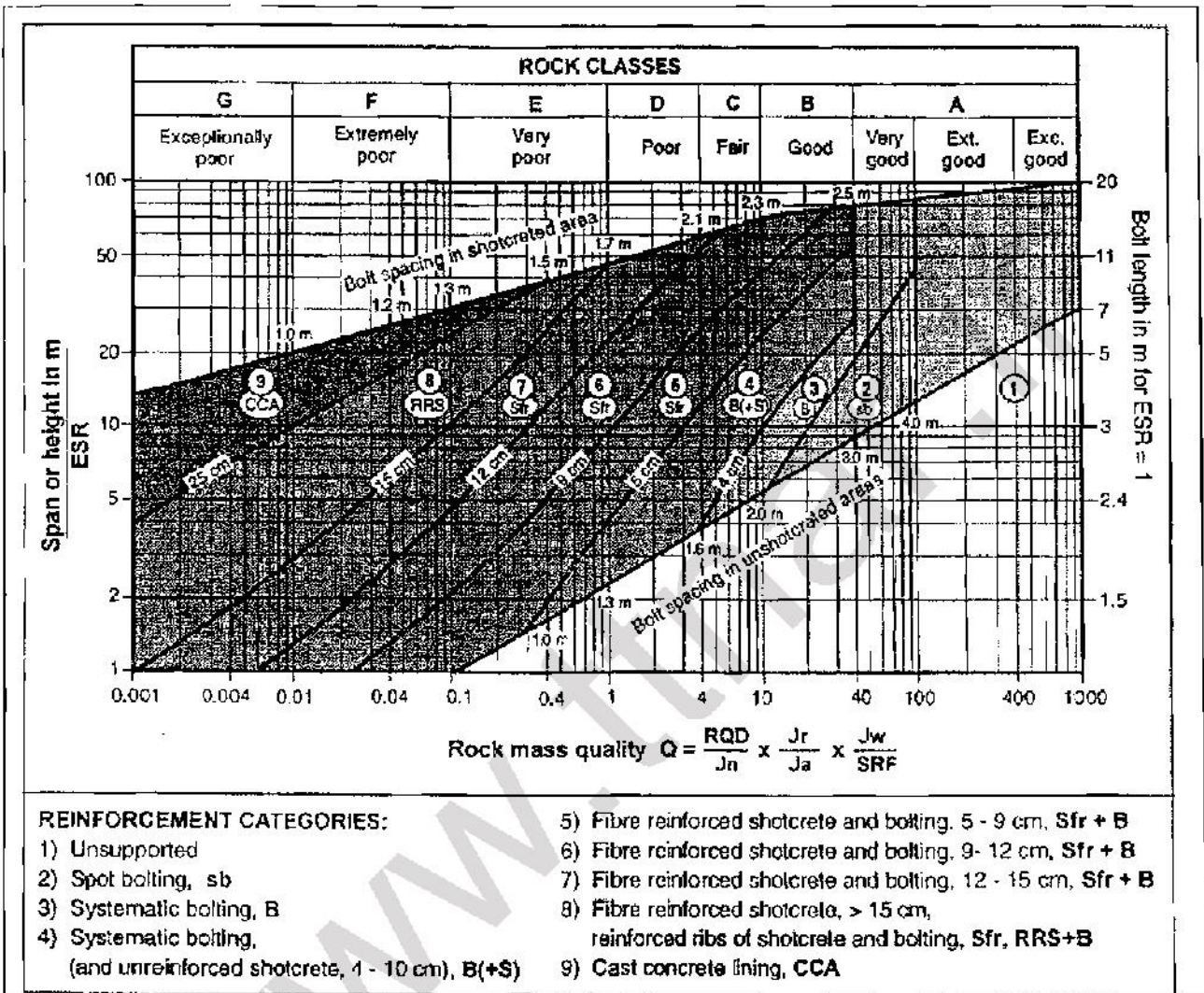
در صورت استفاده از روش حفاری مکانیزه برای حفاری تونل، استفاده از توصیه‌های روش RMR برای حائل‌بندی تونل، مقداری دست‌بالا خواهد بود زیرا در روش حفاری مکانیزه آسیب بسیار کمتری به سنگ پیرامون تونل وارد می‌شود. بنابراین در این حالت می‌توان تا حدی حائل پیشنهادی توسط روش RMR را در جهت کاهش آن تعدیل نمود.

در سیستم Q برای انتخاب حائل مورد نیاز، می‌توان از نموداری که به همین منظور ارائه شده‌است استفاده نمود (شکل ۵-۲۷). با داشتن مقدار Q و دهنه یا ارتفاع تونل و نیز با در نظر گرفتن مقدار مناسب برای FSR (Excavation Support Ratio) می‌توان حائل مورد نیاز برای سقف و دیواره‌های تونل را از این منحنی بدست آورد. مقدار ESR یا توجه به درجه اهمیت تونل انتخاب می‌شود به اینصورت که هرچه درجه اهمیت تونل بالاتر باشد، مقدار ESR کمتر در نظر گرفته می‌شود. در خصوص تونل‌های راه و راه‌آهن مقدار ESR معادل ۱ در نظر گرفته می‌شود.



جدول ۵-۶- راهنمای طبقه بندی RMR برای حفاری و تعیین حائل مورد نیاز تونل‌ها

طبقه توده سنگ	مراحل حفاری	سیستم حائل		
		راکبولت (به قطر ۲۰ میلی‌متر که بطور کامل تزریق می‌شود)	شاتکریت	قاب‌های فولادی (steel sets)
سنگ خیلی خوب I RMR: 81-100	حفاری مقطع در یک مرحله - ۲ متر پیشروی	معمولا حائل مورد نیاز نیست، ولی بعضا راکبولت بصورت موضعی و محلی (spot bolting) لازم است.		
سنگ خوب II RMR: 61-80	حفاری مقطع در یک مرحله، ۱ تا ۱/۵ متر پیشروی، نصب حائل تا ۲۰ متری سینه کار	راکبولت در مناطقی از تاج به طول ۳ متر و با فواصل ۲/۵ متر و بعضا همراه با توری سیمی	در صورت لزوم ۵۰ میلی‌متر در تاج	لازم نیست
سنگ متوسط III RMR: 41-60	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.	استفاده از راکبولت بصورت منظم با طول ۴ متر و با فاصله بندی ۲ تا ۱/۵ متر در تاج و دیواره‌ها و توری سیمی در تاج.	۵۰-۱۰۰ میلی‌متر در تاج، ۳۰ میلی‌متر در دیواره‌ها	لازم نیست.
سنگ ضعیف IV RMR: 21-40	حفاری بصورت طاق و سکو (top heading & bench) ۱-۱/۵ متر پیشروی در طاق، همزمان با آتشکاری حائل تا ۱۰ متری سینه کار نصب شود.	استفاده از راکبولت به طول ۴ تا ۵ متر بصورت شبکه منظم یا فاصله بندی ۱ تا ۱/۵ متر در تاج و دیواره‌ها همراه با توری سیمی	۱۰۰-۱۵۰ میلی‌متر در تاج، ۱۰۰ میلی‌متر در دیواره‌ها	قاب‌های فولادی سبک تا متوسط با فاصله بندی ۱/۵ متر در صورت نیاز
سنگ خیلی ضعیف V RMR < 20	حفاری چند مرحله ای (multiple drifts) ۱/۵-۱/۵ متر پیشروی در راس، حائل را همزمان با حفاری نصب کنید، بتن پاشی به محض انجام آتشکاری انجام شود.	راکبولت به طول ۵ تا ۶ متر بصورت شبکه منظم و فاصله بندی ۱ تا ۱/۵ متر در تاج و دیواره‌ها همراه با توری سیمی، استفاده از راکبولت در کف (invert)	۱۵۰-۳۰۰ میلی‌متر در تاج، ۱۵۰ میلی‌متر در دیواره‌ها و ۵۰ میلی‌متر در سینه کار	قاب‌های فولادی متوسط تا سنگین با فاصله بندی ۰/۷۵ متر یا میان‌قاب‌های فولادی (steel lagging) و در صورت لزوم پیش‌مهار (forepoling) کف تونل بسته و مهار شود.



شکل ۵-۲۷- راهنمای حائل بندی تونل ها در سیستم Q

## ۶- استفاده از ابزاربندی برای رفتارنگاری تونل‌ها

### ۶-۱ تاریخچه ابزاربندی

ابزاربندی‌های ژئوتکنیکی طی سالهای ۱۹۳۰-۱۹۴۰ برای کمک به مشاهدات صحرایی و محلی بوجود آمد. در ۵۰ سال اول، فقط تعدادی روش مشخص برای ابزاربندی و اندازه گیری بکار می‌رفت در سالهای اخیر با پیشرفت تکنولوژی و افزایش نقش و حساسیت اندازه گیریهای ژئوتکنیکی، وسایل پیچیده الکتریکی و پنوماتیکی پا به عرصه گذاشته و رایج گشته‌اند. در عین حال این تکنولوژی پیشرفته نیاز فزاینده‌ای به مهارتهای ژئوتکنیکی دارد که متأسفانه امروزه تعداد زیادی از برنامه های ابزاربندی در دست افرادی است که آشنایی کافی با هدف و منظورهای این اندازه گیریها ندارند و در نتیجه، این ابزاربندیها و اندازه گیریها در مقایسه با سالهای آغازین، بعضاً مقید نیستند.

### ۶-۲ هدف از ابزاربندی

به طور کلی اهداف اصلی ابزاربندی و رفتارنگاری عبارتند از :

**الف- کنترل در حین عملیات اجرایی در خلال دوره ساختمان، کلیه پارامترهای مهم طرح مورد بررسی قرار گرفته و در صورت لزوم بازنگریهای لازم در طرح و نحوه عملیات اجرایی اعمال می‌گردد.**

**تأیید طراحی :** ابزارها برای تأیید فرضیات طراحی و کنترل عملکرد پروژه با آنچه که برای آن پیش‌بینی شده است، به کار می‌روند. داده‌های بدست آمده از ابزارهای اندازه‌گیری که از مراحل اولیه یک پروژه حاصل شده باشند، ممکن است احتیاج (و یا مجال) تغییر در طراحی برای مراحل بعدی پروژه را آشکار سازند.

**کنترل نحوه عملیات اجرایی :** ابزارها برای بازبینی تأثیرات روش‌های مختلف اجرا نیز به کار می‌روند. داده‌های حاصل از ابزار به مهندس اجرایی، کمک می‌کند کرده تا تشخیص دهد که آیا نحوه و یا سرعت اجرا برای تأمین پایداری صحیح است یا نه.

**حمایت قانونی:** داده‌های ابزار دقیق به عنوان شهادی برای دفاع قانونی از طراحان و پیمانکاران در مقابل ادعای مالکان زمین و مایملک مجاور پروژه، مبنی بر آسیب رسیدن به مایملک آنان ناشی از اجرای پروژه، کاربرد قانونی دارند.

**ب- کنترل بعد از اتمام عملیات ساختمانی:** در این مرحله، میزان دستیابی به اهداف طراحی مورد بررسی قرار گرفته و اطلاعات مبنای قبل از بهره برداری تهیه می‌شوند.

ج- کنترل در حین بهره برداری (کنترل پایداری): در این مرحله، تغییراتی که در پارامترهای مختلف به علت شروع عملیات بهره برداری رخ می‌دهد، مورد اندازه گیری و بررسی قرار می‌گیرند. این مرحله در واقع کنترل رفتار سازه تحت بارهای وارده و مقایسه آن با مفروضات طراحی می‌باشد. در صورت افزایش مقدار یک پارامتر از مقدار پیش فرض، آگاهیهای لازم برای شروع یک حادثه ناخواسته به وجود آمده و راه‌های پیشگیری و کاهش زیانها به مرحله اجرا درمی‌آید.

د- اهداف تحقیقاتی و بهبود روشهای طراحی: از جنله اهداف مهم ابزار بندی، اجرای پروژه های تحقیقاتی به منظور مقایسه نتایج عملی و در صورت لزوم بهبود و اصلاح روشهای طراحی می‌باشد.

### ۳-۶ لزوم ابزاربندی

رفتارسنجی در مرحله مطالعه، ساخت و بهره برداری، یکی از مفیدترین ابزارها جهت کنترل طرح یا بهینه نمودن و تصحیح آن و نیز فراهم آوردن تمهیدات لازم در حین ساخت بوده و پس از تکمیل پروژه، به منظور جلوگیری از صدمات و خرابیهای احتمالی و یا پیشینه کردن سود اقتصادی طرح به کار می‌روند. بدین منظور با نصب ابزار دقیق مناسب، پارامترهای مؤثر در پایداری و عملکرد طرح در قسمت های مختلف آن و نیز رفتار آن نسبت به زمان، مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند.

با توجه به پیشرفت های زیادی که در زمینه تکنولوژی و ساخت وسایل اندازه گیری و ابزار دقیق صورت گرفته است، بهترین و مطمئن ترین راه به منظور کنترل ایمنی طرح در زمان ساخت و بهره برداری، استفاده از سیستم رفتارسنجی است به طوری که امروزه بهره گیری از سیستم های ابزار دقیق، یکی از ضروریات اصلی طرحهای عمرانی مهم از جمله تونل‌ها قلمداد می‌شود.

طراحی یک سازه ژئوتکنیکی مانند تونل براساس بررسی‌ها و آزمایشات اولیه و قضاوت مهندسی در تعیین محتمل ترین مقادیر خصوصیات مهندسی در دامنه مقادیر ممکن انجام می‌شود. همزمان با پیشرفت اجرا و مشاهده شرایط ژئوتکنیکی و ثبت رفتار سازه، میزان اعتبار قضاوت های طراحی ارزیابی گردیده و در صورت لزوم، اصلاح می‌گردند. بنابراین مشاهدات مهندسی در حین اجرای سازه‌های ژئوتکنیکی یک جزء مکمل روند طراحی بوده و ابزارگذاری ژئوتکنیکی، وسیله ای برای کمک به این مشاهدات می‌باشد.

### ۴-۶ تواناییهای فردی لازم در ابزاربندی

تکسین و پرسنل اندازه گیر و ابزاربند باید قابل اعتماد، صبور، با پشتکار، دقیق، فعال، با انگیزه و آشنا با مقدمات مهندسی ژئوتکنیک، مکانیک و برق باشد.

### ۵-۶ خطا و عدم اطمینان در اندازه گیری

ابزاربندی برای اندازه گیری کمیتهای مختلف مورد استفاده قرار می گیرد و هر اندازه گیری دارای خطاها و عدم اطمینانهای مخصوص خود می باشد. در این قسمت به بررسی اصطلاحات مختلف، عوامل ایجاد خطا، تاثیر آنها بر اندازه گیریها و روشهای کاهش خطا پرداخته می شود.

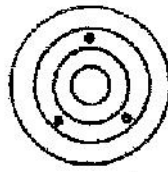
**تطابق (conformance):** وجود وسیله اندازه گیر نباید پارامتر مورد بررسی را تحت تاثیر قرار دهد و ابزاری که پارامتر مورد سنجش را تغییر دهد، تطابق کمتری خواهد داشت. بعنوان مثال، کشیدگی سنج گمانه و هر گونه تزریق اطراف آن باید به اندازه کافی شکل پذیر باشد تا کمتر بر تغییرشکنهای سنگ اطراف خود تاثیرگذار باشد و یا ویژگیهای شکل پذیری سلول فشارسنج زمین باید با شکل پذیری زمین اطراف خود متناسب باشد. همچنین حفر گمانه برای نصب یک وسیله نباید تغییر زیادی در شرایط زمین اطراف آن ایجاد کند. بهمین ترتیب پیژومترها نباید با ایجاد مسیرهای زهکشی باعث افت فشار آب حفره‌ای در مکانهای دیگر شوند. بدلائل فوق، تطابق یکی از عوامل موثر در دستیابی به دقتهای زیاد خواهد بود.

**صحت (accuracy):** صحت، فاصله مقدار اندازه گیری شده یک پارامتر را با مقدار واقعی آن بیان می کند. صحت یک وسیله طی کالیبراسیون آن، که مقدار واقعی پارامتر مورد بررسی توسط یک وسیله دیگری که صحت آن مشخص و تعیین شده است، مشخص می شود. معمولاً صحت بصورت یک مقدار  $\pm$  دار بیان می شود. صحت  $\pm 1$  میلیمتر یعنی اینکه مقدار اندازه گیری شده در محدوده یک میلیمتری مقدار واقعی است و صحت  $\pm 1\%$  بمعنی اینست که مقدار اندازه گیری شده در محدوده یک درصدی مقدار واقعی است. هنگام انتخاب هر وسیله اندازه گیر با صحت مشخص، صحت کل سیستم و صحت تک تک اجزاء آن باید مورد توجه قرار گیرد.

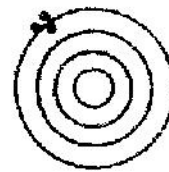
**دقت (precision):** دقت، فاصله هر یک از مقادیر اندازه گیری شده به میانگین آنها می باشد و همان تکرارپذیری (repeatability) می باشد. معمولاً دقت بصورت یک مقدار  $\pm$  دار بیان می شود. تعداد ارقام معنی دار در هر اندازه گیری، دقت آنرا نشان می دهد؛ بعنوان مثال دقت  $\pm 1/100$  بیشتر از دقت  $\pm 1/10$  است و بالعکس مقدار هر اندازه گیری، دقت دستگاه و وسیله استفاده شده را نشان می دهد. همچنین تعداد ارقام معنی دار نمی تواند صحت اندازه گیری را مشخص کند. تفاوت دقت و صحت در شکل ۶-۱ نشان داده شده است. مرکز دوائر مقدار واقعی پارامتر مورد بررسی را نشان می دهد. در حالت اول اندازه گیری دقیق بوده ولی صحیح نیست مثل اندازه گیری با متر تاب خورده یا فشار سنج صفر نشده؛ چنین خطاهایی، خطاهای سیستماتیک (systematic) می باشند. در حالت دوم اندازه گیری دقیق نبوده ولی در صورت کافی بودن تعداد اندازه گیریها، میانگین آنها صحیح خواهد بود، چنین خطاهایی، خطاهای تصادفی (random) می باشند. در نهایت، اندازه گیری حالت سوم دقیق و صحیح می باشد.



دقیق و صحیح



غیردقیق ولی بطور متوسط صحیح



دقیق ولی نادرست

شکل ۶-۱- تفاوت دقت و صحت در اندازه گیریها

**ریزی (resolution):** کوچکترین تقسیم بندی مقیاس قرائت هر وسیله، ریزی آن نامیده می شود. باید توجه کرد که با اینکه برخی اوقات میتوان بین دو تقسیم بندی مقیاس قرائت، درون یابی کرد ولی این درون یابی باعث افزایش ریزی وسیله نمی شود. ریزی دستگاههای دیجیتالی، به اندازه افزایش آخرین رقم آنهاست.

**حساسیت (sensitivity):** حساسیت در حقیقت میزان واکنش یک وسیله یا وارسان در برابر مقدار ورودی به آن می باشد، بعنوان مثال حساسیت یک وارسان اختلافی خطی (LVDT) که برای تغییر شکل سنگها مورد استفاده قرار می گیرد، حدود ۱۰۰۰ میلی ولت به ازاء هر اینچ (mV/in) است. حساسیت بالا نمی تواند دلیلی بر دقت و یا صحت بیشتر باشد و وسیله حساستر فقط بیشتر واکنش داده و خروجی بیشتری دارد.

**خطا (error):** خطا اختلاف بین مقدار اندازه گیری شده و مقدار واقعی است، که در نتیجه از نظر عددی مساوی دقت خواهد بود. انواع خطاها را میتوان بصورت زیر خلاصه کرد:

۱. خطاهای بزرگ (gross errors): این خطاها ناشی از بی دقتی، خستگی و تجربه کم می باشند و شامل قرائت غلط، ثبت غلط، خطاهای محاسباتی، نصب اشتباه، عدم آشنایی با دستگاه قرائت و اتصالات الکتریکی غلط می باشند. این خطاها با تکرار قرائت، تعدد اپراتور، مقایسه قرائت فعلی با قرائتهای قبلی و آشنایی و آموزش کافی قابل کاهش هستند.
۲. خطاهای سیستماتیک (systematic errors): این خطاها ناشی از کالیبراسیون نادرست، تغییر کالیبراسیون با زمان، هیستریزیس و خطی بودن می باشند. این خطاها را میتوان کالیبراسیونهای دوره ای و مقایسه نتایج با استانداردها کم کرد.
۳. خطاهای محیطی (environmental errors): این خطاها ناشی از گرما، رطوبت، لرزش، ضربه، فشار، خوردگی و غیره می باشند. که میتوان آثار ناشی از عوامل فوق الذکر را اندازه گیری کرده و ضرایب اصلاحی اعمال نمود و یا از وسایلی که کمتر تحت تاثیر عوامل محیطی

قرار می‌گیرند، استفاده کرد. بطور کلی توصیه میشود شرایط محیطی به‌مراه داده‌های دیگر اندازه‌گیری و ثبت شوند.

۴. خطاهای مشاهده‌ای (observational errors): تکنسینهای مختلف، روشهای مختلفی قرائت می‌کنند. این خطاها را میتوان با برگزاری کلاسها و دوره‌های آموزش مخصوص کاهش داد. همچنین در صورت امکان با استفاده از روشهای قرائت خودکار میتوان این خطاها را از بین برد.

#### ۶-۶ مشخصات عمومی دستگاه‌های اندازه‌گیری

دستگاههای اندازه‌گیری، لازم است تا در سخت‌ترین شرایط محیطی، قادر به انجام وظیفه بوده و به طرز عادی عمری در حدود حداقل چندین دهه داشته باشند. مشخصات فیزیکی مطلوب برای یک ابزار به قرار زیر است:

۱. از لحاظ مفهومی ساده و سازگار با نوع اندازه‌گیری باشد.
۲. محکم و قابل اعتماد باشد.
۳. پایایی لازم در مقابل شرایط محیطی و بهره‌برداری سخت را دارا باشد.
۴. از نظر قیمت اولیه و مخارج نگهداری و بهره‌برداری ارزان باشد.
۵. دقت و حساسیت لازم را داشته باشد.

#### ۶-۷ طراحی سیستم‌های ابزار دقیق

منظور از طراحی سیستم‌های ابزار دقیق، ارائه برنامه کار، مشخصات فنی دستگاه‌ها و جزئیات نصب آنها به همراه توضیحات لازم در خصوص چگونگی بهره‌برداری از آنهاست. طراحی سیستم ابزار دقیق، مانند هر مسئله مهندسی دیگری، نیازمند تعریف دقیق از مسئله مورد نظر است و پس از آن با برداشتن گامهای مشخص، پاسخ مسئله مذکور مشخص می‌گردد که شامل ارائه دقیق جزئیات، نقشه‌های اجرایی، تعیین دقیق کیفیت اجرا و حتی روش اجرا و تعیین مشخصات فنی دستگاه‌ها می‌باشد. طرح ریزی یک سیستم ابزار دقیق باید به گونه‌ای باشد تا این اطمینان حاصل شود که اطلاعات مورد نیاز هم در حین دوره ساختمان و هم در دوره طولانی‌تر بهره‌برداری، بدست خواهند آمد. نیازهای یک سیستم و روشهای مورد استفاده در تجزیه و تحلیل مشاهدات باید به طور دقیق، قاعده‌بندی شده و انتخاب نهایی ابزار اندازه‌گیری و همچنین آرایش هماهنگ آنها، منطبق بر این نیازها باشد.

به طور کلی، گامهای مختلف لازم جهت طراحی سیستم ابزار دقیق به ترتیب زیر است:

۱. شناسایی پروژه
۲. تعریف هدف ابزارگذاری

۳. گزینش پارامترهایی که باید اندازه گیری شوند.
۴. پیش بینی مقادیر تغییرات متغیرها
۵. انتخاب ابزار یا تجهیزات
۶. انتخاب محل نصب ابزار
۷. پیش بینی روشهای ترمیمی
۸. تعیین مسئولیتهای طراحی، ساخت، تهیه و بهره برداری از ابزار و پرسنل ماهر
۹. تعیین عوامل مؤثر بر اندازه گیریها
۱۰. تهیه برنامه کاری در زمینه نصب ابزار و قرائت آنها

www.ttnar.ir



### ۶-۸ چند نمونه از وسایل اندازه‌گیری در تونل‌ها

اندازه‌گیری‌هایی که در حین اجرای انجام می‌شود باید به گونه‌ای باشند که از اطلاعات بدست آمده برای ارزیابی اعتبار و صحت طراحی استفاده کرد یا توسط آنها مطالعات طراحی را تکمیل نمود. بعلاوه این اندازه‌گیری‌ها باید مسائل و مشکلات بالقوه در پروژه را هشدار دهند تا اقدامات ترمیمی قبل از اینکه مشکلات به مرحله‌ای برسند که خیلی گران تمام شود یا از نظر اجرایی غیر ممکن باشد انجام شود. در بحث و بررسی پیرامون استفاده از ابزاربندی طی مراحل اجرایی تونل باید توجه نمود که ابزار مورد استفاده ساده و محکم باشند و به طریقی نصب شوند که تداخل با فعالیت‌های اجرایی به حداقل برسد.

#### ۶-۸-۱ نقشه برداری نوری

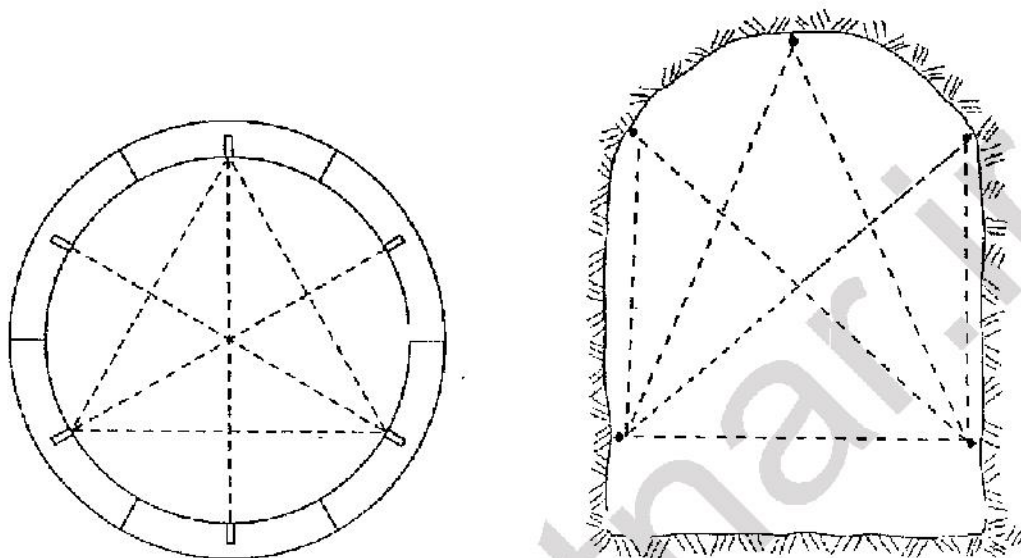
اندازه‌گیری جابجایی و تغییر مکان موثرترین وسیله کنترل و نظارت بر رفتار توده سنگ طی اجرای یک تونل است. روشهای متعددی برای کنترل و نظارت بر تغییر مکان‌ها و جابجایی توده سنگ موجود است که مهمترین آنها شامل نقشه برداری، استفاده از تقارب‌سنج‌ها برای اندازه‌گیری همگرایی تونل و بکارگیری انبساط‌سنج‌ها برای اندازه‌گیری تغییر مکان توده سنگ اطراف تونل می‌باشد.

وقتی که دسترسی مناسب فراهم باشد و وقتی که اندازه‌گیری‌ها را بتوان نسبت به پایه ثابت و استواری سنجید روشهای نقشه برداری معمولی و با کیفیت بالا از قبیل تراز بانی و مثلث بندی را می‌توان برای تعیین مقدار مطلق تغییر مکان‌های نقاط و هدف‌های ثابت روی جدار تونل بکار برد. مزیت این روش به آن است که وسایل نقشه برداری در حد کیفیت مورد نظر معمولاً در محل موجود است و اکثر نقشه برداران خوب قادر به انجام اندازه‌گیری‌های مورد نیاز هستند. عیب این روش این است که اندازه‌گیری‌ها و محاسبات بعدی وقت گیر است و با سایر کارها و وظایف نقشه بردار معمولاً تداخل می‌کند و بالاخره در تونل‌های بلند ممکن است از دقت کافی برای شناسایی جابجایی‌ها در توده سنگ سالم و سخت برخوردار نباشد.

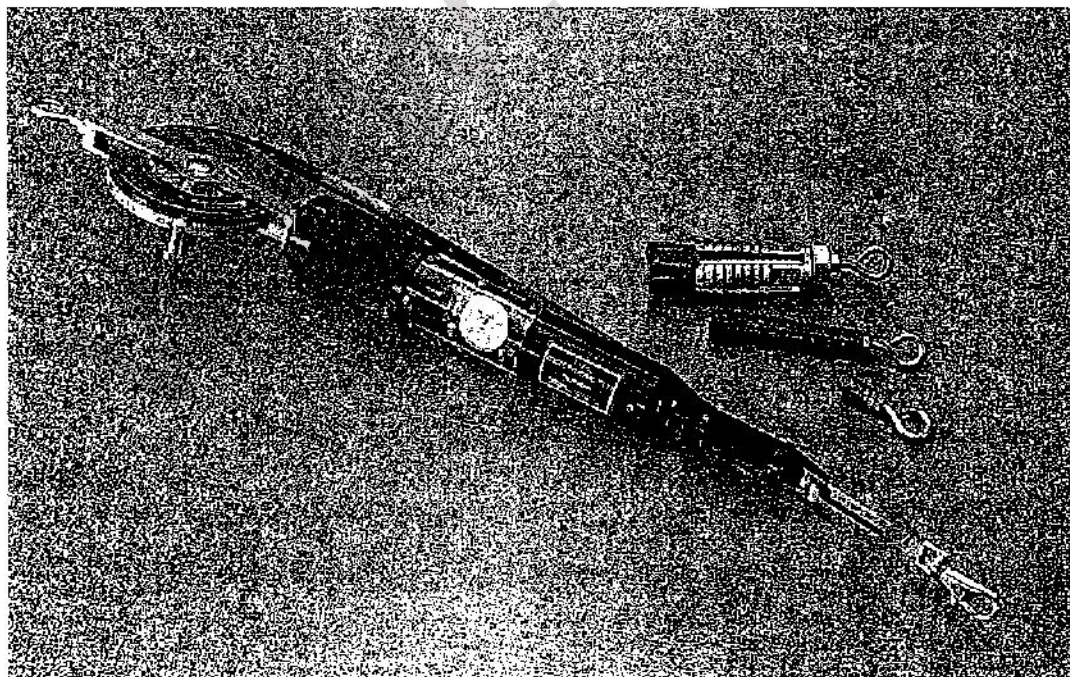
با ورود دستگاه‌های الکترونیکی - نوری برای اندازه‌گیری فاصله، کار نقشه برداران ساده‌تر شده است و می‌توان از محل ثابت دستگاه، فواصل آن تا تعدادی نشانه‌ها و علائم باز تابنده را که به طاق و دیواره‌های تونل وصل شده اندازه‌گیری کرد و از این طریق اطلاعات مفیدی بدست آورد.

#### ۶-۸-۲ اندازه‌گیری همگرایی

بطور معمول، میزان همگرایی تونل با اندازه گیری فاصله نقاط نشانه (reference points) که معمولا بصورت قلاب‌هایی (pins) به دیواره ها و طاق حفاری متصل می‌شوند، انجام می‌شود (شکل ۶-۲). انواع مختلف ابزارهای اندازه گیری همگرایی موجود هستند در شکل ۶-۳ یک انبساط‌سنج نواری (tape extensometer) که استفاده زیادی در اندازه‌گیری همگرایی دارد، نشان داده شده است.



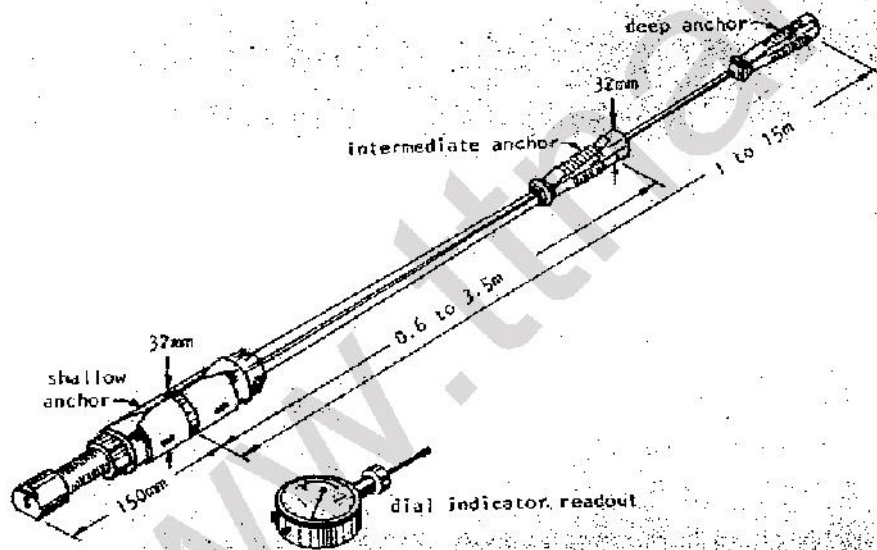
شکل ۶-۲ - نمونه ای از اندازه گیری همگرایی در تونل‌ها - در شکل سمت راست نقاط نشانه در چلهای حفر شده در سنگ نصب شده و در شکل سمت چپ نقاط نشانه در سگمنت‌های بتنی تعبیه شده است.



شکل ۳-۶- نمونه یک انبساطسنج نواری (tape extensometer) همراه با انواع قلاب‌ها

### ۳-۸-۶ انبساط سنج میله‌ای (rod extensometer)

این ابزار برای اندازه‌گیری جابجایی‌ها در توده سنگی که تونل را در بر گرفته استفاده می‌شود. این انبساط سنج‌ها مرکب از میله‌هایی است، که به نقاطی انتخابی در داخل چالی که به همین منظور حفر شده است متصل می‌شود. میله‌ها معمولاً در پوششی از لوله پلاستیکی قرار می‌گیرند تا اطمینان حاصل شود که اصطکاک در حداقل ممکن باقی می‌ماند. شکل ۴-۶ یک انبساط‌سنج ساده با دو محل مهار (anchor) را نشان می‌دهد.



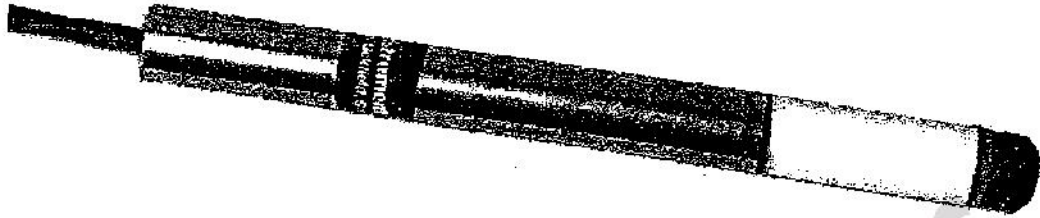
شکل ۴-۶- نمونه‌ای از انبساط‌سنج میله‌ای برای اندازه‌گیری جابجایی‌ها

در توده سنگ اطراف تونل.

### ۴-۸-۶ پیزومتر (piezometer)

با استفاده از پیزومتر می‌توان فشار آب را در نقاط مورد نظر اندازه‌گیری نمود. پیزومترها دارای انواع مختلفی هستند که یک نمونه از آنها در شکل ۵-۶ نشان داده شده است. با نصب پیزومتر در پشت پوشش بتنی تونل یا در پشت سگمنت‌ها می‌توان فشار وارده از طرف آب بر آنها را حساب نموده و با

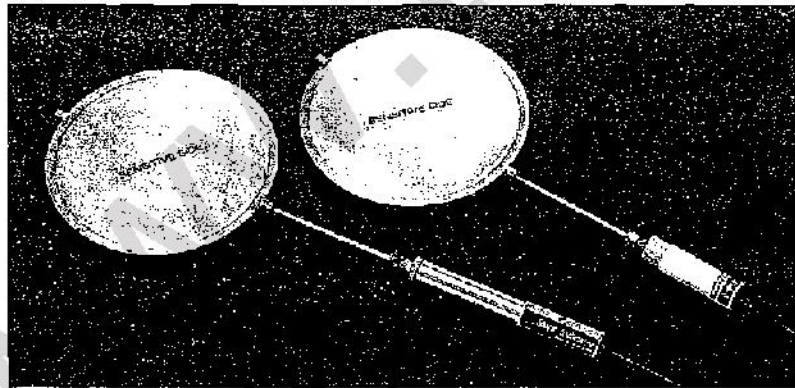
مقادیری که در مرحله طراحی در نظر گرفته شده بود مقایسه نمود و در صورت تفاوت زیاد تمهیدات لازم را بعمل آورد.



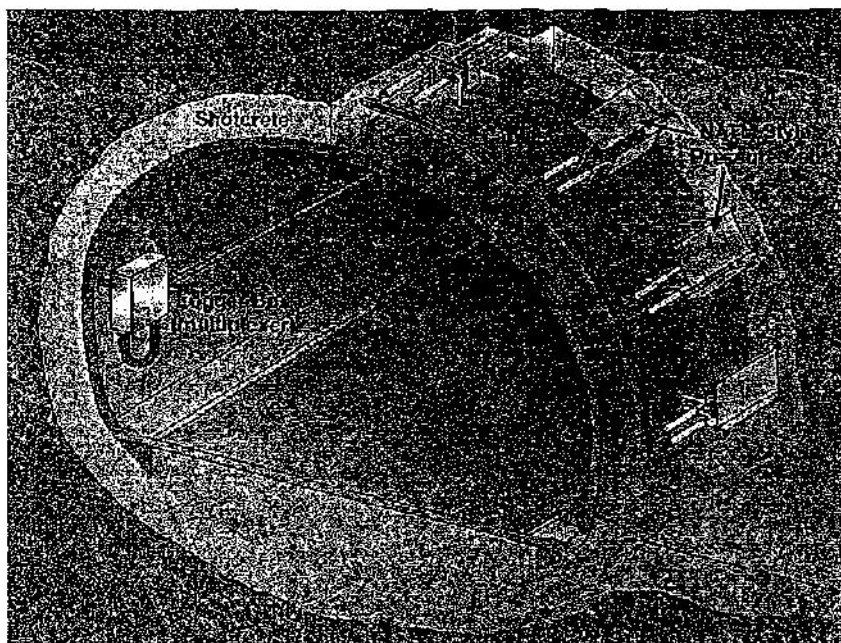
شکل ۶-۵- نمونه یک پیزومتر

#### ۶-۸-۵ سلول فشار کل (total pressure cell)

با استفاده از سلول فشار کل، می توان میزان فشار کل وارده بر پوشش بتنی، شاکریت و یا سگمنت های بتنی را اندازه گرفت. سلول فشار کل از دو صفحه که لبه آنها به هم متصل شده تشکیل می شوند. فاصله بین این صفحات با یک مایع تراکم ناپذیر پر می شود. در شکل ۶-۶ نمونه ای از سلول فشار کل نشان داده شده است. این سلول ها فشار وارد بر صفحات را در جهت عمود بر آنها اندازه گیری می کنند. در شکل ۶-۷ نمونه ای از نحوه نصب سلول های فشار کل در یک توتل نشان داده شده است.



شکل ۶-۶- نمونه سلول فشار کل



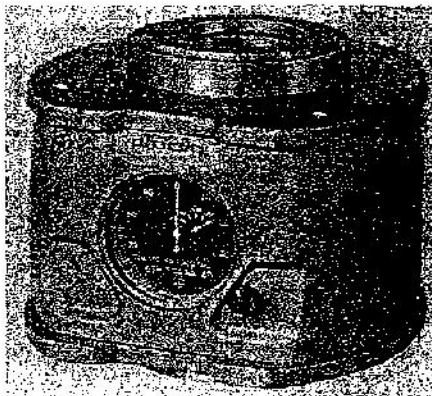
شکل ۶-۷- نمونه‌ای از نحوه نصب سلول‌های فشار کل در یک تونل

اگر در محلی که سلول فشار کل نصب شده، پیزومتر نیز نصب شده باشد، اختلاف فشار قرائت شده توسط سلول فشار کل و پیزومتر، فشار وارده از سنگ را مشخص می‌کند. یا داشتن فشار واقعی وارده از طرف سنگ و آب، می‌توان در صورت لزوم در ضخامت سگمنت‌ها یا پوشش بتنی تجدید نظر نمود که این تجدید نظر ممکن است منجر به تغییراتی در قطر حفاری تونل نیز بشود.

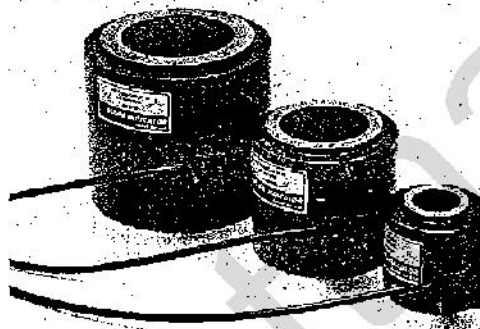
#### ۶-۸-۶ سلول بار (load cell)

از سلول بار برای اندازه‌گیری میزان بار در راکبولت‌ها استفاده می‌شود. سلول‌های بار انواع مختلفی دارند. در شکل ۶-۸ یک سلول بار که میزان بار وارده بطور مستقیم روی آن قابل قرائت است و در شکل ۶-۹ یک سلول بار دیگر که نیاز به دستگاه جداگانه‌ای برای قرائت میزان بار دارد، نشان داده شده است.

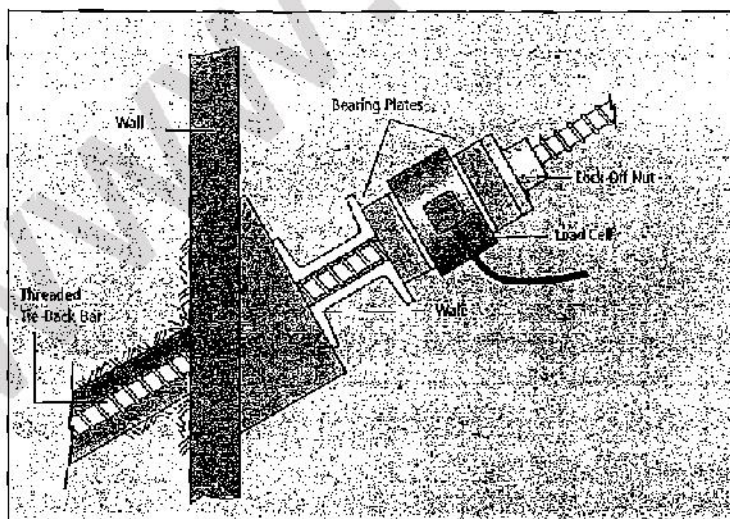
در شکل ۶-۱۰ نحوه نصب سلول بار نشان داده شده و در جداول ۲۲ و ۲۳، ظرفیت و مشخصات هندسی سلول‌های بار ساخت دو شرکت مختلف ارائه شده است.



شکل ۶-۸- نمونه یک سلول بار که میزان بار وارده بطور مستقیم روی آن قابل قرائت است



شکل ۶-۹- نمونه چند سلول بار با ظرفیت‌های مختلف



شکل ۶-۱۰- نحوه نصب سلول بار (بروشور شرکت Slope Indicator)

جدول ۶-۱- مشخصات سلولهای بار شرکت Slope Indicator

Capacity Metric Ton	ID x OD x Height mm	Bearing Area mm <sup>2</sup>
45	42 x 89 x 83	1077
90	42 x 89 x 83	2148
135	51 x 108 x 89	3225
135	76 x 127 x 114	3225
180	64 x 127 x 114	4303
180	89 x 152 x 140	4303
270	76 x 152 x 114	6451
270	102 x 168 x 152	6451

جدول ۶-۲- مشخصات سلولهای بار شرکت Soil Instruments

Working Load kN	Overall dia. mm	Centre Hole mm	Height mm	Weight kg	VW Sensors
100	89	30	80	2.4	3
250	102	40	80	3.9	3
500	121	50	80	5.3	3
500	152	90	80	5.9	3
1000	146	50	80	8.3	3
1000	165	90	80	8.2	3
1500	220	150	80	11.0	5
2000	275	190	80	15.7	6
3000	292	190	80	27.0	6
4000	292	190	80	28.5	6
5000	305	190	80	30.0	6

[www.ttnar.ir](http://www.ttnar.ir)