

بسمه تعالی



نام جزوه: تونل سازی

نام استاد: دکتر پلاسی

دانشگاه: تهران

پایان نامه ارشد و دکتری عمران
مدیر گروه به همراه تیم متخصص در انجام پایان نامه
ارشد و دکتری عمران از پروپوزال تا دفاع و ثبت
مقاله همراه شماست
<https://telegram.me/omranihayesharif>

بنام خدا

فهرست مطالب

۱- طبقه بندی زمین مسیر از نظر زمین شناسی و ژئوتکنیکی.....	۱
۱-۱ طبقه بندی ترزاقی (Terzaghi).....	۱
۲-۱ طبقه بندی توده سنگ به روش RMR.....	۲
۳-۱ طبقه بندی توده سنگ به روش Q.....	۹
۲- مشخصات هندسی تونل های راه و راه آهن.....	۱۴
۲-۱ شیب تونل های راه.....	۱۴
۲-۲ نیم رخ عرضی تونل های راه.....	۱۵
۳-۲ مسیر تونل های راه در پلان.....	۱۷
۴-۲ شیب تونل های راه آهن.....	۱۷
۵-۲ نیم رخ عرضی تونل های راه آهن.....	۱۸
۶-۲ مسیر تونل های راه آهن در پلان.....	۱۹
۳- روش های حفاری تونل.....	۲۰
۳-۱ روش چالزنی و انفجار.....	۲۰
۳-۱-۱ الگوی چالزنی.....	۲۱
۳-۱-۲ سطح آزاد.....	۲۲
۳-۱-۳ برش موازی.....	۲۳
۳-۱-۴ برش های زاویه دار.....	۲۴
۳-۱-۵ محیط مقطع تونل.....	۲۵
۳-۱-۶ انفجار کنترل شده.....	۲۵
۳-۱-۷ تعداد چال و مقدار مواد منفجره مورد نیاز.....	۲۶
۳-۲ حفاری با TBM.....	۳۰
۳-۲-۱ تاریخچه ساخت و استفاده از TBM.....	۳۰
۳-۲-۲ انواع TBM.....	۳۱
۳-۲-۲-۱ TBM های باز.....	۳۲
۳-۲-۲-۲ TBM های تک سپری.....	۳۴

۳۶	۳-۲-۲-۳ TBM های دو سپری (سپر تلسکوپی) (Telescopic Shield)
۳۸	۳-۲-۳ انواع ابزار برش و کاربرد آنها
۴۱	۴-۲-۳ عملکرد TBM
۵۰	۵-۲-۳ تخمین کارایی TBM با استفاده از Q_{TBM}
۵۴	۶-۲-۳ انتخاب نوع TBM و طراحی آن
۵۵	۷-۲-۳ مزایا و معایب TBM
۵۶	۸-۲-۳ شرکت های اصلی سازنده TBM
۵۷	۳-۳ حفاری با کله گاوی (roadheader)
۵۸	۱-۳-۳ تاریخچه دستگاه های کله گاوی
۵۸	۲-۳-۳ قدرت و وزن دستگاه های کله گاوی
۵۹	۳-۳-۳ مبانی برش دستگاه های کله گاوی طبقه بندی و مخروطی
۶۱	۴-۳-۳ ابزار برش
۶۱	۵-۳-۳ توانایی برش دستگاه کله گاوی
۶۲	۶-۳-۳ کنترل دستگاه های کله گاوی
۶۳	۷-۳-۳ کاربرد کله گاوی ها در روش NATM
۶۳	۸-۳-۳ دستگاه های کله گاوی دو بازویی (twin boom roadheader)
۶۳	۹-۳-۳ تأثیر ویژگی های حفر سنگ بر عملکرد دستگاه کله گاوی
۶۶	۱۰-۳-۳ حفر تونل با چکش های ضربه ای هیدرولیک
۶۸	۱۱-۳-۳ ملاحظات دیگر
۸۰	۴ - تهویه، آبکشی و تخلیه تونل ها
۸۰	۱-۴ تهویه تونل ها
۸۳	۱-۱-۴ مراحل انتخاب سیستم تهویه
۸۳	۲-۱-۴ محاسبه مقدار هوای لازم
۸۴	۳-۱-۴ انتخاب لوله تهویه
۸۴	۴-۱-۴ محاسبه نشست هوا
۸۴	۵-۱-۴ محاسبه افت در لوله های تهویه
۸۴	۶-۱-۴ انتخاب بادبزن
۸۵	۷-۱-۴ محاسبه توان لازم
۸۵	۸-۱-۴ لوله های تهویه
۸۶	۹-۱-۴ نصب لوله های تهویه

۸۶.....	۴-۱-۱۰ بادبزنها
۸۸.....	۴-۱-۱۱ منحنی مشخصه بادبزنها
۸۹.....	۴-۱-۱۲ استفاده از چندین بادبزین
۹۰.....	۴-۲ آبکشی تونل ها
۹۰.....	۴-۳ جابه جایی مواد و تجهیزات اجرایی
۹۱.....	۴-۳-۱ خط آهن
۹۳.....	۴-۳-۲ وسایل نقلیه چرخ لاستیکی
۹۵.....	۴-۳-۳ نوار نقاله
۹۷.....	۵- پایدار سازی تونل ها
۹۷.....	۵-۱ مقدمه
۹۷.....	۵-۲ حائل های چدنی
۹۷.....	۵-۲-۱ چدن خاکستری (Grey iron)
۹۸.....	۵-۲-۲ چدن نودولار (nodular iron)
۹۸.....	۵-۳ حائل های فولادی
۹۹.....	۵-۴ تیر مشبک (lattice girder)
۱۰۱.....	۵-۵ انواع راکبوت و میل مهار و کاربرد آنها
۱۰۳.....	۵-۵-۱ راکبوت های گیردار شده بصورت مکانیکی
۱۰۷.....	۵-۵-۲ راکبوت های گیردار شده با رزین
۱۰۹.....	۵-۵-۳ میل مهار های تزریق شده
۱۱۱.....	۵-۵-۴ میل مهار های اصطکاکی یا مجموعه شکافدار
۱۱۲.....	۵-۵-۵ میل مهار های از نوع Swellex
۱۱۴.....	۵-۶ مشخصات بار-تغییر شکل انواع راکبوت ها و میل مهار ها
۱۱۴.....	۵-۷ توری سیمی
۱۱۴.....	۵-۷-۱ توری بافته یا توری سرندي
۱۱۶.....	۵-۷-۲ توری جوش شده
۱۱۷.....	۵-۸ شاتکریت (shotcrete)
۱۱۷.....	۵-۸-۱ انواع شاتکریت
۱۱۸.....	۵-۸-۲ طرح اختلاط
۱۱۹.....	۵-۸-۳ انتخاب مصالح
۱۲۲.....	۵-۸-۴ مشخصات فنی شاتکریت
۱۲۳.....	۵-۸-۵ آماده سازی سطح و پاشیدن شاتکریت
۱۲۷.....	۵-۸-۶ شاتکریت مسلح شده با الیاف (fibre reinforced shotcrete)

- ۵-۸-۷ توصیه‌های انجام شده در مورد استفاده از شاتکریت ۱۳۰
- ۵-۹-۹ نگهداری تونل با قطعات پیش ساخته بتنی ۱۳۳
- ۵-۹-۱ کلیات و تاریخچه ۱۳۳
- ۵-۹-۲ مشخصات پوشش ۱۳۴
- ۵-۹-۳ اتصالات قطعات بتنی ۱۳۴
- ۵-۱۰-۱۰ انتخاب حائل مناسب برای شرایط مختلف زمین ۱۳۷
- ۶- استفاده از ابزاربندی برای رفتارنگاری تونل‌ها ۱۴۰
- ۶-۱-۱ تاریخچه ابزاربندی ۱۴۰
- ۶-۲-۲ هدف از ابزاربندی ۱۴۰
- ۶-۳-۳ لزوم ابزاربندی ۱۴۱
- ۶-۴-۴ تواناییهای فردی لازم در ابزاربندی ۱۴۱
- ۶-۵-۵ خطا و عدم اطمینان در اندازه گیری ۱۴۱
- ۶-۶-۶ مشخصات عمومی دستگاه های اندازه گیری ۱۴۴
- ۶-۷-۷ طراحی سیستم های ابزار دقیق ۱۴۴
- ۶-۸-۸ چند نمونه از وسایل اندازه گیری در تونل‌ها ۱۴۶
- ۶-۸-۱ نقشه برداری نوری ۱۴۶
- ۶-۸-۲ اندازه گیری همگرایی ۱۴۶
- ۶-۸-۳ انبساط سنج میله‌ای (rod extensometer) ۱۴۸
- ۶-۸-۴ پیزومتر (piezometer) ۱۴۸
- ۶-۸-۵ سلول فشار کل (total pressure cell) ۱۴۹
- ۶-۸-۶ سلول بار (load cell) ۱۵۰

۱- طبقه‌بندی زمین مسیر از نظر زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی

اکثر تونل‌ها بویژه تونل‌های راه و راه آهن عمدتاً در مناطق کوهستانی حفر شده و تونل در داخل سنگ احداث می‌شود. برای طبقه‌بندی توده سنگ روش‌های متعددی موجود است. در بعضی طبقه‌بندی‌ها فقط به منشا تشکیل سنگ توجه شده و لذا سنگ را به سه دسته آذرین، رسوبی و دگرگونی تقسیم می‌نمایند و یا بعضاً سنگ را بر اساس مقاومت تک محوری آن دسته‌بندی می‌کنند. در روش‌های کاملتر که امروزه بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند خصوصیات درزه و شکاف‌ها و شرایط آب زیرزمینی و اثر تنش‌های درجا نیز ملحوظ می‌شود. از جمله روش‌هایی که امروزه بکار گرفته می‌شوند روش ترزاقی، روش RMR، و روش Q می‌باشد. روش‌های فوق‌الذکر در بیشتر مراجع مربوط به تونل‌سازی از قبیل (Hoek & Brown, 1994)، (Hoek et al., 1995) و (Singh & Goel, 1999) توضیح داده شده‌اند. در این بخش خلاصه‌ای از روش‌های مزبور ارائه می‌شود.

۱-۱ طبقه بندی ترزاقی (Terzaghi)

در سال ۱۹۴۶، ترزاقی یک سیستم طبقه بندی برای شرایط مختلف سنگ ارائه داد که در تخمین بارهای وارده بر سیستم حائل در تونل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. ترزاقی انواع مختلف زمین‌ها را توصیف کرده و بر اساس تجربیاتی که در طراحی و نصب سیستم‌های حائل فولادی تونل‌های راه آهن در آلپ کسب نموده بود، حدود بارهای ناشی از سنگ که به حائل وارد می‌شود را برای شرایط مختلف زمین مشخص نمود. ترزاقی وضعیت انواع سنگ را بشرح زیر تعریف می‌نماید:

سنگ بکر (Intact rock): سنگی است که در آن نه درزه و نه ترک مویی وجود دارد. بنابراین، اگر چنین سنگی بشکند، شکستگی در قسمت سالم سنگ اتفاق می‌افتد. بعلت آسیب وارده به سنگ در نتیجه آتشکاری، سقوط سنگ از طاق تونل طی چندین ساعت یا چندین روز پس از آتشکاری معمول است. این حالت بعنوان شرایط پوسته پوسته شدن سنگ (spalling condition) شناخته می‌شود. سنگ بکر سخت ممکن است با وضعیت ترکیدگی (popping) نیز مواجه شود، که در چنین شرایطی قطعات سنگ خود بخود و بصورت ناگهانی از دیواره‌ها و طاق تونل جدا می‌شود.

سنگ لایه‌ای (stratified rock): مرکب از طبقات منفرد با مقاومت کم یا بدون مقاومت در امتداد جدایی و مرز بین لایه‌ها است. طبقات و لایه‌ها ممکن است با حضور درزه‌های عرضی ضعیف گردند. در چنین سنگی شرایط پوسته پوسته شدن کاملاً معمول است.

سنگ نسبتاً درزه دار (moderately jointed rock): شامل درزها و ترک های مویی است، لیکن بلوک های بین درزها بحدی با یکدیگر قفل و بست شده اند که دیواره های قائم تونل نیاز به حائل جانبی ندارد، در سنگ های از این نوع، هر دو شرایط پوسته پوسته شدن و ترکیدگی سنگ ممکن است پیش آید.

سنگ بلوکی شده و رگه دار (blocky and seamy rock): شامل قطعات و خرده های سنگ هستند که از نظر شیمیایی بکر و یا تقریباً بکر هستند و بطور کامل از یکدیگر جدا بوده و قفل و بست مناسبی با هم ندارند. در چنین سنگی، دیواره های قائم تونل ممکن است به حائل جانبی نیاز داشته باشد.

سنگ کاملاً خرد ولی بکر از نظر شیمیایی (completely crushed but chemically intact): از نظر شیمیایی دست نخورده و بکر بوده و کاملاً خرد و خصوصیت روان شدن دارند. اگر بیشتر یا تمام دانه ها به کوچکی دانه های ماسه ریزدانه بوده و سیمانته شدن دوباره اتفاق نیفتاده باشد، سنگ خرد شده در زیر سطح آب خواص ماسه اشباع را دارد.

سنگ فشارنده (squeezing rock): بطور آهسته به داخل تونل پیشروی می کند بدون اینکه افزایش حجم محسوسی داشته باشد. شرط لازم برای فشارندگی وجود درصد بالایی از کانی های میکایی میکروسکوپی و کانی های رسی با ظرفیت تورمی کم می باشد.

سنگ تورمی (swelling rock): این نوع سنگ عمدتاً بعلافت انبساط و متورم شدن به داخل تونل پیشروی می کند. خاصیت تورمی سنگ ها به نظر می رسد محدود به سنگ هایی باشد که دارای کانی های رسی از قبیل مونت موری لونایت (montmorillonite) با ظرفیت تورمی زیاد هستند.

۱-۲ طبقه بندی توده سنگ به روش RMR

این روش توسط Bieniawski در سال ۱۹۷۳ برای اولین بار معرفی شده و در طی زمان اصلاحاتی روی آن انجام گرفته است. در این روش امتیازبندی توده سنگ بر اساس پارامترهای زیر صورت می پذیرد:

- مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر (uniaxial compressive strength of intact rock)
- شاخص کیفی سنگ (RQD)
- فاصله درزها (joint spacing)

- شرایط درزه‌ها (joint condition)
- شرایط آب زیر زمینی (groundwater condition)
- امتداد درزه‌ها (joint orientation)

با جمع نمودن امتیاز ۵ پارامتر اول RMR پایه (Basic RMR) بدست می‌آید. با ملحوظ نمودن امتیاز منفی پارامتر ششم (امتداد درزه‌ها) مقدار RMR بدست می‌آید. در جدول ۱-۱ نحوه امتیازبندی پارامترهای مختلف در سیستم RMR ارائه شده است.

این روش علاوه بر طبقه بندی توده سنگ، در مورد نحوه تحکیم (پایدارسازی) تونل‌ها توسط راکبالت، شاتکریت و قاب‌های فلزی نیز پیشنهاداتی ارائه میکند. روش RMR در خصوص نحوه حفاری از نظر حفاری تمام مقطع (full face) یا حفاری بصورت دو مرحله‌ای (top heading & bench) و یا حفاری در چند مقطع (multiple drift) نیز با توجه به کلاس سنگ توصیه‌هایی را ارائه می‌نماید.

جدول ۱-۱- سیستم طبقه‌بندی RMR (Roack Mass Rating System)

الف- پارامترهای طبقه‌بندی و امتیاز آنها

محدوده مقادیر							پارامتر	
برای این محدوده مقاومت فشاری تک محوره ترجیح دارد.			۱-۲ MPa	۲-۴ MPa	۴-۱۰ MPa	>۱۰ MPa	اندیس مقاومت بار نقطه ای	مقاومت سنگ بکر
							مقاومت فشاری تک محوره	
<۱ MPa	۱-۵ MPa	۵-۲۵ MPa	۲۵-۵۰ MPa	۵۰-۱۰۰ MPa	۱۰۰-۲۵۰ MPa	>۲۵۰ MPa	۱	
۰	۱	۲	۴	۷	۱۲	۱۵	امتیاز	
< ۲۵ %			۲۵%-۵۰%	۵۰%-۷۵%	۷۵%-۹۰%	۹۰%-۱۰۰%	۲ شاخص کیفیت سنگ RQD	
۳			۸	۱۳	۱۷	۲۰	امتیاز	
< ۶۰ mm			۶۰-۲۰۰ mm	۲۰۰-۶۰۰ mm	۰.۶-۲ m	> ۲ m	۳ فاصله درزه ها	
۵			۸	۱۰	۱۵	۲۰	امتیاز	
ضخامت مواد پرکننده نرم بیش از ۵mm ، یا بازشدگی بیش از ۵mm ، درزه ها ممتد			سطوح آینه‌ای یا ضخامت کمتر از ۵mm مواد پرکننده یا تا ۵ mm بازشدگی ، درزه های ممتد	سطوح کمی زبر ، جدایی دیواره درزه ها کمتر از ۱mm ، بسیار هوازده	سطوح کمی زبر ، جدایی دیواره درزه ها کمتر از ۱mm ، کمی هوازده	سطوح خیلی زبر ، غیرممتد ، جدا نشده ، دیواره درزه ها هوا نزده	۴ شرایط درزه ها (به قسمت و مراجعه شود)	
۰			۱۰	۲۰	۲۵	۳۰	امتیاز	
> ۱۲۵			۲۵-۱۲۵	۱۰-۲۵	<۱۰	بدون آب	جریان آب در هر ۱۰ متر طول تونل (l/min)	آب زیر زمینی
>۰.۵			۰.۲-۰.۵	۰.۱-۰.۲	<۰.۱	0	نسبت فشار آب در درز به تنش اصلی بزرگتر	
آب جاری است.			آب قطره قطره می‌ریزد.	خیس	نم	کاملا خشک	شرایط عمومی	
۰			۴	۷	۱۰	۱۵	امتیاز	

ادامه جدول ۱-۱- سیستم طبقه بندی RMR

ب- تعدیل امتیاز برای جهت درزه ها

راستا و جهت میل درزه ها	خیلی مساعد	مساعد	متوسط	نامساعد	خیلی نامساعد
تول ها	۰	-۲	-۵	-۱۰	-۱۲
پی ها	۰	-۲	-۷	-۱۵	-۲۵
شیروانی ها	۰	-۵	-۲۵	-۵۰	

ج- رده (class) توده سنگ که بر اساس امتیاز کل تعیین می شود

امتیاز	۱۰۰-۸۱	۸۰-۶۱	۶۰-۴۱	۴۰-۲۱	< ۲۰
شماره رده	I	II	III	IV	V
شرح و توصیف	سنگ خیلی خوب	سنگ خوب	سنگ متوسط	سنگ ضعیف	سنگ خیلی ضعیف

د- اطلاعات مربوط به هر رده

شماره رده	I	II	III	IV	V
متوسط زمان خود پایداری	۲۰ سال برای دهانه ۱۵ متری	یک سال برای دهانه ۱۰ متری	یک هفته برای دهانه ۵ متری	۱۰ ساعت برای دهانه ۲.۵ متری	۳۰ دقیقه برای دهانه ۱ متری
چسبندگی توده سنگ (kPa)	> ۴۰۰	۳۰۰-۴۰۰	۲۰۰-۳۰۰	۱۰۰-۲۰۰	< ۱۰۰
زاویه اصطکاک توده سنگ (درجه)	> ۴۵	۳۵-۴۵	۲۵-۳۵	۱۵-۲۵	< ۱۵

ادامه جدول ۱-۱ سیستم طبقه‌بندی RMR

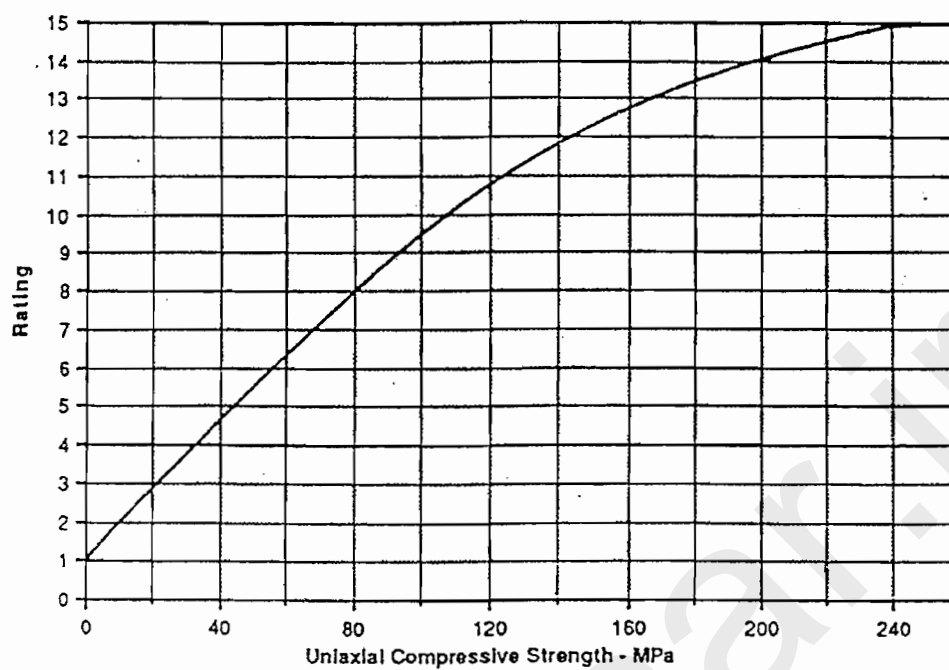
و- راهنمای طبقه‌بندی وضعیت درزه‌ها

طول ناپیوستگی‌ها امتیاز	< 1 m ۶	۱-۳ متر ۴	۳-۱۰ متر ۲	۱۰-۲۰ متر ۱	> ۲۰ m ۰
جدا شدگی امتیاز	بدون جداشدگی ۶	< ۰.۱ mm ۵	۰.۱-۱ ۴	۱-۵ ۱	> ۵ mm ۰
زبری امتیاز	خیلی زبر ۶	زبر ۵	کمی زبر ۳	صاف ۱	آینه‌ای ۰
مواد پر کننده امتیاز	بدون مواد پرکننده ۶	< ۵ mm مواد سخت ۴	> ۵ mm مواد سخت ۲	< ۵ mm مواد نرم ۲	> ۵ mm مواد نرم ۰
هوا زدگی امتیاز	بدون هوازدگی ۶	کمی هوازده ۵	هوازدگی متوسط ۳	هوازدگی شدید ۱	متلاشی شده ۰

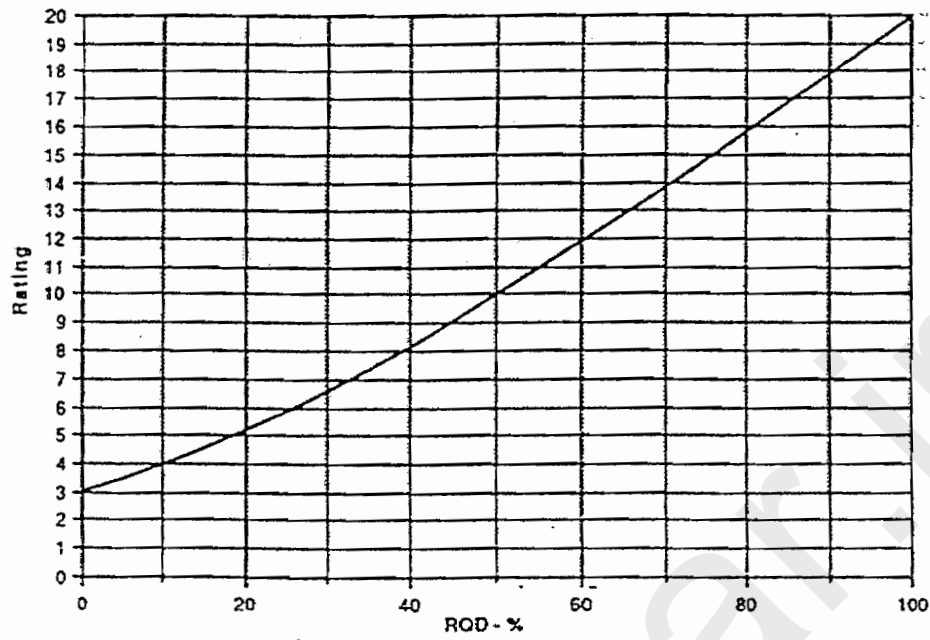
ی- اثر راستا و شیب درزه‌ها در تونل‌سازی

راستا عمود بر محور تونل		راستا موازی محور تونل	
شیب هم جهت با پیشروی ۹۰-۴۵ درجه	شیب هم جهت با پیشروی ۴۵-۲۰ درجه	شیب ۹۰-۴۵	شیب ۴۵-۲۰
خیلی مساعد	مساعد	بسیار مساعد	متوسط
شیب خلاف جهت با پیشروی ۹۰-۴۵ درجه	شیب خلاف جهت با پیشروی ۴۵-۲۰ درجه	شیب ۰-۲۰ بدون توجه به راستا	شیب ۰-۲۰ بدون توجه به راستا
متوسط	نا مساعد	متوسط	متوسط

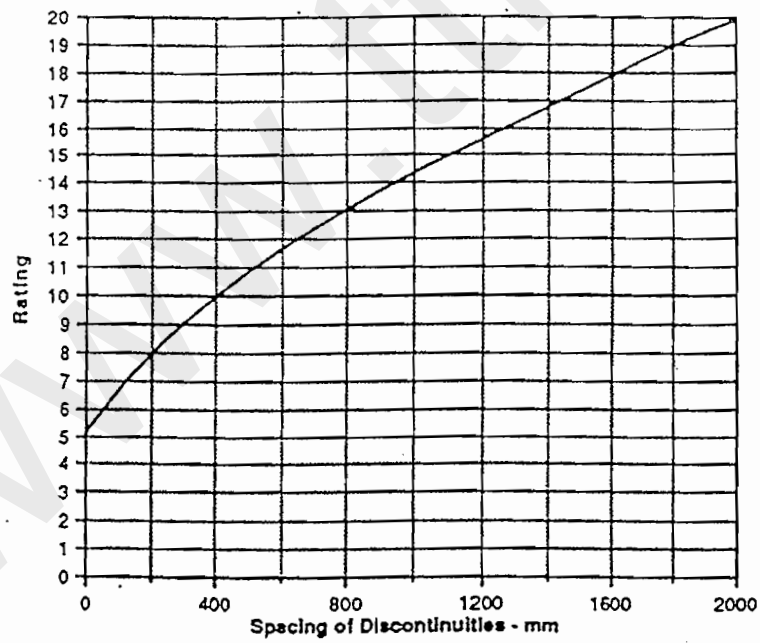
بدلیل ابهاماتی که در مورد استفاده از جدول ۱-۱ برای تعیین امتیاز مربوط به مقاومت فشاری، میزان RQD و فاصله درزه‌ها وجود داشت منحنی‌های شکل‌های ۱-۱ الی ۳-۱ برای دادن امتیاز به این پارامترها ارائه گردید.



شکل ۱-۱ - امتیاز مقاومت فشاری تک محوره



شکل ۱-۲- امتیاز شاخص کیفیت سنگ



شکل ۱-۳- امتیاز فاصله درزه‌ها

۳-۱ طبقه بندی توده سنگ به روش Q

بر اساس ارزیابی پایداری تعداد زیادی سازه های زیرزمینی که قبلا حفاری و اجرا شده بودند Barton و همکارانش از انستیتو ژئوتکنیک نروژ در سال ۱۹۷۴ شاخصی را برای تعیین کیفیت توده سنگی که تونل در آن حفر می شود ارائه نمودند. این شاخص بصورت زیر تعریف می شود:

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

که در آن :

RQD = شاخص کیفی سنگ

J_n = عدد دسته درزه (joint set number)

J_r = عدد زبری درزه (joint roughness number)

J_a = عدد دگرسانی درزه (joint alteration number)

J_w = ضریب کاهش آب درزه (joint water reduction factor)

SRF = ضریب کاهش تنش (stress reduction factor)

در جدول ۲-۱ نحوه امتیاز بندی پارامترهای فوق آورده شده است. Barton و همکارانش برای اینکه شاخص Q را به مقدار حائل مورد نیاز تونل مرتبط سازند. پارامتر دیگری که آنرا بعد معادل (equivalent dimension) حفاری (De) نامیدند تعریف کردند این بعد با تقسیم دهنه حفاری و یا ارتفاع حفاری به مقداری که نسبت نگهداری حفاری (Excavation Support Ratio) یا ESR نام دارد بدست می آید.

ESR تقریبا مشابه عکس ضریب اطمینان می باشد. با داشتن مقدار Q و De با استفاده از منحنی یا جداول ارائه شده توسط Barton و همکارانش می توان عدم نیاز و یا نیاز به نگهداری و میزان آنرا برای پایداری سازی تونل بدست آورد.

اخیرا روش Q برای استفاده در مورد کارایی TBM در شرایط مختلف سنگ مورد اصلاح قرار گرفته که به Q_{TBM} موسوم شده است. جزئیات این روش در قسمت TBM آورده شده است.

جدول ۱-۲- امتیاز بندی پارامترها در سیستم Q

شرح	مقدار	ملاحظات
۱- شاخص کیفی سنگ	RQD	۱- وقتی که مقدار RQD بین ۱۰-۰ باشد
A. خیلی ضعیف	۰-۲۵	برای ارزیابی Q مقدار RQD برابر با ۱۰ فرض می شود.
B. ضعیف	۲۵-۵۰	
C. مناسب	۵۰-۷۵	۲- مقادیر RQD با فواصل ۵ یعنی
D. خوب	۷۵-۹۰	۱۰۰، ۹۵، ۹۰ و غیره به اندازه کافی دقیق هستند.
E. خیلی خوب	۹۰-۱۰۰	
۲- عدد دسته درزه	J_n	
A. توده‌ای (massive)، بدون درزه یا درزه کم	۰/۵-۱	
B. یک دسته درزه	۲	
C. یک دسته درزه به اضافه درزه‌های اتفاقی	۳	۱- برای تقاطع دو تونل J_n را در ۳ ضرب کنید: ($J_n \times 3$)
D. دو دسته درزه	۴	
E. دو دسته درزه به اضافه درزه‌های اتفاقی	۶	۲- برای ورودی تونل J_n را در ۲ ضرب کنید: ($J_n \times 2$)
F. سه دسته درزه	۹	
G. سه دسته درزه به اضافه درزه‌های اتفاقی	۱۲	
H. چهار دسته درزه و درزه‌های اتفاقی، شدیداً درزه‌دار، مانند حبه‌قند، و غیره	۱۵	
I. سنگ خردشده، خاک مانند	۲۰	
۳- عدد زبری درزه	J_r	
a. دیواره درزه‌ها در تماس با یکدیگر و	.	
b. دیواره درزه‌ها در تماس با یکدیگر قبل از ۱۰ cm برش	.	
A. درزه‌های غیر ممتد	۴	۱- چنانچه فاصله بندی متوسط دسته درزه‌ها بزرگتر از ۳ متر باشد مقدار ۱ را به J_r اضافه کنید.
B. زبر و نامنظم، موجدار	۳	
C. صاف، موجدار	۲	
D. آینه ای، موجدار	۱/۵	۲- $J_r = 0/5$ را می توان برای درزه‌های مسطح و آینه ای که دارای لایه بندی باشند استفاده کرد به شرطی که لایه ها در جهتی قرار گرفته باشند که مقاومت حداقل باشد.
E. زبر یا نامنظم، مسطح	۱/۵	
F. صاف، مسطح	۱	
G. آینه ای، مسطح	۰/۵	
c. دیواره درزه‌ها وقتی برش اتفاق می افتد در تماس با هم قرار نمی گیرند.		
H. مناطق حاوی کانی‌های رسی با ضخامت کافی که از تماس دیواره ها جلوگیری کند.	۱	
I. بخش ماسه ای، شنی یا سنگ خردشده با ضخامت کافی که از تماس دیواره ها جلوگیری کند.	۱	

ادامه جدول ۱-۲- امتیاز بندی پارامترها در سیستم Q

شرح	مقدار	ملاحظات
۴- عدد دگرسانی درزه	J_d	Φ_r (درجه)
a. دیواره درزه‌ها در تماس با هم هستند	..	
A. شدیداً جوش خورده، سخت، نرم نشونده، مواد پرکننده غیر قابل نفوذ	۷۵٪	
B. دیواره های درزه دگرگون نشده سطوح درزه‌ها فقط زنگ زده است.	۱۰٪	(۲۵-۳۵)
C. دیواره درزه‌ها کمی دگرگون شده است. مواد پوششی درزه‌ها از کانی‌های نرم نشونده، ذرات ماسه ای، سنگ متلاشی شده عاری از مواد رسی و غیره	۲۰٪	(۲۵-۳۵)
D. مواد پوشش درزه‌ها از لای، یا رس ماسه‌ای، بخشهای کوچک رسی (نرم نشونده)	۳۰٪	(۲۰-۲۵)
E. مواد پوششی درزه‌ها از مواد رسی نرم یا با اصطکاک کم، یعنی کائولینیت، میکا همچنین کلریت، تالک، گچ و گرافیت و غیره و مقادیر کم رس‌های توری (پوشش ناپیوسته با ضخامت ۱-۲mm و یا کمتر است).	۴	(۸-۱۶)
b. دیواره درزه‌ها تا قبل از ۱۰ mm برش در تماس با هم قرار می‌گیرند.		
F. ذرات ماسه‌ای، سنگ متلاشی شده عاری از مواد رسی و غیره	۴۰٪	(۲۵-۳۰)
G. شدیداً پیش تحکیم شده، مواد پرکننده رسی نرم نشونده، (ممتد، ضخامت $< 5\text{ mm}$)	۶۰٪	(۱۶-۲۴)
H. پیش تحکیم شده متوسط یا کم، مواد پرکننده رسی نرم نشونده، (ممتد ضخامت $< 5\text{ mm}$)	۸	(۱۲-۱۶)
J. مواد پرکننده متورم شونده مانند مونت موری لونیت، (ممتد ضخامت $< 5\text{ mm}$) مقدار J بستگی به درصد اندازه ذرات رس و میزان دسترسی به آب دارد)	۸/۰-۱۲/۰	(۶-۱۲)
c. دیواره درزه‌ها پس از برش در تماس باهم قرار نمی‌گیرند.		
K. نواحی یا نوارهای متلاشی‌شده یا خرد شده	۶۰٪	(۶-۲۴)
L. و رس (برای شرایط رس به بندهای J, H, G)	۸/۰	
M. مراجعه شود.)	۸/۰-۱۲/۰	
N. نواحی یا نوارهای از جنس لای یا رس لای دار، مقدار کم رس، نرم نشونده	۵/۰	
O. نواحی یا نوارهای ضخیم و ممتد رس	۱۰/۰-۱۳/۰	(۶-۲۴)
P و R (برای شرایط رس به J, H, G مراجعه شود)	۱۳/۰-۲۰/۰	

ادامه جدول ۱-۲- امتیاز بندی پارامترها در سیستم Q

شرح	مقدار	ملاحظات
۵- ضریب کاهش آب درزه	J_w	(فشار تقریبی آب kgf/cm^2)
A. حفاری خشک با جریان آب جزئی یعنی $< 5 \text{ lit/min}$ بصورت موضعی	۱/۰	$< 1/0$
B. آب با مقدار یا فشار متوسط، بعضاً آب شستگی مواد پرکننده درزه‌ها	۰/۶۶	۱/۰-۲/۵
C. جریان آب زیاد با فشار بالا در سنگ خوب با درزه‌های پر نشده	۰/۵	۲/۵-۱۰/۰
D. جریان آب زیاد یا فشار بالا، آب شستگی مواد پرکننده بطور قابل ملاحظه	۰/۳۳	۲/۵-۱۰/۰
E. جریان فوق العاده زیاد آب با فشار در لحظه آشکاری، کاهش آب در طول زمان	۰/۲-۰/۱	$> 1/0$
F. جریان فوق العاده زیاد آب با فشار بطور مداوم و بدون کاهش در طول زمان	۰/۱-۰/۰۵	$> 1/0$
۶- ضریب کاهش تنش	SRF	
a. مناطق ضعیفی تونل را قطع می کند که ممکن است موجب سستی توده سنگ هنگام حفاری تونل شود.	۱۰	۱- این مقادیر SRF را چنانچه مناطق برشی تونل را قطع نمیکند بلکه فقط تحت تاثیر قرار می دهد به میزان ۵۰-۲۵٪ کاهش دهید
A. وقوع متعدد مناطق ضعیف که حاوی رس یا سنگ خرد شده و تجزیه شده است، سنگ خیلی سست در اطراف تونل (در هر عمق)	۵/۰	۲- برای تنش در جای شدیداً غیرایزوتروپ (اگر اندازه گیری شده است):
B. مناطق ضعیف منفرد حاوی رس، یا سنگ تجزیه شده و هوازده ($< 50 \text{m}$ عمق حفاری)	۲/۵	اگر $\frac{\sigma_1}{\sigma_3} < 10$ ، مقدار σ_c را به $0.8 \sigma_c$ و σ_t را به $0.8 \sigma_t$ کاهش دهید.
C. مناطق ضعیف منفرد حاوی رس، یا سنگ تجزیه شده و هوازده ($> 50 \text{m}$ عمق حفاری)	۷/۵	وقتی $\frac{\sigma_1}{\sigma_3} > 10$ ، مقدار σ_c و σ_t را به σ_c
D. مناطق برشی متعدد در سنگ سالم و خوب (بدون رس)، سنگ سست در اطراف تونل (هر عمقی)	۵/۰	$0.6 \sigma_t$ و $0.6 \sigma_c$ کاهش دهید σ_c مقاومت فشاری تک محوری و σ_t مقاومت کششی
E. مناطق برشی منفرد در سنگ سالم و خوب (عاری از رس)، ($< 50 \text{m}$ عمق حفاری)	۲/۵	است (بار نقطه ای). σ_1 و σ_3 تنش های اصلی بزرگتر و کوچکتر هستند.
F. مناطق برشی مجرد در سنگ سالم و خوب (عاری از رس)، ($> 50 \text{m}$ عمق حفاری)	۵	
G. درزه های باز سست، شدیداً درزه دار یا حبه قند مانند (هر عمقی)		

ادامه جدول ۱-۲- امتیاز بندی پارامترها در سیستم Q

شرح	مقدار	ملاحظات
b. سنگ سالم و خوب، مسائل تنش در سنگ H. تنش کم نزدیک سطح زمین	۲/۵	۳- 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 (H را ببینید).
σ_1 / σ_3 σ_c / σ_1 > ۱۳ > ۲۰۰		
J. تنش متوسط	۱	
K. تنش زیاد، ساختار خیلی محکم (tight) (معمولا از نظر پایداری مساعد است ممکن است برای پایداری دیواره ها نامساعد باشد).	۰/۵-۲	
L. انفجار ملایم سنگ rock-burst (سنگ توده ای)	۵-۱۰	
M. انفجار شدید سنگ (سنگ توپر) < ۲/۵	۱۰-۲۰	
c. سنگ فشارنده، جریان پلاستیک سنگ غیر بکر، تحت تاثیر فشار زیاد سنگ		
N. فشار سنگ ملایم ناشی از فشارش	۵-۱۰	
O. فشار سنگ شدید ناشی از فشارش	۱۰-۲۰	
d. سنگ تورمی، تورم بعثت فعل / انفعالات شیمیایی ناشی از حضور آب	۵-۱۰	
P. فشار سنگ ملایم ناشی از تورم	۱۰-۱۵	
R. فشار سنگ شدید ناشی از تورم		

۲- مشخصات هندسی تونل‌های راه و راه‌آهن

مشخصات هندسی تونل‌ها شامل شکل و اندازه مقطع، و شیب تونل می‌باشد. مقطع تونل‌ها می‌تواند بصورت طاقی، نعل‌اسبی، مستطیلی و یا دایره‌ای باشد. البته در صورت حفاری مقطع بصورت دایره‌ای، شکل مقطع نهایی را با استفاده از دالهای بتنی بصورتی اصلاح می‌نمایند که کف تونل بصورت مسطح و قابل استفاده بعنوان راه و راه‌آهن باشد. تونل‌های راه و راه‌آهن ممکن است بصورت دو طرفه و یا یک طرفه عمل نمایند. تونل‌های راه بصورت دوطبقه نیز اجرا می‌شوند.

در مورد مشخصات هندسی تونل‌های راه و راه‌آهن کشورهای مختلف آیین‌نامه‌های گوناگونی دارند ولی این مشخصات تفاوت قابل ملاحظه‌ای که بتواند در انتخاب روش حفاری تاثیر بگذارد ندارد. در ایران آیین‌نامه وزارت راه مشخصاتی را برای تونل‌های راه تعیین کرده‌است که خلاصه‌ای از آن ذیلا ذکر می‌شود:

۲-۱ شیب تونل‌های راه

طبق آیین‌نامه طرح هندسی راه‌ها شیب تونل‌های با طول بیشتر از ۵۰۰ متر نباید از ۲ در صد تجاوز نماید. مقدار توصیه شده برابر ۱.۵ در صد می‌باشد. حداکثر شیب در تونل‌های کوتاه تر از ۵۰۰ متر بهتر است از ۴ درصد تجاوز نکند.

دلایل انتخاب شیب کم در تونل‌ها:

۱- ممانعت از کاهش سرعت وسایل نقلیه سنگین برای جلوگیری از تراکم ترافیک در داخل تونل.

۲- تاثیر سربالایی‌های واقع در ارتفاعات در تعداد وسائط نقلیه ای که دچار خرابی می‌شوند.

۳- تاثیر سربالایی‌ها در افزایش مقدار الودگی هوا

۴- تاثیر سرپایینی‌ها در افزایش سرعت وسایل نقلیه

به توصیه AASHTO شیب تونل‌های راه با ترافیک سنگین در سربالایی‌ها بخاطر مسائل تهویه ترجیحا نباید از ۳.۵ درصد تجاوز کند. برای تونل‌های دوخطه دوطرفه حداکثر شیب مطلوب برای جلوگیری از کاهش سرعت کامیون‌ها ۳ در صد می‌باشد. برای ترافیک در جهت سرپایینی شیب ۴ درصد یا بیشتر هم مجاز است. برای حجم ترافیک سبکتر شیب‌های ۵ درصد و حتی ۶ درصد هم مورد استفاده واقع شده‌است.

۲-۲ نیم رخ عرضی تونل های راه

با توجه به اینکه توسعه تونل در مقایسه با راه های واقع در هوای آزاد بسیار مشکل و نزدیک به غیرممکن است بهتر است سه نکته اساسی زیر را از قبل مد نظر قرار داد (آیین نامه طرح هندسی راهها) :

۱- پیش بینی فضای لازم جهت تامین نیاز ترافیک آینده. (لااقل ۲۰ سال پس از افتتاح تونل).
این بدین معنی است که تونل باید طوری طراحی شود که جوابگوی ترافیک ۲۰ سال آینده باشد و بدیهی است که در آینده و با زیاد شدن ترافیک می توان ضمن استفاده از تونل موجود، تونل دیگری نیز احداث نمود.

۲- در راه های با بیش از ۳ خط عبور احداث دو تونل مجزا با مجرای کوچک به جای یک تونل با مجرای بزرگ دارای امتیازات زیر است:

الف) با ساختن یک تونل در ابتدا می توان از آن به صورت ۲ طرفه استفاده کرد.

ب) با ساختن تونل دوم از هر تونل می توان در یک جهت استفاده کرد.

پ) در آینده دور می توان تونل سوم را ساخت و از یکی از تونل ها برای یک جهت و از تونل دیگر برای جهت مخالف ولی از تونل سوم (که معمولاً تونل وسط خواهد بود) برای جهت متراکم استفاده کرد به این ترتیب جهت عبور از تونل وسط بسته به جهت تراکم ترافیک در ساعت های مختلف اوج روز تغییر میکند.

۳- پیش بینی فضای مناسب برای روشنایی و تهویه تونل ها.

که علاوه بر در نظر گرفتن مزایای ذکر شده برای دو تونل با مجرای کوچک بجای یک تونل با مجرای بزرگ، باید هزینه های احداث آنها نیز باهم مقایسه شده و سپس گزینه مناسب انتخاب شود.

عرض معمولی خط های اصلی در داخل تونل برابر با عرض خط های مسیر راه است. شانه های تونل مانند راه در طرفین خط های اصلی قرار می گیرد و بدون وجود اختلاف سطحی به آن متصل می گردد. این شانه ها فاقد هر گونه مانعی است و برای جلوگیری از اثر دیوار کناری روی خط عبور در نظر گرفته شده است. در ضمن از شانه سمت راست برای توقف اضطراری نیز استفاده می گردد. عرض این شانه ها در جدول ۲-۱ آمده است.

معمولاً ورود عابران پیاده به داخل تونل های برون شهری مجاز نیست و پیاده رو ها فقط برای استفاده مأموران بهره برداری و کسانی که وسایل نقلیه آنها دچار خرابی شده است احداث می شود. این پیاده رو ها باید دارای شرایط زیر باشند:

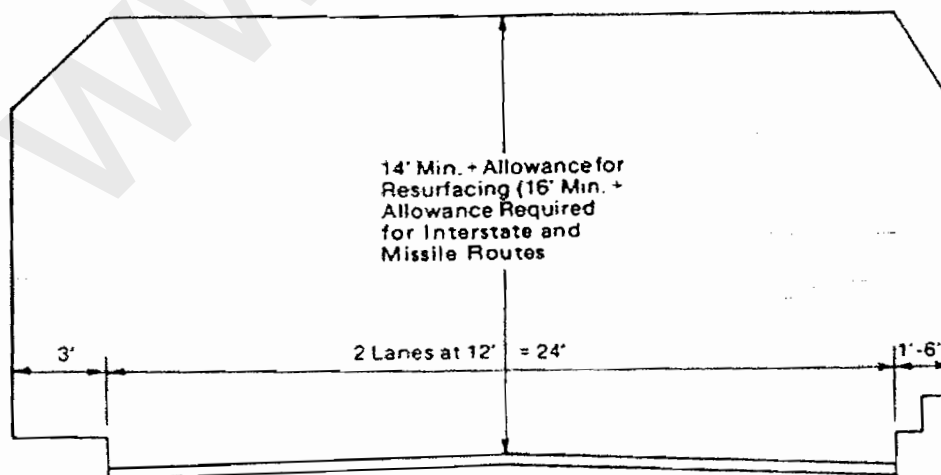
- ۱- در تونل با مقطع منحنی حداقل عرض پیاده رو ۶۰ سانتی متر باشد.
- ۲- در تونل با دیواره قائم حداقل عرض پیاده رو ۷۵ سانتی متر باشد.
- ۳- حداقل ارتفاع پیاده رو از لبه راه ۲۰ سانتی متر و حداکثر آن ۴۰ سانتی متر باشد.

جدول ۱-۲- عرض شانه راه در تونل‌ها (آیین‌نامه طرح هندسی راهها)

نوع راه	نوع تونل	سرعت طرح (km/hr)	شانه سمت راست (m)	شانه سمت چپ (m)	ملاحظات
آزادراه یا بزرگراه	تونل یک طرفه با طول کمتر از ۱۰۰۰ متر	۸۰	۱/۸۵	۰/۵	-
	تونل یک طرفه با طول بیش از ۱۰۰۰ متر	۸۰	۱/۸۵	۰/۵	هر ۵۰۰ متر یک پارکینگ
اصلی	تونل دو طرفه با طول کمتر از ۱۰۰۰ متر	۶۰	۱	۱	-
	تونل دو طرفه با طول بیش از ۱۰۰۰ متر	۶۰	۱	۱	هر ۵۰۰ متر یک پارکینگ

حداقل ارتفاع آزاد تونل از سطح سواره رو تا تاسیسات تونل مانند روشنایی و سیستم های تهویه ۵.۲ متر می باشد. (۵.۱ متر مجاز + ۱۰ سانتی متر روکش آسفالت آتی)
شیب عرضی سطح راه در تونل ها ۱ الی ۱.۵ درصد می باشد.

در شکل ۱-۲ حداقل ابعاد لازم (clearance) برای تونلهای راه مطابق با استاندارد AASHTO داده شده است.



شکل ۱-۲- حداقل ابعاد لازم برای تونل‌های اصلی دوخطه طبق AASHTO

۳-۲ مسیر تونل‌های راه در پلان

در تعیین فاصله دید توقف به منظور طراحی مسیر تونل ها چند نکته زیر مد نظر قرار می گیرد (آیین‌نامه طرح هندسی راهها):

۱- دود وسایل نقلیه که باعث کاهش دید می‌گردد.

۲- چرب تر بودن سطح راه که باعث کاهش قدرت ترمز می‌گردد.

۳- شعاع های خیلی کم، مسایل ساختمانی و اجرایی دشواری را از نظر هدایت دستگاه های حفاری یا انطباق قالبهای طاقی شکل مطرح می سازد. به این دلیل پیش بینی شعاع های بالاتر از ۵۰۰ متر الزامی است.

طبق آیین‌نامه طرح هندسی راهها، حداقل فاصله دید توقف در تونل های واقع در آزادراه ها یا بزرگراه ها ۱۲۰ متر و در راه های اصلی ۸۰ متر می‌باشد.

بطور کلی، در طراحی مسیر تونل‌های راه، در صورت استفاده از پیچ، شعاع پیچ باید طوری انتخاب شود که فاصله دید توقف برآورده شود. لازم بذکر است که تامین فاصله دید سبقت در تونلها الزامی نیست. به توصیه AASHTO فاصله دید توقف بسته به سرعت طرح از جدول ۲-۲ انتخاب می‌شود:

جدول ۲-۲- فواصل دید توقف طبق AASHTO

فاصله دید توقف (m)	سرعت طرح (km/hr)
۶۱	۵۰
۸۴	۶۵
۱۲۲	۸۰
۱۶۰	۹۵
۱۹۱	۱۱۰

۴-۲ شیب تونل‌های راه آهن

در صورت امکان شیب تونل‌های مستقیم (بدون پیچ) راه آهن نباید از ۷۵ درصد شیب حداکثر در خارج تونل زیادتیر در نظر گرفته شود. این شیب باید حدود ۹۰۰ متر قبل از تونل و ۳۰۰ متر بعد از آن نیز حفظ شود. شیب تونل‌های دارای پیچ باید همانند شیب خطوط خارج از تونل در قسمت‌های پیچ‌دار مورد تعدیل قرار گیرد.

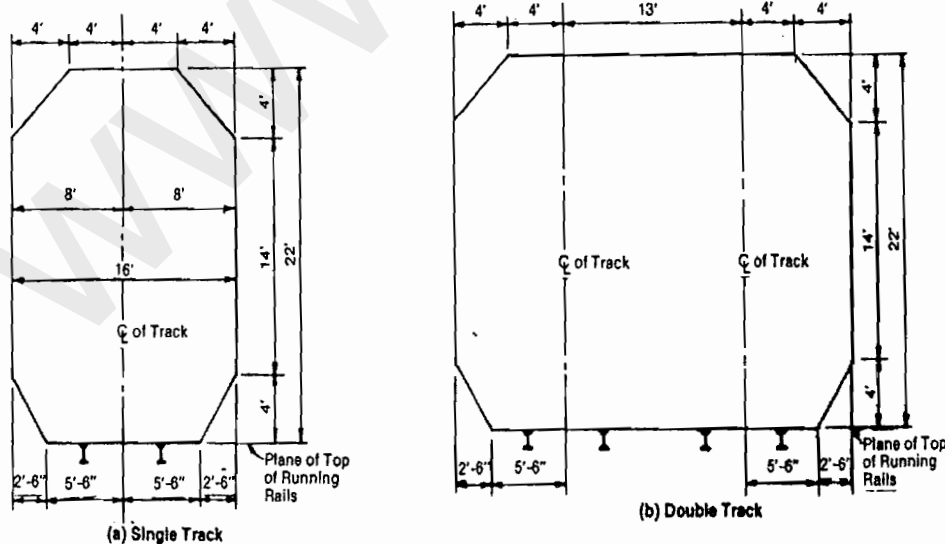
۵-۲ نیم رخ عرضی تونل های راه آهن

در جدول ۲-۳، ابعاد تیپ (typical dimensions) تونل های راه آهن در چند کشور داده شده است

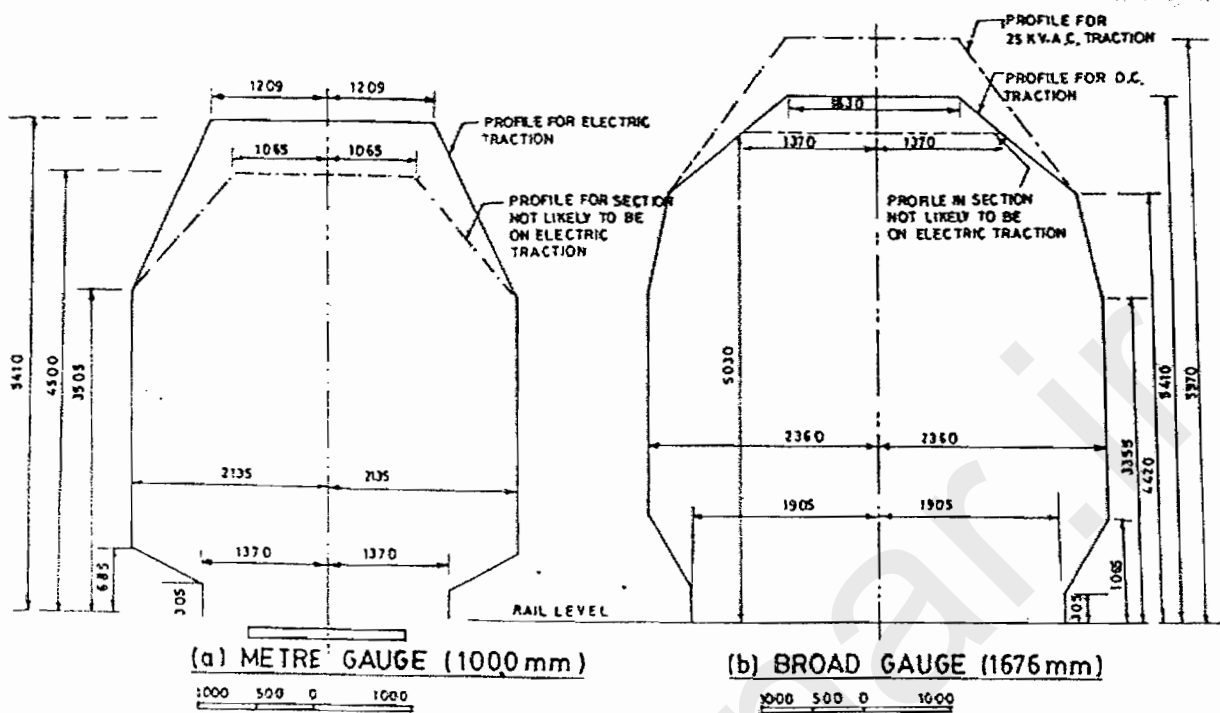
جدول ۲-۳- ابعاد تونل های راه آهن در چند کشور

ارتفاع طاق تونل تا بالای ریل (m)	عرض تونل (m)	نام کشور	
۶.۰۰	۸.۰۰	ایتالیا	تونل های دو خطه (double track)
۵.۸۰	۸.۰۰	فرانسه	
۶.۲۰	۸.۲۰	آلمان	
۶.۴۰	۸.۲	استرالیا	
۵.۰۰	۴.۶۰	ایتالیا	تونل های تک خطه (single track)
۵.۰۰	۵.۵۰	استرالیا	
۵.۸۰	۵.۲۰	سوئیس	
۶.۰۰	۴.۷۲	هند	

در اشکال ۲-۲ و ۳-۲ نیز چند نمونه از حداقل ابعاد لازم (clearance). برای تونل های راه آهن نشان داده شده است.



شکل ۲-۲- حداقل ابعاد لازم (clearance) برای تونل های راه آهن تک خطه و دو خطه طبق توصیه انجمن مهندسين راه آهن آمريكا



شکل ۲-۳- حداقل ابعاد لازم (clearance) برای تونل‌های راه‌آهن در هند

۲-۶ مسیر تونل‌های راه‌آهن در پلان

مسیر تونل‌های راه‌آهن حتی‌الامکان باید مستقیم در نظر گرفته شود. البته تونل‌های دارای پیچ هم در بسیاری موارد بویژه در مناطق کوهستانی مورد استفاده واقع شده‌اند. پیچ تونل‌های راه‌آهن غالباً دارای قوس اتصال تدریجی حلزونی (spiral) در دو انتهای پیچ می‌باشند.

۳- روش های حفاری تونل

به طور کلی می توان اجرای یک تونل را به مراحل زیر تقسیم کرد:

- حفاری
- پایدارسازی اولیه
- پایدارسازی نهایی
- خدمات جنبی مانند تهویه، آبکشی و روشنایی

روش های حفاری تونل را می توان به صورت کلی در دو دسته قرار داد:

- روش چالزنی و انفجار (Drilling & Blasting)
- روش های مکانیزه (Mechanical Excavation)

روش های حفاری مکانیزه عمدتاً شامل موارد زیر است:

- حفاری تمام مقطع توسط دستگاه TBM
- حفاری موضعی توسط کله گاوی (roadheader)

در بعضی موارد از انواع چکش های هیدرولیکی قوی (rammer) نیز می توان برای حفاری تونل ها در بعضی شرایط استفاده کرد.

۳-۱ روش چالزنی و انفجار

این روش شامل مراحل زیر است :

- چالزنی
- خرگگذاری
- انفجار
- تخلیه دود
- لق گیری
- تخلیه مواد حفاری شده
- پایدارسازی (از قبیل نصب راکبوت، تور سیمی، شاتکریت) در صورت لزوم
- کارهای متفرقه دیگر مانند اضافه نمودن طول لوله های آب، داکت های تهویه، سیم برق

دو مسأله مهم که در حین انفجار باید به آن توجه شود این است که اولاً حفاری به اندازه مورد نیاز باشد چون اگر بیش از مقطع مورد نیاز حفاری صورت گیرد هم هزینه خارج کردن سنگها زیاد می شود و هم

بعداً فضای خالی را باید با بتن پر کرد. ثانیاً باید توجه کرد توده سنگ در حین انفجار آسیب نبیند تا فشار اضافی بر پوشش تونل وارد نکند.

در ۲۵ سال اخیر تکنیکهای چالزنی پیشرفت زیادی کرده است و استفاده از جامبوه‌های الکتروهیدرولیکی کارایی چالزنی را بالا برده است. افزایش کارایی تنها به معنی افزایش سرعت چالزنی نیست بلکه کیفیت چالزنی هم بهبود یافته است. منظور از کیفیت، محل دقیق، صاف بودن، طول چالها و همچنین کنترل پارامترهای چالزنی مثل فشار تماسی و گشتاور وارده است. با استفاده از کامپیوتر می‌توان کلیه فعالیت‌های انجام شده را کنترل و ثبت و کیفیت چالزنی را بالا برد. خرجگذاری در چالها می‌تواند با سرعت زیاد انجام شود. این کار توسط خرجهای با لوله پلاستیکی و یا تجهیزات خرجگذاری مکانیکی صورت می‌گیرد. در مورد اخیر مقدار خرج قرار داده شده در واحد طول چال را می‌توان به دقت تنظیم کرد. پیشرفت در زمینه مواد منفجره به استفاده از انواع ایمن تر منجر شده است. امولسیون‌های منفجره جدید حداقل مقدار گازهای سمی و دود را ایجاد می‌کنند.

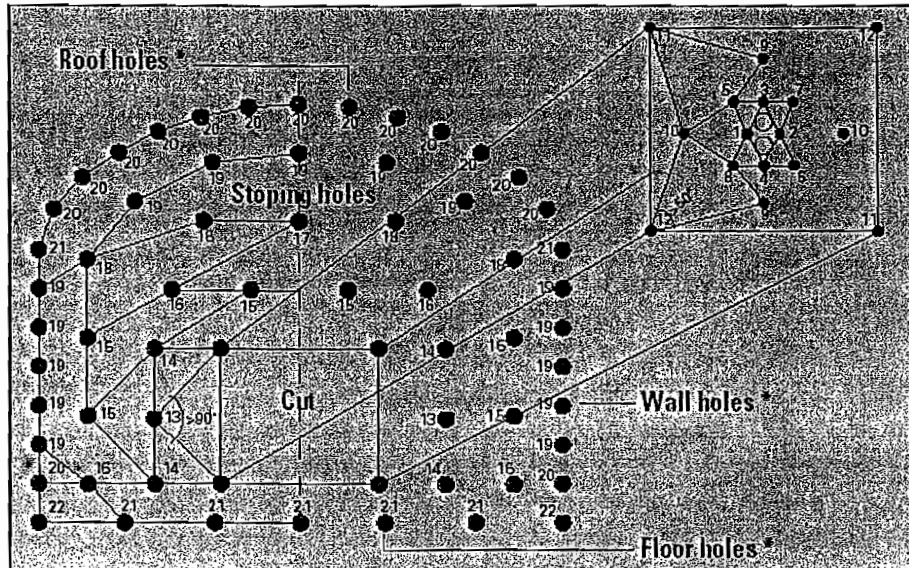
سرعت پیشروی در حفاری به روش چالزنی و انفجار در پروژه‌هایی که بخوبی مدیریت می‌شوند تا ۷۰ متر در هفته نیز امکان‌پذیر می‌باشد ولی به علت بالا بودن تعداد نیروی انسانی و نتیجتاً بالا بودن هزینه‌ها در این روش و نیز آسیب‌هایی که این روش حفاری به سنگ اطراف تونل وارد می‌کند و همچنین با در نظر گرفتن مسائل زیست‌محیطی، در بسیاری موارد استفاده از روش‌های حفاری مکانیزه بر روش چالزنی و انفجار ارجحیت دارد.

۳-۱-۱ الگوی چالزنی

الگوی چالزنی باید به گونه ای طراحی شود که هر چال فضای آزاد برای شکستن داشته باشد. انتخاب الگوی چالزنی بستگی به عوامل زیر دارد :

- ابعاد تونل
- هندسه تونل
- قطر چالها
- کیفیت نهایی مورد نظر برای مقطع حفاری شده
- شرایط زمین‌شناسی
- نوع مواد منفجره و چاشنی‌های در دسترس برای استفاده
- نوع تجهیزات مورد استفاده برای چالزنی
- محدودیت ارتعاشات ناشی از انفجار

شکل ۳-۱ یک الگوی چالزنی را نشان می‌دهد. باید تاخیر کافی بین انفجار خرج چالهای مختلف ایجاد شود.

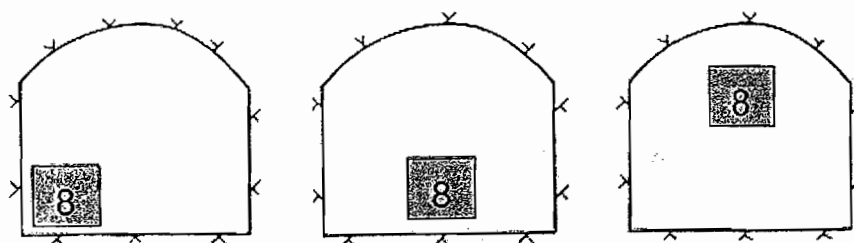


شکل ۳-۱- یک نمونه الگوی چالزنی و ترتیب انفجار چالها

۳-۱-۲ سطح آزاد

تفاوت بین انفجار شیروانی ها و انفجار تونل این است که در انفجار شیروانیها دو سطح آزاد وجود دارد در حالیکه در انفجار تونل تنها یک سطح آزاد موجود است و سطح آزاد دوم را باید به طریقی ایجاد کرد تا از طریق آن سنگ بتواند شکسته شده و به بیرون پرتاب شود. سطح آزاد دوم از طریق ایجاد یک برش (cut) در جبهه تونل ایجاد می‌شود. محل‌های مختلفی را می‌توان برای ایجاد برش در نظر گرفت (شکل ۳-۲). انواع برش شامل برش موازی و برش زاویه دار از قبیل برش V شکل (گوه‌ای)، و یا بادبزنی باشد.

مقدار خرج مصرفی در تونلها بسیار بیشتر از انفجار در سطح آزاد است (در حدود ۳ تا ۱۰ برابر). دلایل اصلی این مسأله را می‌توان محصور شدگی سنگ و تورم سنگ در قسمت‌های پایین به طرف بالا دانست. خرج ویژه با فاصله گرفتن از برش کاهش می‌یابد، تا به حداقل مقدار حدود 0.9 kg/m^3 در اکثر سنگ‌ها برسد.

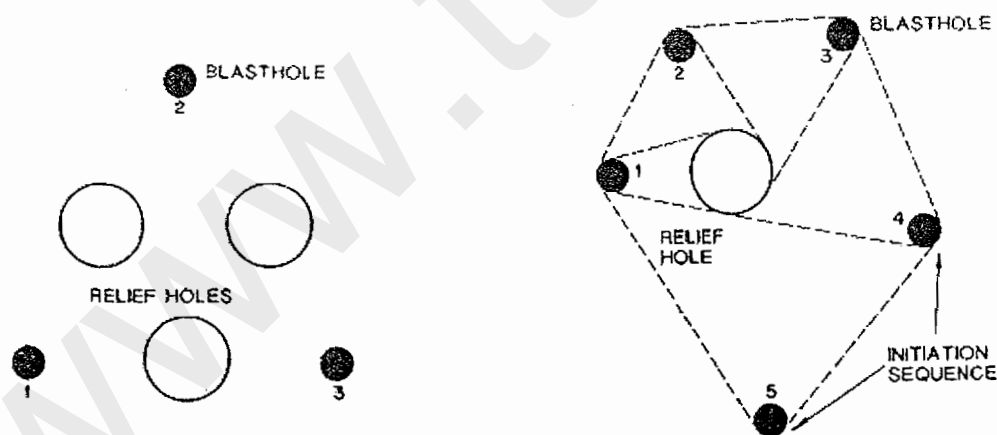


شکل ۳-۲- محل های مختلف برای ایجاد برش

۳-۱-۳ برش موازی

امروزه متداولترین برش مورد استفاده در تونل سازی برش موازی است. در برش موازی تمامی چالها به موازات هم ایجاد می شوند و چند چال بزرگ برای ایجاد سطح آزاد استفاده می گردند. معمولا چالهای اطراف خرجگذاری شده و چال یا چال های وسط خالی گذاشته می شود. بار سنگ این چالها تا چالهای بزرگ کم است.

در حین طراحی برش باید توجه کرد که قطر چال بزرگ، بار سنگ و تمرکز خرج برای دستیابی به نتیجه بهتر اهمیت زیادی دارند. علاوه بر اینها دقت در چالزنی نیز اهمیت فوق العاده ای دارد.

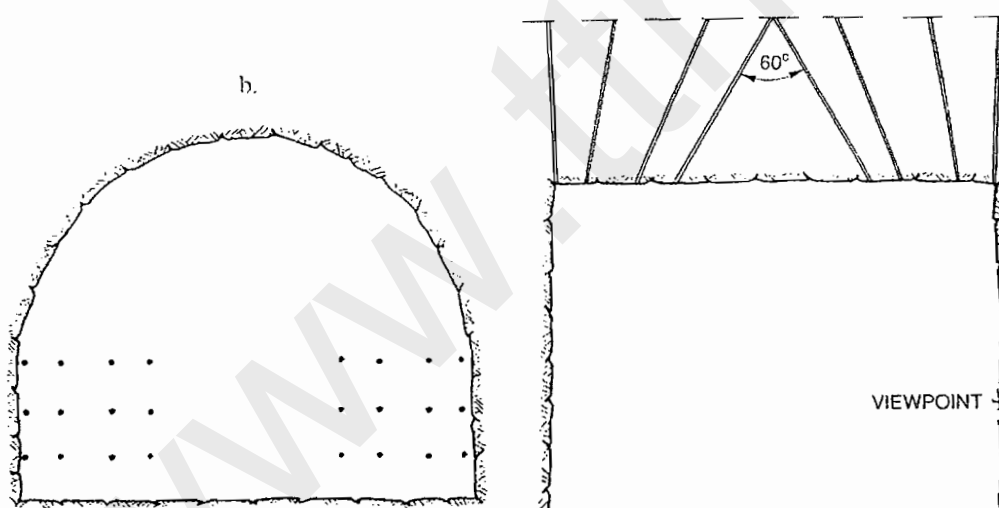


شکل ۳-۳- دو نوع برش موازی

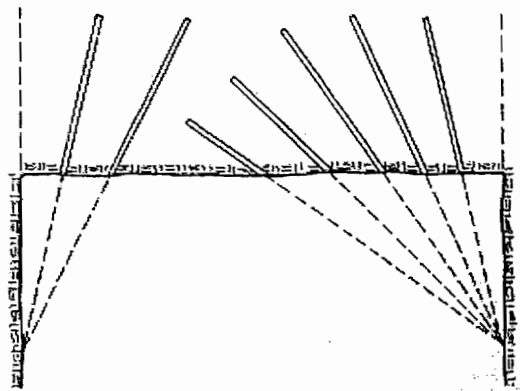
۳-۱-۴ برش های زاویه دار

از جمله برش های زاویه دار برش گوه ای (برش V شکل) و برش بادبزنی می باشد. از برش گوه ای تنها در صورتی می توان استفاده کرد که عرض تونل به اندازه کافی بزرگ باشد تا بتوان وسایل چالزنی را در آن جا داد. بطور معمول، مقدار پیشروی در هر مرحله ۴۰ تا ۴۵ درصد عرض تونل است (Hoek & Brown, 1994). میزان پیشروی به دقت چالزنی نیز بستگی دارد. حتی موردی گزارش شده است که با چالزنی دقیق، در یک تونل با عرض ۹ متر به میزان پیشروی ۵/۴ متر (۶۰٪ عرض تونل) نیز دست یافته شده است

در برش گوه ای زاویه برش نباید زیاد تیز باشد (حداقل ۶۰ درجه). زوایای تیز احتیاج به خرج بیشتری دارند. برش بادبزنی هم مانند برش گوه ای تنها در تونلهای عریض کاربرد دارد.



شکل ۳-۴- نمونه ای از برش گوه ای



شکل ۳-۵- برش بادبزنی

۳-۱-۵ محیط مقطع تونل

محیط مقطع تونل را می‌توان به دیوارها، سقف و کف تقسیم کرد. بارسنگ و فاصله چالهای کف به اندازه چالهای وسطی است اما در چالهای کف خرج بیشتری کار گذاشته می‌شود تا بتواند بر جاذبه و وزن سنگها غلبه کند. برای دیواره و سقف دو نوع انفجار محیطی مختلف وجود دارد: انفجار صاف و انفجار نرمال. در انفجار نرمال توجهی به ظاهر و شرایط رویه حفاری شده نمی‌شود. فاصله چالهای کناری زیاد است و خرج کار گذاشته شده به اندازه بقیه جاهاست در این صورت سطح تونل ناهموار، ترک خورده و نامنظم می‌شود.

انفجار کنترل شده برای ایجاد سطحی صاف‌تر به کار می‌رود. در این روش فاصله چالها از هم کم و خرج آنها هم کمتر از بقیه جاهاست در این صورت پروفیل حاصل صاف تر خواهد بود و نیاز کمتری به نگهداری و پایدارسازی وجود خواهد داشت.

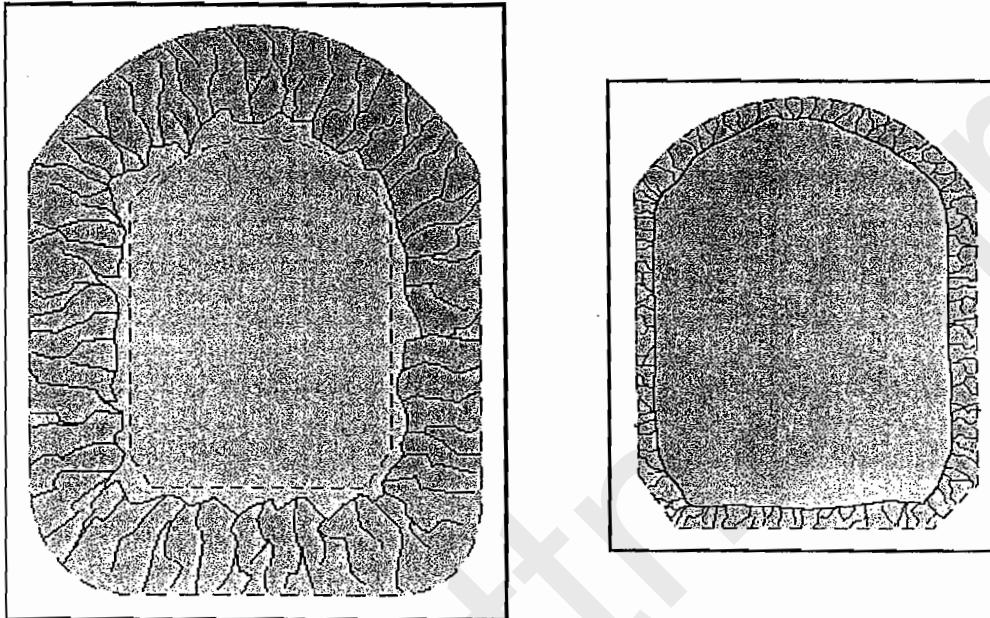
۳-۱-۶ انفجار کنترل شده

همانطور که قبلا اشاره شد، انفجار کنترل شده چال‌های محیط تونل حائز اهمیت زیادی است. زیرا در اینصورت سنگ اطراف تونل سالم مانده و احتمال ریزش آنها کاهش می‌یابد. البته میزان سالم ماندن سنگهای اطراف تونل تا حدی به شرایط زمین شناسی محل بستگی دارد، اما با دقت در انفجار و پخش بهتر خرجها می‌توان تا حدی جلوی ترک خوردگی سنگهای اطراف را حتی در شرایط بد زمین شناسی گرفت. به این منظور بهترین راه استفاده از چالهایی با فاصله کمتر و در عوض با خرج کم است. دو روش معمول عبارت است از:

- روش انفجار صاف (smooth blasting)

- روش پیش برش (presplitting)

در روش انفجار صاف ابتدا چالهای وسطی و سپس چالهای کناری منفجر می‌شوند در حالیکه در روش پیش برش ابتدا چالهای کناری و سپس چالهای وسطی منفجر می‌شوند. در شکل ۳-۶ ناحیه ترک خورده در سنگ اطراف تونل در حالتی که از انفجار معمولی استفاده شده با حالتی که از انفجار صاف استفاده شده، باهم مقایسه شده‌اند.

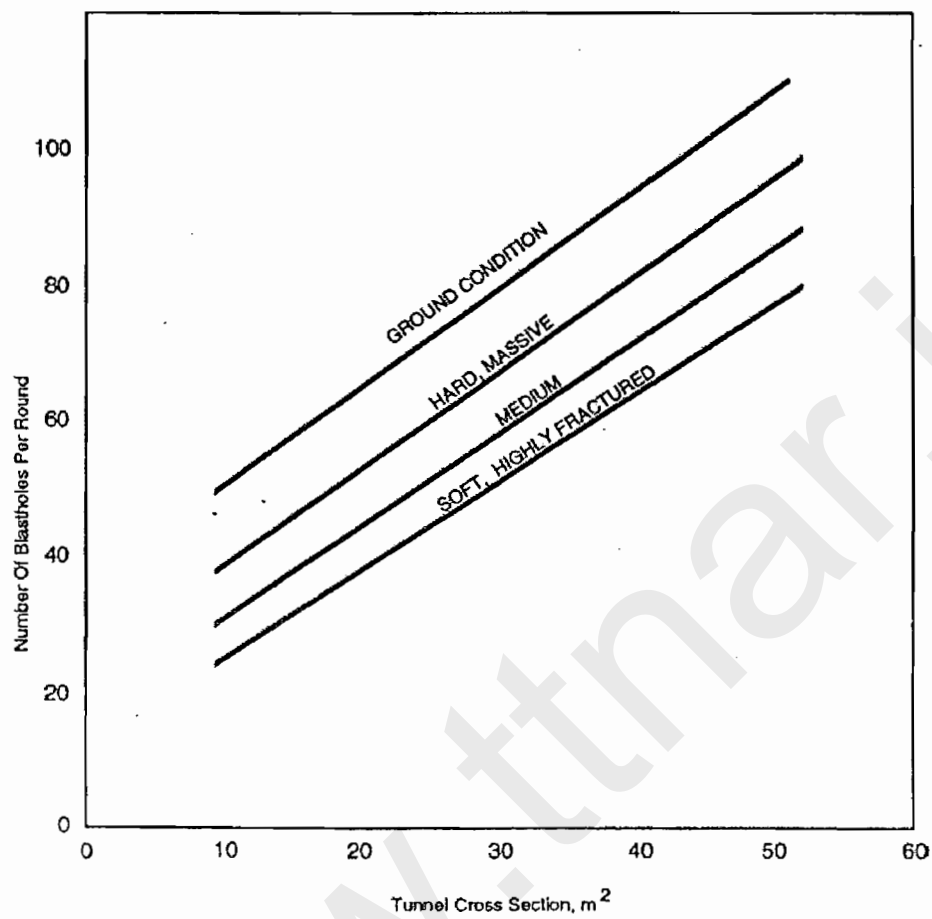


شکل ۳-۶- ناحیه ترک خورده در انفجار معمولی و انفجار صاف -
شکل سمت چپ انفجار معمولی- شکل سمت راست انفجار صاف

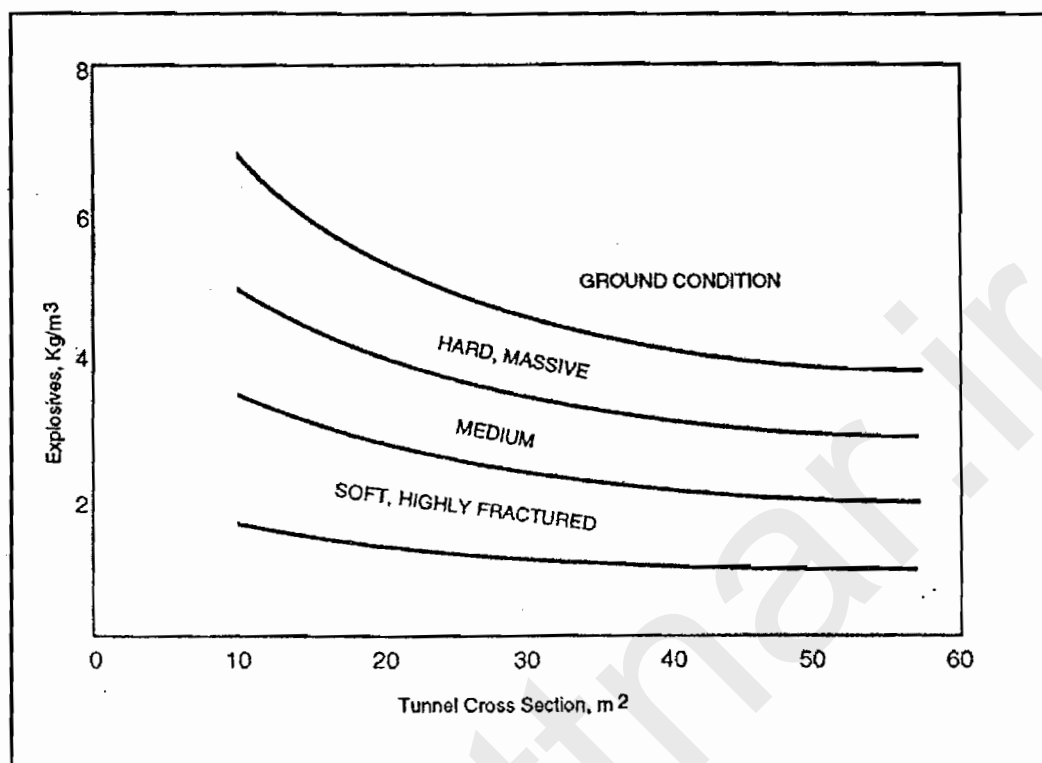
۳-۱-۷ تعداد چال و مقدار مواد منفجره مورد نیاز

تعداد چال مورد نیاز برای حفاری یک تونل به عوامل متعددی از جمله شرایط زمین از نظر زمین شناسی، شکل و اندازه مقطع تونل و قطر چالهای مورد استفاده بستگی دارد. بدیهی است با افزایش سطح مقطع به چالهای بیشتری نیاز است. شکل ۳-۷ تعداد چالهای مورد نیاز را به ازاء تغییرات سطح مقطع تونل در سنگهای مختلف نشان می‌دهد.

مقدار مواد منفجره مورد نیاز بستگی به شرایط زمین و سطح مقطع تونل دارد. هر قدر سطح مقطع بزرگتر باشد، مواد منفجره مورد نیاز در هر متر مکعب (خرج ویژه) کاهش می‌یابد. شکل ۳-۸ مقدار مواد منفجره مورد نیاز برای حفاری یک متر مکعب تونل را برای سطح مقطعهای مختلف نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که پارامترهای مختلف دیگری از قبیل جهت درزه‌بندی‌ها در تعداد چالها و نیز مواد منفجره مورد نیاز تاثیر دارد و این شکل‌ها میتواند فقط به عنوان راهنمای اولیه مورد استفاده واقع شده و با انفجارهای آزمایشی باید الگوی چالزنی و مقدار مواد منفجره بهینه را تعیین نمود.



شکل ۳-۷- تعداد چالهای مورد لزوم برای سطوح مقطع مختلف

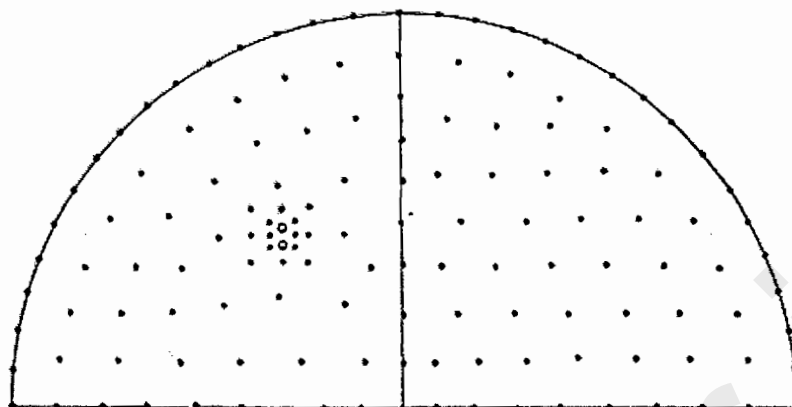


شکل ۳-۸- مقدار مواد منفجره مورد نیاز

مواد منفجره مختلفی را می‌توان برای حفاری تونل‌ها مورد استفاده قرار داد. در ایران رایجترین مواد منفجره دینامیت و آنفو می‌باشد. مشخصات دینامیت و آنفو تولیدی در ایران در جدول ۳-۳ ذکر شده‌است.

جدول ۳-۳- مشخصات دینامیت و آنفو تولید شده در ایران (صنایع شیمیایی پارچین)

نوع دینامیت	قطر (mm)	طول (mm)	وزن (gr)	مقاومت در آب	سرعت انفجار (m/s)	دانسیته (gr/cm^3)
دینامیت	۲۲	۲۶۵	۱۳۰	عالی	> 3000	۱/۴۵
	۳۰	۱۹۵	۱۶۵	عالی	> 3000	۱/۴۵
	۵۰	۳۰۰	۸۰۰	عالی	> 3000	۱/۴۵
آنفو	-	-	-	ضعیف	۳۲۰۰	۱/۸۵-۱



اطلاعات حفاری	اطلاعات فنی	اطلاعات حفاری	اطلاعات فنی
نحوه برش : برش ندارد	مساحت سینه کار ۵۷ متر مربع	نوع برش موازی	مساحت سینه کار ۵۷ متر مربع
قطر چال ۴۵ میلی متر	ارتفاع ۸/۵ متر	قطر چال ۴۵ میلی متر	ارتفاع ۸/۵ متر
تعداد چال ۶۱ عدد	عرض ۸/۵ متر	تعداد چال ۷۹ عدد	عرض ۸/۵ متر
	طول تونل ۵۰۰ متر	قطر چال برش ۸۹ میلی متر	طول تونل ۵۰۰ متر
	حجم کل ۲۸۵۰۰ متر مکعب	تعداد چال برش ۲ عدد	حجم کل ۲۸۵۰۰ متر مکعب
طول چال ۳/۳ متر	مترای حفاری ۲۶۰/۷ متر	طول چال ۳/۳ متر	مترای حفاری ۱۸۱/۳ متر
حفاری ویژه ۱/۰۷ متر بر متر مکعب		حفاری ویژه ۱/۵۲ متر بر متر مکعب	

شکل ۳-۹- مشخصات چالزنی و خرجگذاری در یک تونل

۲-۳ حفاری با TBM

۱-۲-۳ تاریخچه ساخت و استفاده از TBM

تاریخچه استفاده از TBM به زمانی برمی گردد که اولین تونل‌های بلند در دنیا طراحی و اجرا شدند. اولین تونل‌های بلند همراه با توسعه صنعتی شدن که منجر به گسترش حمل و نقل زمینی کالا و مردم با راه آهن می شد احداث شدند. در اروپا اولین مانع بر سر راه گسترش راه آهن رشته کوه آلپ بود. این عامل باعث ایجاد تونل‌های بلند در اروپا شد. اولین تونل بلند تونل Mount Cenis یا تونل Frejus است که طولی در حدود ۱۲.۲۳۳ متر دارد و مابین سالهای ۱۸۵۷ تا ۱۸۷۱ احداث شده است. برای ساخت این تونل یک مهندس بلژیکی به نام Henry Maus یک دستگاه حفاری تونل را ساخت و آزمایش کرد. اما در حقیقت این دستگاه عملاً برای حفاری این تونل به کار برده نشد. ما بین سالهای ۱۸۴۶ تا ۱۹۳۰ نزدیک ۱۰۰ دستگاه حفاری تونل طراحی و ثبت شد. اما تقریباً هیچکدام این دستگاه‌ها نتوانستند تونلی را بطور کامل حفاری کنند.

در سالهای ۱۹۵۲ و ۱۹۵۳ اولین TBM توسط شرکت Jame S. Robbins و همکارانش با قطر ۷/۸ متر و توان ۱۴۹ کیلووات ساخته شد. بعد از آن TBM های دیگری طراحی شد که در هر یک از آنها سعی شده بود تا امکان حفاری سنگهای محکم‌تری فراهم شود.

با پیشرفت تکنولوژی امکان احداث تونل‌های با قطر بزرگتر در سنگهای سخت تر با TBM فراهم شده است و در حالیکه هزینه ابزار برش مانند دیسک‌ها روند نزولی دارد سرعت نفوذ TBM در حال افزایش قابل توجهی است.

براساس پایگاه اطلاعاتی دانشگاه تگزاس بین سالها ۱۹۶۳ تا ۱۹۹۴ در حدود ۶۳۰ تونل با TBM حفاری شده اند که خلاصه ای از آن در جدول ۳-۴ آمده است.

جدول ۳-۴- آمار مربوط به ساخت تونلها با TBM

تعداد	آیتم	
۲۶	1963-1970	تعداد تونل بر حسب دوره زمانی اتمام پروژه
۵۳	1971-1975	
۱۲۲	1976-1980	
۱۳۹	1981-1985	
۱۷۶	1986-1990	
۱۱۴	1991-1994	
۲۱۹	2-3.5m	تعداد تونل بر حسب قطر حفاری
۲۳۷	3.6-5.0	
۱۰۴	5.0-6.5	
۳۶	6.5-8.0	
۳۴	>8.0	
۴۰۲	بدون شفت	تعداد تونل بر حسب عمق شفت
۳۵	<15m	
۹۲	15-50m	
۱۰۱	>50m	
۴۰	سربلایی >+20%	تعداد تونل بر حسب شیب طولی
۶	+20% تا +10%	
۱	+10% تا +3%	
۵۷۳	+3% تا -3%	
۳	-10% تا -3%	
۷	-20% تا -10%	
۰	سربایینی <-20%	
۳۱۸	نو	تعداد TBM بر حسب وضعیت آن در شروع کار
۲۲	استفاده مجدد مستقیم	
۲۶۱	استفاده پس از تعمیر	
۲۹	نا مشخص	
۵۱۲	پاز	تعداد TBM بر حسب نوع سپر
۵۶	تک سپر	
۳۸	دو سپر	
۱۵	سپر مخصوص	
۹	نا مشخص	

۳-۲-۲ انواع TBM

بطور کلی نحوه کار انواع مختلف TBM به این صورت است که در آن یک صفحه حفاری (cutting head) که روی آن ابزار برش (cutting tools) نصب شده است می چرخد و ضمناً بوسیله یک سیستم هل دهنده هیدرولیک به طرف جبهه کار تونل فشار داده می شود و این کار باعث خرد شدن و حفاری سنگ می شود.

TBM ها را بطور کلی می توان به سه دسته تقسیم کرد:

TBM های بدون سپر یا باز (open TBMs)
 TBM های تک سپری (single shield TBMs)
 TBM های دوسپری (double shield TBMs)

۳-۲-۱ TBM های باز

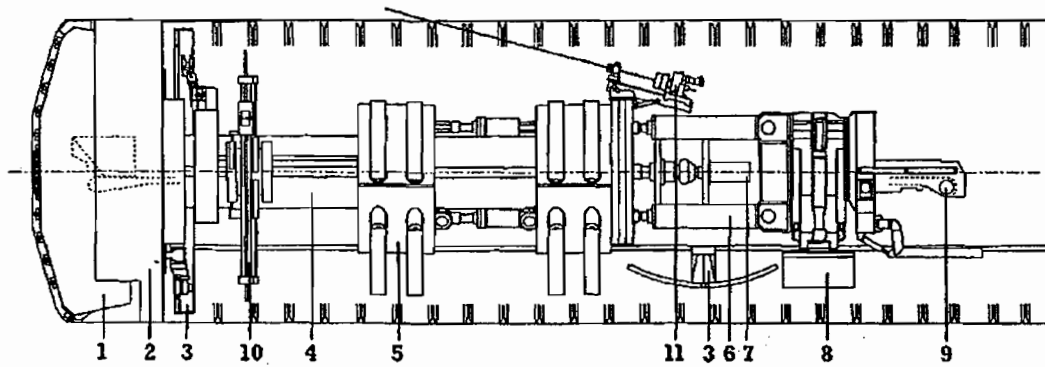
بر خلاف TBM های سپردار که در آنها دستگاه در داخل یک سپر فولادی استوانه‌ای شکل قرار می‌گیرد، TBM های باز بدون سپر محافظ می‌باشند. در این TBM ها، نیروی عکس‌العمل برای رانش صفحه حفاری به جلو توسط چنگزن‌هایی (gripper) که به دیواره تونل تکیه می‌زنند تامین می‌شود.

در طول عمل حفر، صفحه حفاری تا آنجا که محور اصلی دستگاه جا دارد (به اندازه یک کورس جک‌های هیدرولیکی) به داخل سینه کار فشار داده می‌شود و در حقیقت یک سیکل پیشروی صفحه حفاری انجام می‌شود. سپس چنگزن‌ها جمع شده و دستگاه برای آماده شدن جهت سیکل بعدی برش به جلو رانده می‌شود. مواد حفاری شده توسط تسمه نقاله به پشت دستگاه منتقل شده و با استفاده از وسایل مناسب به بیرون از تونل انتقال داده می‌شود.

در شرایطی که سنگ پایدار است و میزان نفوذ آب کم است استفاده از TBM باز کاربرد دارد. این TBM ها بدو صورت تک چنگزن (single gripper) و چنگزن دوبله (double gripper) موجود می‌باشند. از آنجا که این چنگزن‌ها از طریق اعمال فشار بر دیواره‌های تونل، تکیه‌گاه لازم برای نیروی رانش TBM را فراهم می‌آورند حد معینی از مقاومت سنگ برای پایداری در مقابل این نیروهای فشاری لازم است.

استفاده از TBM باز در زمین‌هایی مناسب است که زمین دارای زمان خودایستایی (stand-up time) لازم برای نصب سیستم نگهداری در پشت صفحه حفاری باشد. در صورت لزوم، حتی‌الامکان برای جلوگیری از خرابی قسمت‌های متحرک هیدرولیکی باید پاشیدن شاتکریت در قسمت پشتیبانی (backup) انجام شود.

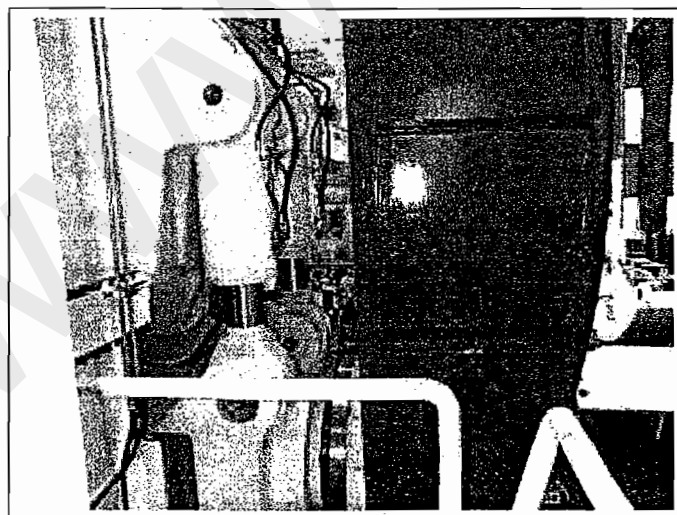
برخلاف TBM های سپردار که در آنها نصب پوشش سگمنتی (segment lining) مستقل از کیفیت سنگ است، میزان عملکرد TBM باز به وسعتی از سنگ که نیاز به پایدارسازی دارد و زمان مورد نیاز برای پایدارسازی بستگی دارد.



- | | | |
|---|--|---------------------|
| 1. Cutter head | 5. Outer kelly in two parts with grippers and telescopic jacks | 8. Rear support |
| 2. Roof support shield | 6. Push jacks | 9. Machine conveyor |
| 3. Erector to place arches and steel mesh | 7. Cutter head drive | 10. Roof bolter |
| 4. Inner kelly | | 11. Probe drill |

شکل ۳-۱۰- نمای از یک TBM باز

تفاوت اساسی بین TBM های دارای تک چنگزن و TBM های با چنگزن دوبله این است که در TBM های دارای تک چنگزن، امکان اصلاح مسیر در حین عملیات حفاری وجود دارد. در مورد TBM های با چنگزن دوبله راستای TBM باید قبل از شروع حفاری تنظیم شود. در شکل ۳-۱۱ جکهای مربوط به تغییر جهت یک TBM دارای تک چنگزن نشان داده شده است.



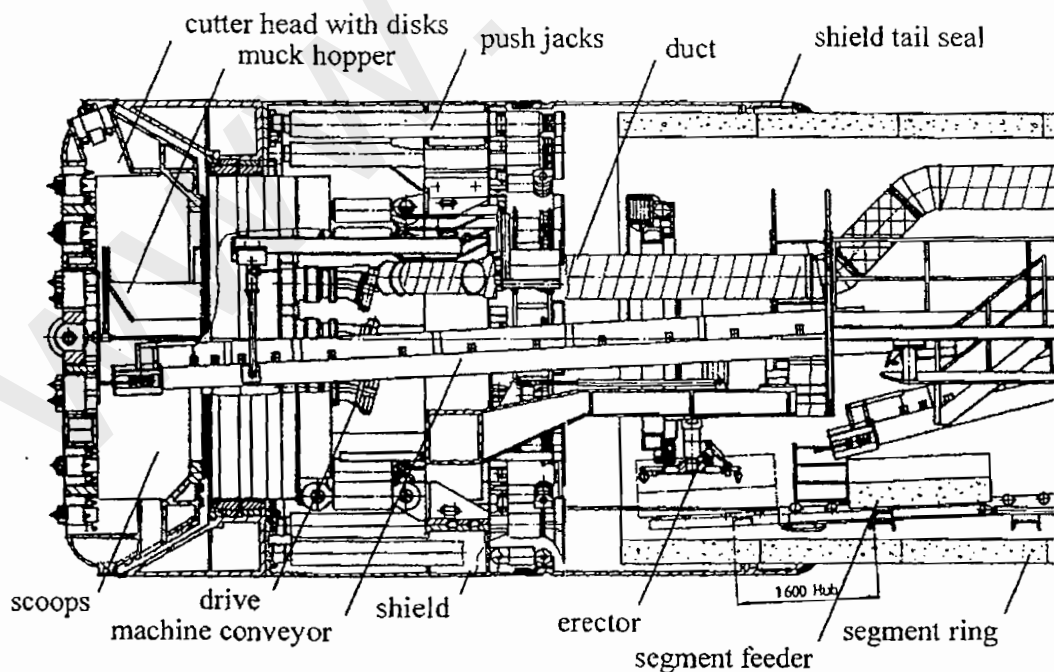
شکل ۳-۱۱- جکهای مربوط به تغییر جهت یک TBM دارای تک چنگزن

کفشک‌های چنگزن‌ها می‌توانند بطور هیدرولیکی حرکت کرده و خود را با سطح حفاری شده سنگ هماهنگ کنند. حد نهائی نیروی چنگزن از طریق مقاومت فشاری سنگ مشخص می‌شود و در حدود ۲ الی ۳ برابر نیروهای رانشی (thrust forces) دستگاه است.

۳-۲-۲-۲ TBM های تک سپری

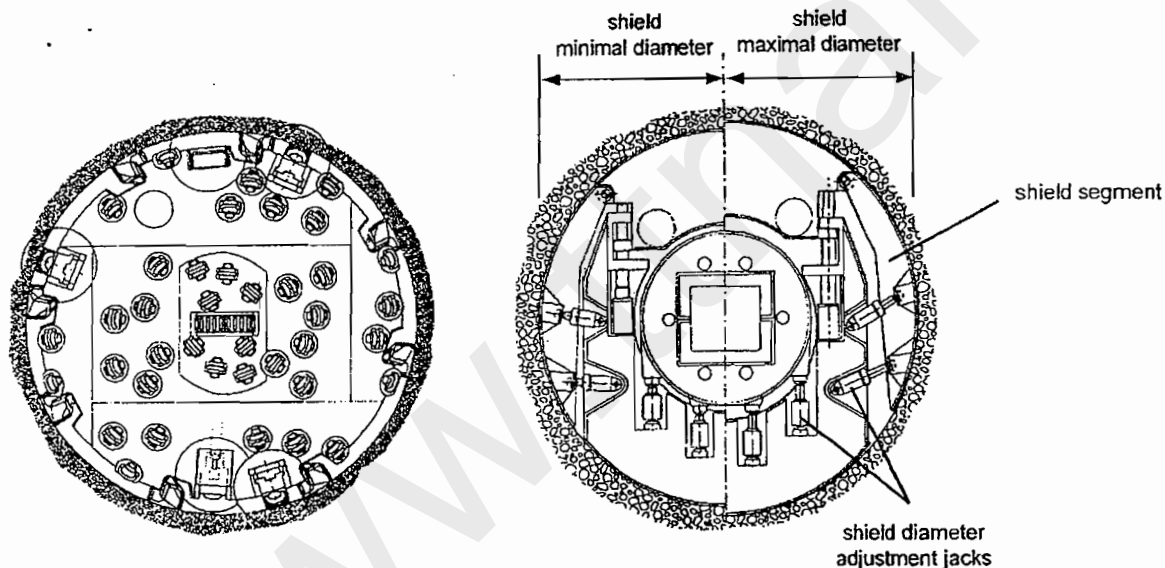
TBM های سپردار در شرایطی که سنگ ناپایدار است و احتمال ریزش زمین وجود دارد، کاربرد دارند. سپر برای محافظت و مهار سنگ و محافظت پرسنل و تجهیزات عمل می‌کند. پوشش از سگمنت‌های پیش ساخته بتنی ساخته می‌شود که توسط وسیله مخصوص در محل خود قرار داده شده و معمولا به همدیگر پیچ می‌شوند.

در TBM های تک سپری، نیروی رانش ماشین توسط سگمنت‌ها تحمل می‌شود. فضای خالی بین سگمنت‌های کار گذاشته شده و دیواره تونل توسط شن پر شده و توسط ملات بصورت پیوسته تزریق می‌شود. هندسه سگمنت‌ها بر سرعت اجرا تأثیر می‌گذارد. در این TBM ها، در حین عملیات سگمنت‌گذاری، عمل حفاری متوقف می‌شود.



شکل ۳-۱۲- نمای از یک TBM تک سپری

در سنگ‌های فشارنده (squeezing rocks)، فشار وارده از طرف سنگ بر دستگاه‌های TBM سپردار ممکن است باعث توقف عملیات اجرایی و گیر افتادن TBM شود. در اینگونه سنگ‌ها باید یا از روش‌های دیگر حفاری (مانند چالزنی و انفجار و یا حفاری با کله‌گاو) استفاده شود و یا از TBM‌هایی استفاده شود که در آنها قطر حفاری و قطر سپر قابل تغییر دادن باشد (شکل ۳-۱۳). در این دستگاه‌ها در صورت گیر افتادن دستگاه اقدام به کاهش قطر سپر برای رها نمودن آن می‌شود. همچنین برای جلوگیری از گیر افتادن دستگاه، با بکارگیری دیسک‌های ویژه بیش‌حفاری (overcutting rollers) قطر حفاری را می‌توان افزایش داده و نتیجتاً از میزان فشار وارده بر سپر کاست. با پیشرفت‌های موجود در صنعت TBM، بیش‌حفاری تا ۲۵۰ میلی‌متر امکان‌پذیر است. افزایش قطر، باعث کاهش پیشروی حفاری به میزان حدوداً ۵۰٪ می‌شود.



شکل ۳-۱۳ - قطر حفاری و قطر سپر قابل تنظیم.

در شکل ۳-۱۴ نمای یک TBM تک سپری که در تونل Murgenthal سویس مورد استفاده قرار گرفت دیده می‌شود. این تونل یک تونل راه‌آهن بطول ۴۲۶۰ متر بوده و از میان مارن (marl) و ماسه سنگ (sandstone) عبور می‌کرد. قطر سپر ۱۱/۹۸ متر و طول آن ۸/۸ متر بود. ۴۰ عدد جک نیروی رانشی ۶۴۰۰۰ کیلو نیوتن وارد می‌کردند. صفحه حفاری مجهز به ۶۳ دیسک تکی ۱۷ اینچی و ۵ دیسک دوتایی بود. توان مصرفی صفحه حفاری ۳۲۰۰ کیلووات بود. لازم به ذکر است که این دستگاه قبلاً برای حفاری یک تونل راه بنام تونل Bozberg در سویس مورد استفاده قرار گرفته بود. تونل مزبور یک تونل دوتایی (double tube) می‌باشد که طول هر کدام از آنها ۳۷۰۰ متر می‌باشد.



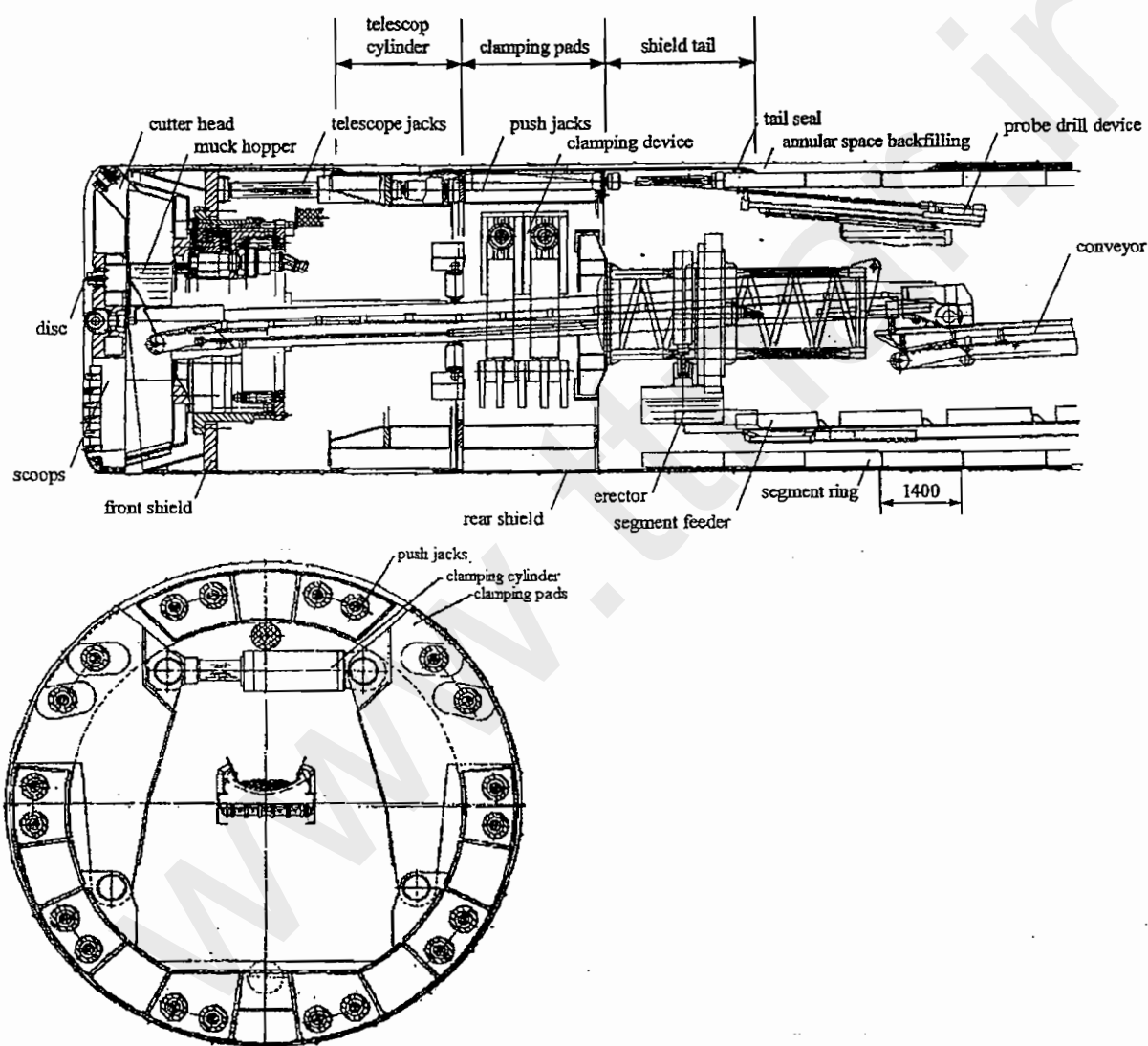
شکل ۳-۱۴- نمای یک TBM تک سپری مورد استفاده در یک تونل راه
و نیز یک تونل راه آهن به قطر ۱۱/۹ متر

۳-۲-۲-۳ TBM های دو سپری (سپر تلسکوپی) (Telescopic Shield)

دستگاههای دو سپری تکنیکهای دستگاههای باز و تک سپری را با هم استفاده کرده و بنابراین در محدوده وسیعی از شرایط زمین شناسی کاربرد دارند.

اساس کار این نوع TBM برپایه چنگ زدن بطور شعاعی به دیواره تونل و انجام حفاری و نصب سگمنتها بطور همزمان است. صفحه حفاری و سپر جلوئی (front shield) توسط جکهای تلسکوپی به جلو هل داده می شوند. جکهای کمکی رانش (auxiliary thrust cylinders) که در سپر عقبی (tail shield) قرار دارند فقط برای نگهداری سگمنتهای کار گذاشته شده مورد استفاده قرار میگیرند. زمانی که جکهای تلسکوپی کاملاً باز می شود، چنگزن ها را آزاد نموده و سپر چنگزن (gripper shield) به سمت سپر جلوئی کشیده میشود. در همین زمان جکهای کمکی رانش برای محافظت آخرین حلقه سگمنت کار گذاشته شده باز می شوند. نگهداری در طول عمل چنگزنی مجدد (re-grip) توسط کفشکهای تکیه گاهی قائم و سپر جلوئی و جکهای کمکی رانش انجام می شود.

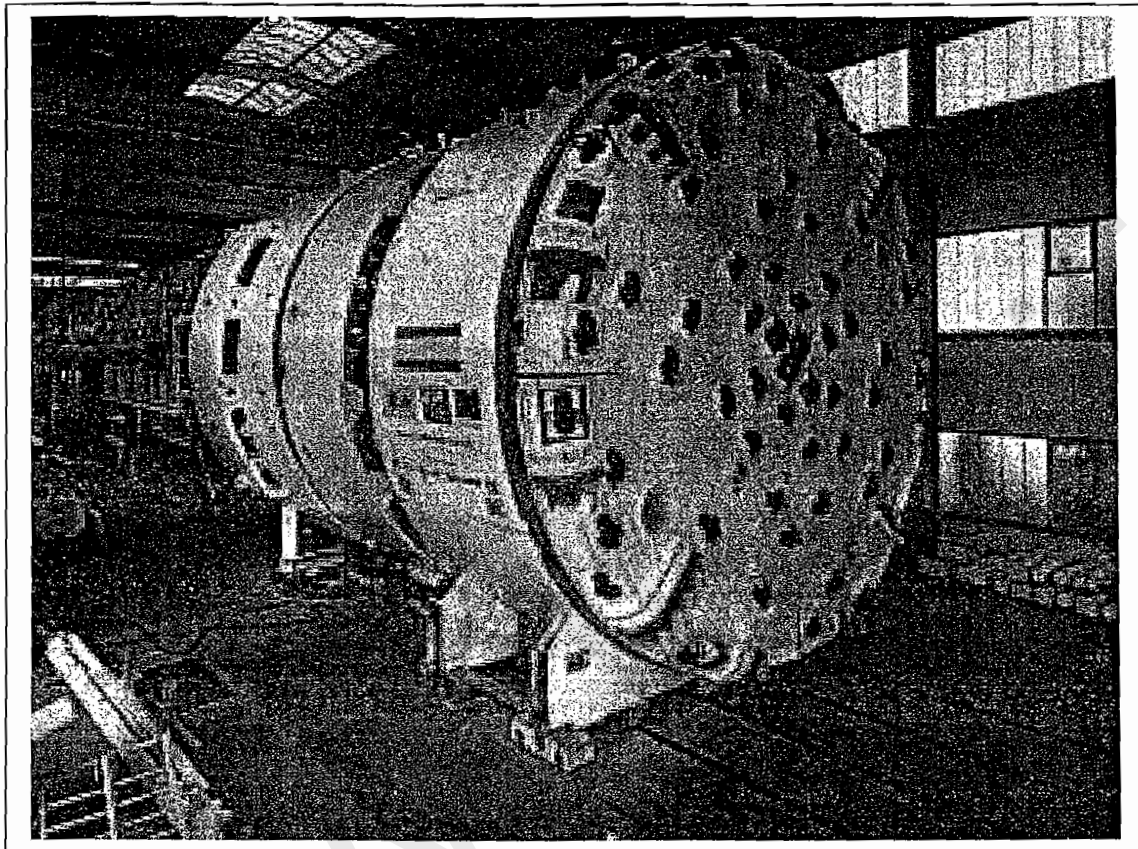
TBM های دوسپری قادرند همزمان با حفاری، عمل نصب سگمنت ها را نیز انجام دهند و عمل حفاری در اینگونه TBM ها فقط برای مدت زمان کوتاهی جهت جلو رفتن سپر عقبی بعد از هر کورس حفاری (boring stroke) متوقف می شود. در TBM های تک سپری، در حین نصب سگمنت ها، دستگاه قادر به حفاری نمی باشد. بنابراین، سرعت حفاری با یک TBM دوسپری تقریباً دو برابر سرعت حفاری با TBM تک سپری می باشد.



شکل ۳-۱۵- نمای از یک TBM دوسپری

در شکل ۳-۱۶ یک TBM دو سپری با قطر ۹/۵۱ متر نشان داده شده است. این دستگاه همراه با سه دستگاه دیگر برای حفاری یک تونل دو تایی راه آهن بنام تونل Guadarrama در اسپانیا مورد استفاده

قرار گرفت. کل طول تونل ۲۹ کیلومتر بوده و مسیر تونل از گنایس و گرانیت هوازده عبور می کند. نیروی کل رانش این دستگاه ۱۰۵۰۰۰ کیلو نیوتن با حداکثر گشتاور (torque) ۲۰۰ مگانیوتن-متر می باشد. حفاری این تونل در نوامبر ۲۰۰۲ آغاز شده است.



شکل ۳-۱۶- نمای یک TBM دو سپری مورد استفاده در یک تونل راه آهن
با قطر ۹/۵۱ متر

۳-۲-۳ انواع ابزار برش و کاربرد آنها

ابزار برش مورد استفاده به شرایط زمینی که تونلسازی در آن صورت می گیرد، بستگی دارد. بطور کلی ابزار برش را می توان به سه دسته تقسیم نمود:

۱- ابزار برش کلنگی (pick) یا اسکنه ای (drag bit)

۲- ابزار برش دیسکی (disc)

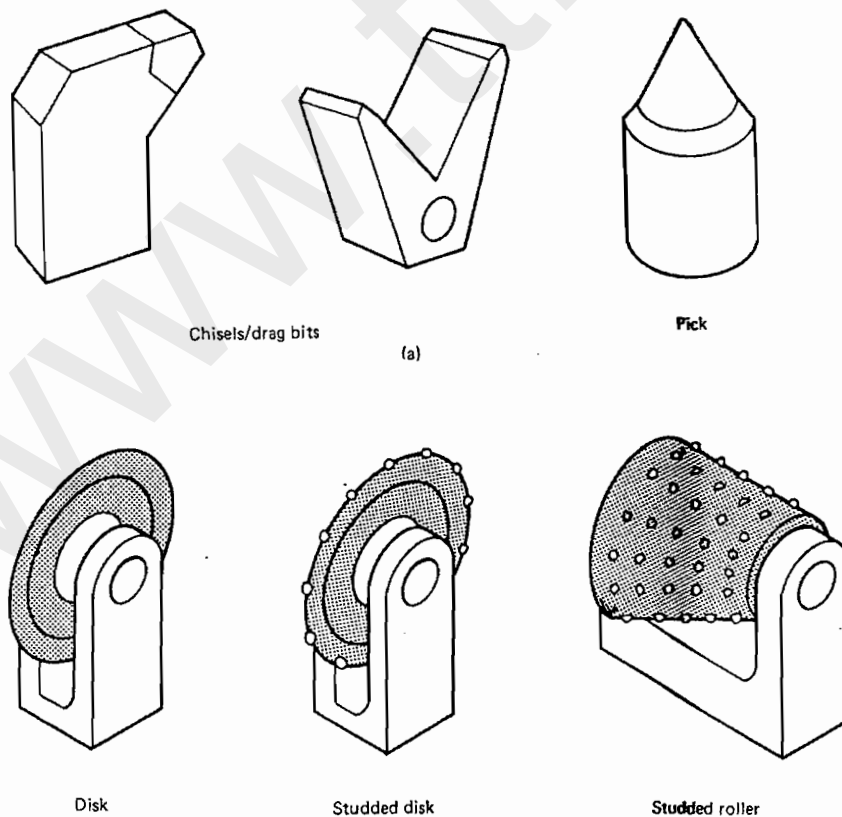
۳- ابزار برش غلتکی (roller)

ابزار برش کلنگی یا اسکنه‌ای:

این ابزار برای حفاری در زمین های نرم و یا در شرایطی که زمین نرم دارای میان لایه هائی از سنگ است مناسب می باشد. ابزار برش کلنگی یا اسکنه‌ای در شکلهای و اندازه های مختلف ساخته می شود. این ابزار برش زمین را به صورت تکه های نسبتاً بزرگ (در مقایسه با انواع ابزار برش دیسکی) می کند و این امر کار آبی و سهولت حفاری در سنگهای ضعیف و دارای خاصیت پلاستیک، که موجب بروز مشکلات اجرایی در ابزار برش دیسکی می شوند، را افزایش می دهد.

ابزار برش دیسکی:

این ابزار برش دیسک ساده‌ای با یک لبه برشی تیغه‌ای است که این تیغه قابل تعویض می باشد. این ابزار برش به صورت دو یا سه دیسکه نیز ساخته می شوند. مکانیزم حفاری توسط دیسک ایجاد شیار در سنگ و همزمان با آن اعمال نیروی برشی برای شکستن برآمدگیهای حاصل از ایجاد شیار می باشد. سنگهایی که مقاومت فشاری تک محوره در حدود ۱۷۵ مگاپاسکال دارند را می توان با موفقیت توسط این ابزار برش حفاری کرد. سنگهای دارای سایندهای زیاد، مشکلاتی در حفاری با این ابزار برش ایجاد می کنند. با استفاده از کاربید تنگستن (tungsten carbide) بر روی لبه دیسک، دامنه کار برد چنین ابزار برشی برای سنگهای بسیار سخت تر توسعه داده شده است (Whittaker and Frith, 1990).



شکل ۳-۱۷- چند نوع ابزار برش مورد استفاده در TBM

ابزاربرش غلتکی:

ابزاربرش غلتشی دارای دو نوع اصلی هستند :

۱- نوع دندانهای (milled tooth type)

۲- نوع کاربید تنگستنی (tungsten carbide insert type).

نوع دندانهای موجب شکسته شدن سنگ تحت نفوذ موضعی ابزار برش می گردد. به اینصورت که نفوذ دندانها موجب بوجود آمدن تراشه های سنگ تحت تأثیر تنش های کششی و برشی می شود.

ابزاربرش غلتکی نوع کاربید تنگستنی در جاهائی مورد استفاده قرار می گیرند که ویژگیهای ساینده سنگ، استفاده از ابزاربرش نوع دندانهای را اجازه نمی دهد. حفاری سنگ با این نوع ابزار برش ناشی از عمل خرد شدن (pulverization) است تا اینکه بر اثر تشکیل تراشه های سنگ باشد. اگر چه سرعت نفوذ با این نوع ابزاربرش کند است و مقدار زیادی نرمه تولید می کند و مصرف و هزینه ابزاربرش بالا می باشد، ولی این ابزار برش برای سنگهای با مقاومت زیاد، نوع مناسب تر و کارآتری هستند.

ابزار برش از نظر موقعیت قرارگیری بر روی صفحه حفاری به سه دسته تقسیم می شوند:

ابزاربرش مرکزی (center cutters): در قسمت مرکزی صفحه حفاری، لازم است که برای دستیابی به حفاری سریع و مؤثر تحت شرایط سرعت برشی نسبتاً آهسته، دسته ای از ابزاربرش خاص نصب گردد که در بعضی از موارد ابزاربرش به منظور تسهیل خرد شدن سنگ به شکل سه مخروطه (tricone) قرار می گیرند.

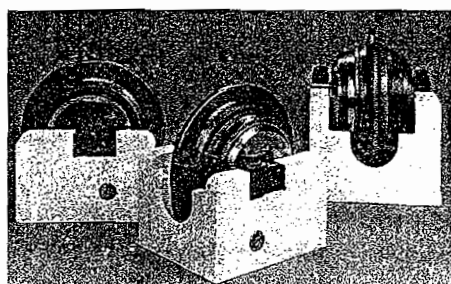
ابزاربرش میانی (face cutters): قسمت اصلی سینه کار معمولاً با ابزاربرش دیسکی یا غلتشی حفر می شود که بکارگیری این ابزاربرش به سختی سنگ بستگی دارد. برخی مواقع نظیر حفاری در سنگهای ضعیفتر ممکن است استفاده از ابزاربرش اسکنه ای را ایجاب نماید.

ابزاربرش لبه ای (gauge cutters): این ابزاربرش در لبه خارجی صفحه حفاری و معمولاً بصورت مایل نصب می شوند تا بتوانند خلاصی لازم برای عبور TBM را فراهم کنند. ابزاربرش لبه ای معمولاً از نوع دیسکی یا غلتشی هستند و از آنجائی که کار انجام شده توسط چنین ابزاربرشی زیاد است، ضروری است که بتوانند در برابر شرایطی که موجب افزایش نرخ سائیدگی و فرسودگی آنها می شود، مقاومت کنند.

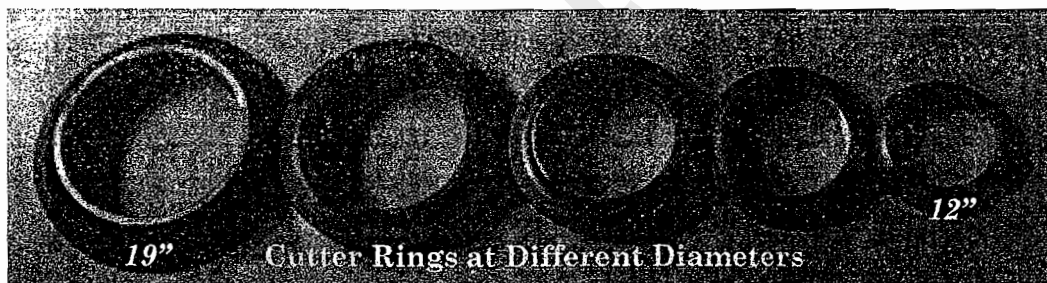
اصل اساسی که بازدهی خرد کردن سنگ بوسیله دستگاه را افزایش می دهد افزایش اندازه قطعات خرد شده است. یعنی ابزار برش باید طوری چیده شوند که بزرگترین اندازه قطعات خرد شده بدست آید. در یک TBM مخصوص سنگ سخت اگر بار هر کاتر افزایش داده شود، کاتر بیشتر در سنگ فرو می رود و با

نفوذ بیشتر می‌توان فاصله بین کاترها را زیاد تر کرد با ترکیب نفوذ عمیق تر و برش های هم مرکز که فاصله بیشتری نسبت به هم دادند می‌توان اندازه قطعات حفاری شده را افزایش داد.

آزمایشاتی که در بخش معدن دانشگاه کلورادو انجام شد، نشان داد که ۸۵-۹۰٪ قدرت صفحه حفاری صرف خرد کردن سنگ های در تماس با کاتر می‌شود. یعنی سنگی که از سینه کار در فاصله بین کاترها سقوط می‌کند، آزاد است و تقریباً هیچ نیرویی به آن اعمال نشده است. با توجه به بحث بالا می‌توان نتیجه گرفت که اگر کاترها با فاصله مناسبی از هم چیده شوند، با نیروی ثابت بازدهی TBM بیشتر می‌شود. بعلاوه فواصل بیشتر بین کاترها به منزله کاترهای کمتر و در نتیجه کاهش هزینه پروژه است.



Cutter Diameter mm (in)	Design Bearing Capacity/Max Load Ton (lbs)	Average Cutter Load For TBM Thrust Ton (lbs)
350 (14)	18 (35,000)	15 (30,000)
380 (15.5)	20 (40,000)	18 (36,000)
431 (17)	27 (55,000)	24 (48,000)
456 (18)	30 (60,000)	26 (56,000)
481 (19)	35 (70,000)	30 (60,000)



شکل ۳-۱۸- اندازه‌های مختلف ابزار برش دیسکی و ظرفیت باربری آنها

۳-۲-۴ عملکرد TBM

در جریان توسعه و پیشرفت تونلسازی مکانیزه معلوم شد که مقاومت عامل محدود کننده اصلی در حفاری توسط دستگاه است. ابداع TBM هایی که با ابزار برش دیسکی (disc cutter) مناسبی تجهیز شده، شاید تنها پیشرفت عمده صورت گرفته در روند مکانیزه کردن تونلسازی بوده است. این دستگاهها به میزان زیادی حوزه کاربرد تونلسازی برای دستیابی به نرخهای بالای پیشروی و همچنین در شرایط سنگی سخت‌تر، که قبلاً خارج از حیطه عملکرد دستگاهها بود، را افزایش داده است.

نگهداری و پایداری زمین از مهمترین عوامل حاکم بر موفقیت یک پروژه تونلسازی هستند، ولی وقتی تونلسازی در سنگهای سخت انجام می گیرد، مهمترین عوامل اقتصادی نرخ نفوذ (penetration rate) و هزینه های ابزار برش می باشند. ابزاربرش معمولاً در جریان حفر سائیده می شوند، ولی در شرایط سنگ بلوکی سخت، برخی از ابزاربرش متحمل خسارت می شوند یا حتی تحت تأثیر بارهای ضربه ای بالا که در جریان حفر با آن روبرو می شوند، بطور کامل درهم می شکنند. نرخ سایش (cutter wear rate) ابزاربرش و جایگزینی آنها بر هزینه مصرف قطعات ابزاربرش تأثیر میگذارد و تعویض آنها بر زمان عملکرد دستگاه و راندمان آن تأثیر گذار است.

یکی از عوامل مؤثر بر نرخ سایش یا فرسودگی ابزار برش، خواص ساینده گی سنگ است. نرخ نفوذ در یک عملیات تونلسازی تمام مقطع، تابعی از شکل هندسی ابزاربرش، نیروی فشاری یا محوری دستگاه و مقاومت سنگ است.

به کارگیری حفاری مکانیکی در شرایط سنگی سخت تر، مستلزم افزایش نیروی فشاری یا محوری پشت هر ابزاربرش و در نتیجه افزایش کل نیروی فشاری یا محوری دستگاه است. این امر ایجاب میکند که مشخصات دستگاه از جنبه ظرفیت مکانیکی، هیدرولیکی، توان و ساختاری بهبود یا افزایش یابد، یک عامل مهم، سرعت چرخش صفحه حفاری است. این مسئله به طور اساسی به ظرفیت تحمل بار ابزار برش (cutter bearing capacity) و شدت بارگذاری ضربه ای (shock loading) تحمل شده توسط ابزاربرش بستگی دارد که میتواند منجر به افزایش نرخ سایش و خسارت ابزاربرش شود.

نتایج حاصل از بررسیهایی که برای بالا بردن قدرت ابزاربرش جهت غلبه بر سنگهای سخت تر به عمل آمد، این بود که عوامل محدود کننده عبارتند از ظرفیت تحمل بار ابزاربرش و مصالح لبه ابزاربرش یا بخشی از ساختار ابزاربرش که در تماس با سنگ قرار می گیرد. در اوائل دهه ۱۹۷۰ دستگاههایی که طراحی شده بودند قادر به اعمال حداکثر حدود ۱۰ تن بار پیوسته بر روی هر ابزاربرش بودند. در ضمن بارهای ضربه ای حدود ۲/۵ تا ۳ برابر بار پیوسته غالباً بر هر ابزاربرش اعمال میشد. بهرحال، در دهه ۱۹۷۰ ابزاربرش از جنبه طراحی تا جایی توسعه یافتند که قادر به تحمل ۱۵ تا ۲۰ تن بارگذاری پیوسته باشند و نتیجه این پیشرفتهای افزایش بسیار زیاد نرخ نفوذ در سنگهای سخت در حین افزایش عمر ابزاربرش و در نتیجه کاهش هزینه های ابزاربرش بود. با بهبود ظرفیت تحمل بار ابزاربرش، محدودیت یا عامل محدود کننده باقیمانده، مواد لبه ابزاربرش بود. یک نکته مهم، توزیع حدود ۲۰ تن بار فشاری پشت ابزاربرش بر روی سطح تماسی از سنگ با کمتر از ۶ سانتیمتر مربع مساحت بود. این حقیقت را نیز باید در نظر گرفت که حداکثر بار تا ۳ برابر این مقدار نیز ممکن بود برسد. در نتیجه لازم بود که مقاومت فولاد ابزار برش فوق العاده بالا رود و در ضمن توانائی مقاومت در برابر سایش آنها نیز بنحو عمده ای افزایش یابد.

استفاده از کاربید تنگستن (Tungsten carbide) به عنوان ماده اصلی ابزاربرش موفقیت قابل ملاحظه‌ای همراه بود. کاربید تنگستن به صورت تکه های استوانه‌ای یا دکمه‌ای شکل در ماده بدنه ابزاربرش نشاند می‌شد. هر چند این تکه های کاربیدی مقاومت بسیار بالایی در برابر سایش از خود نشان می‌دادند، ولی از جنبه تحمل بارهای بسیار زیادی که ابزاربرش جدید باید تحمل می‌کردند، دچار محدودیت بودند. بهر حال، برای رفع این نقیصه و به منظور توزیع بهتر بارهای وارده، فاصله جاگذاری این تکه های کاربیدی کمتر و به هم نزدیکتر گردید، بدین ترتیب حفر تونل و سنگهای بسیار سخت (با مقاومت بیش از ۳۵۰ مگاپاسکال) با قطرهای بزرگ، از جنبه اقتصادی توجیه پذیر شد.

عملکرد TBM به وسیله پارامترهای زیر سنجیده میشود.

الف- سرعت نفوذ (penetration rate)

سرعت نفوذ از تقسیم طول حفاری شده به زمان حفاری به دست می‌آید. زمان حفاری مدت زمانی است که TBM مشغول حفاری بوده و مدت زمانهایی که کار نمی‌کرده در آن به حساب نمی‌آید.

زمان حفاری / طول حفاری شده = PR

ب- بهره‌وری دستگاه (utilization)

درصدی از زمان شیفت که صرف حفاری می‌شود.

۱۰۰ x زمان شیفت / زمان حفاری دستگاه = U

ج- سرعت پیشروی (advance rate)

زمان شیفت / طول حفاری شده = AR

در جدول ۳-۵ میانگینی از پارامترهای TBM بصورت نمونه آورده شده است. برای پیش‌بینی سرعت نفوذ محققین مختلف روش‌های گوناگونی را پیشنهاد کرده‌اند. خلاصه این روش‌ها در جدول ۳-۶ آورده شده است.

جدول ۳-۵- نمونه پارامترهای مربوط به حفاری با TBM

پارامتر	میانگین	بازه
طول پروژه (km)	3.8	0.1 - 36.0
قطر (m)	4.4	2.0 - 12.2
نرخ پیشروی (m/month)	375	5 - 2084
نرخ پیشروی (m/shift hr)	1.2	0.3 - 3.6
نرخ نفوذ (m/TBM hr)	3.3	0.6 - 8.5
نرخ نفوذ (mm/cutterhead revolution)	7.2	1.0 - 17.0
نرخ بهره‌وری (%)	38	5 - 69

جدول ۳-۶- روش های مختلف تعیین سرعت نفوذ

روش	رابطه	ملاحظات
Roxborough & Phillips (1975)	$P = \left(\frac{1}{(D-P)} \right)^{0.333} \times \left(\frac{F_n}{4.UCS \times tg\left(\frac{\theta}{2}\right)} \right)^{0.666}$	UCS بین ۷۰ تا ۲۰۵ مگاپاسکال، مقاومت کششی بین ۵.۵ تا ۱۳.۸ مگاپاسکال، عرض لبه ابزار برش ۱۱.۴ تا ۱۹ میلی متر، D ۳۸۱ تا ۴۳۲ میلی متر
P نفوذ دیسک بر حسب mm، D قطر ابزار برش بر حسب mm، F_n نیروی عمودی متوسط روی هر ابزار برش بر حسب N، θ زاویه لبه ابزار برش بر حسب درجه، UCS مقاومت فشاری تک محوره سنگ بر حسب MPa		
Graham (1976)	$P = \frac{3940 F_n}{UCS}$	
P نرخ نفوذ بر حسب mm/Rev ، F_n نیروی متوسط روی هر ابزار برش بر حسب kN، UCS مقاومت فشاری سنگ بر حسب kPa		
Farmer & Glossop (1980)	$P = \frac{624 F_n}{\sigma_{if}}$	بر مبنای ۶ پروژه حاصل شده است
P نرخ نفوذ بر حسب mm/Rev ، F_n نیروی متوسط روی هر ابزار برش بر حسب kN، σ_{if} مقاومت کششی سنگ بر حسب kPa		
Cassinelli (1982)	$P = -0.0059 RSR + 1.59$	
P نرخ نفوذ بر حسب متر بر ساعت، RSR رده بندی Rock Structure Rating		
Bamford (1984)	$P = 0.535.S - 8.49 - 0.00344.T - 0.000823N + 0.0137\phi$	لای سنگ با لایه بندی ۳۰ تا ۵۰ سانتی متر (پروژه Thompson در استرالیا)
S سختی چکش اشمیت، T نیروی محوری ماشین به تن، N شاخص نفوذ مخروطی بر حسب N/mm ، ϕ زاویه اصطکاک داخلی سنگ بر حسب درجه		

ادامه جدول ۳-۶- روش های مختلف تعیین سرعت نفوذ

روش	رابطه	ملاحظات
Sanio (1985)	$\frac{P_0}{P_{90}} = \frac{I_{s,50,90}}{I_{s,50,0}}$	تأثیر لایه بندی بر نرخ نفوذ
P_0 نرخ نفوذ موازی لایه بندی، P_{90} نرخ نفوذ عمود بر لایه بندی، $I_{s,50,90}$ شاخص بارگذاری نقطه ای عمود بر لایه بندی، $I_{s,50,0}$ شاخص بارگذاری نقطه ای موازی لایه بندی		
Haworth et al. (1986)	$\beta_1 = \frac{\sigma_c}{\sigma_t}, \beta_2 = \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t}$ $P = 26.78.e^{-0.24\beta_1}$ $P = 4\beta_2 10^{10} e^{-28.59\beta_2}$	نیروی محوری اعمال شده روی ابزار برش ۳.۱۶ کیلو نیوتن، و بر اساس داده های حاصل از آزمایش بر روی ماسه سنگ و مرمر بدست آمده اند.
β_2, β_1 تردی، σ_c مقاومت فشاری تک محوره، σ_t مقاومت کششی، P نرخ نفوذ بر حسب سانتی متر بر دقیقه		
Lislerud (1988)	$P = ib \times K_s \times K_d$	بر مبنای حفاری های انجام شده در سنگ های شیل، آهک، گنایس و بازالت
P نرخ نفوذ بر حسب mm/Rev ، ib نرخ نفوذ پایه بر حسب mm/Rev ، K_s ضریب اصلاح برای کلاس درزه ها و زاویه میان تونل و امتداد درزه ها، K_d ضریب اصلاح برای قطر ابزار برش		
Sundin & Wanstedt (1994)	$I_B = P_{BI} K_J$ $P = I_B F_n \times rpm \times 0.06$	گرانیت، میکاشیست و گنایس برای مقاومت فشاری ۶۵ تا ۲۰۰ مگاپاسکال؛ شاخص بارگذاری نقطه ای ۱ تا ۹ مگاپاسکال، شاخص سوشار ۱.۹ تا ۵.۹
I_B شاخص قابلیت حفر، P_{BI} شاخص نفوذ، K_J ضریب مربوط به درزه ها، F_n نیروی عمودی روی هر ابزار برش بر حسب kN ، rpm سرعت چرخش صفحه حفر بر حسب Rev/min		

باید در طراحی تونل‌های انحنادار، شعاع انحنا را طوری انتخاب نمود که از نظر عبور دستگاه TBM مسئله‌ای ایجاد نشود. خود TBM قادر به عبور از قوسهای افقی به شعاع ۴۰ تا ۸۰ متر می‌باشند ولی معمولاً سیستم پشتیبانی برای عبور نیاز به شعاع قوس ۱۵۰ الی ۴۵۰ متر دارد.

لزوما برای یک پروژه احتیاج به سفارش TBM جدید نیست و بعضاً از TBM های دست دوم می‌توان استفاده کرد و تا حدی با تغییر قطر و نیروی رانش و گشتاور مورد نیاز آن را برای پروژه جدید آماده نمود.

بر مبنای تحقیقات انجام شده توسط CIRIA بر روی ۶۵ تونل حفاری شده با TBM در آمریکا، اروپای غربی، استرالیا و آفریقای جنوبی نتایج زیر در مورد سرعت نفوذ بدست آمد (CIRIA, 1988):

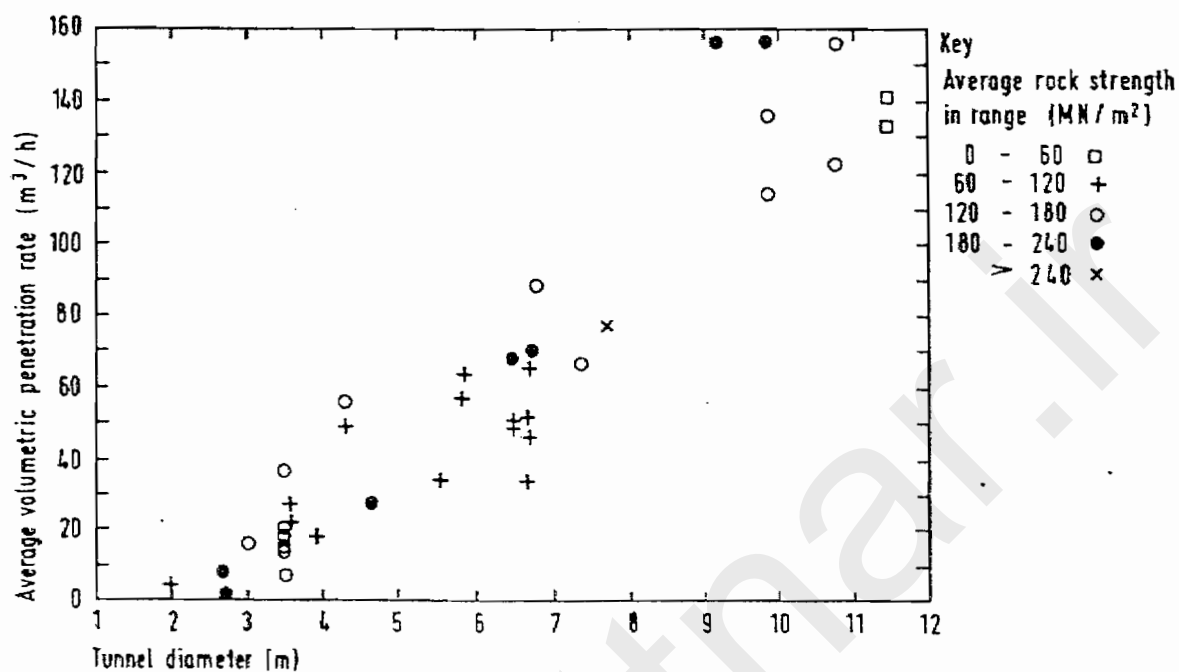
- حداکثر سرعت نفوذ لحظه‌ای (maximum instantaneous penetration rate) برابر ۷.۶۲ متر بر ساعت بود که مربوط به گرانودیوریت (granodiorite) با مقاومت فشاری حداکثر ۲۰۷ مگاپاسکال بود.
- مقدار میانگین تمام حداکثر سرعت‌های نفوذ لحظه‌ای برابر ۳.۸۸ متر در ساعت و
- مقدار میانگین تمام سرعت‌های نفوذ متوسط (average penetration rates) برابر ۱.۸۳ متر در ساعت بود.

در شکل ۳-۱۹، تغییرات سرعت نفوذ متوسط حجمی (average volumetric penetration rate) برای قطرهای مختلف تونل برای محدوده‌های گوناگون مقاومت سنگ نشان داده شده‌است. سرعت پیشروی حداکثر (maximum advance rate) با زیادتر شدن بازه زمانی در نظر گرفته شده، کاهش پیدا می‌کند. در تحقیقات CIRIA حداکثر سرعت پیشروی در مدت زمان یک روز، یک هفته و یک ماه برای یک تونل حفاری شده در ماسه سنگ و سنگ آهک بدست آمد:

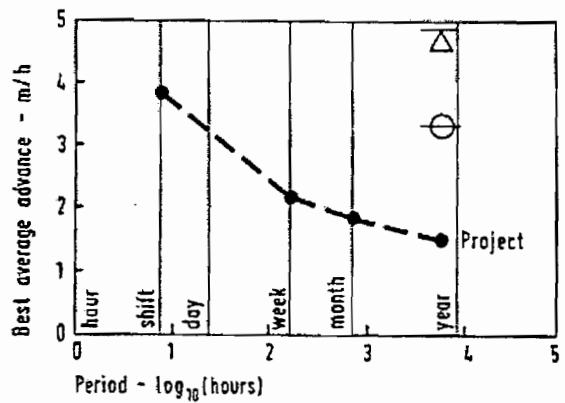
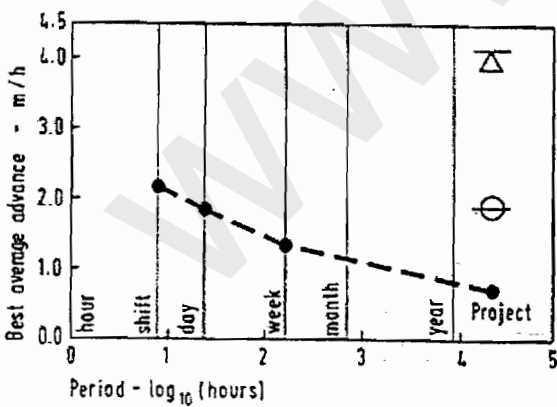
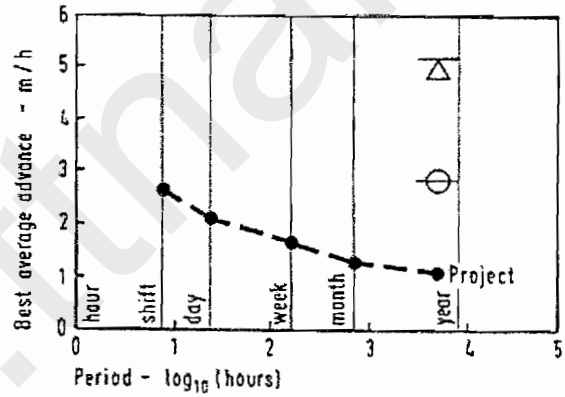
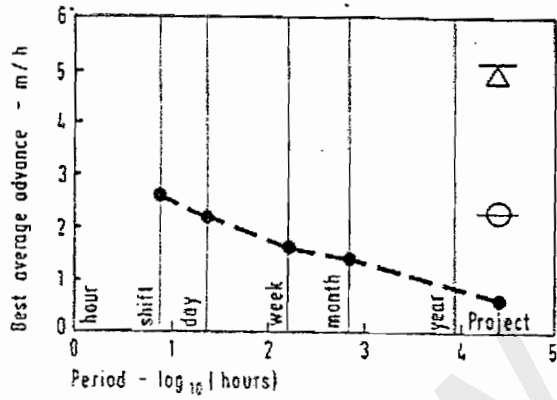
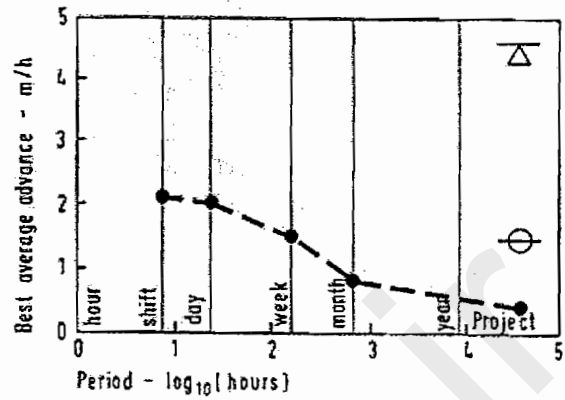
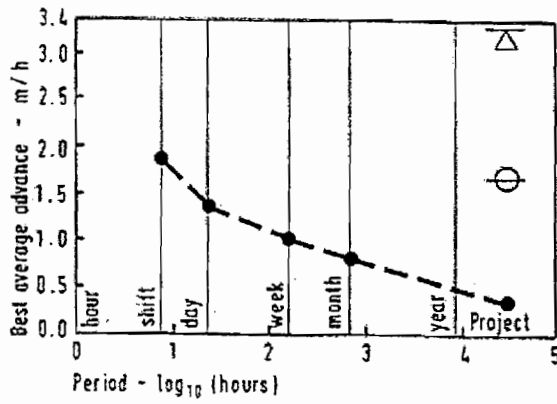
- بهترین پیشرفت روزانه، ۴.۱۵ متر در ساعت
- بهترین پیشرفت هفتگی، ۳.۰۴ متر در ساعت
- بهترین پیشرفت ماهانه، ۲.۶۸ متر در ساعت
- پیشرفت در طول پروژه، ۱.۰۹ متر در ساعت

در تحقیقات CIRIA حداکثر سرعت پیشروی ثبت شده طی یک شیفت برابر ۴.۴۶ متر در ساعت و در گرانودیوریت بود که برای آن حداکثر سرعت نفوذ لحظه‌ای ۷.۶۲ متر بر ساعت بدست آمده بود. بهترین سرعت پیشرفت در طول پروژه برابر ۱.۸۹ متر در ساعت و مربوط به سنگ آهک با مقاومت نسبتاً بالا و

یکنواخت بود. در شکل ۳-۲۰ سرعت پیشروی در بازه‌های مختلف زمانی برای ۱۲ تا از پروژه‌های بررسی شده توسط CIRIA آورده شده‌است.

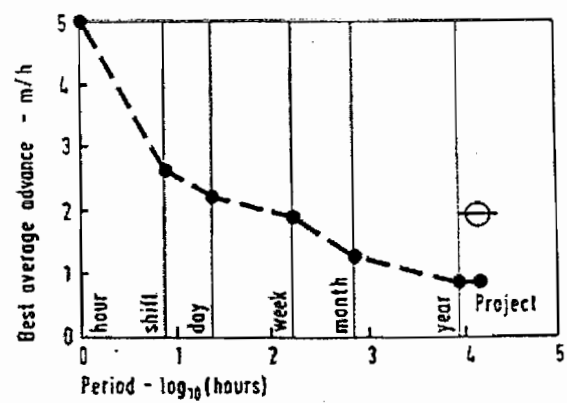
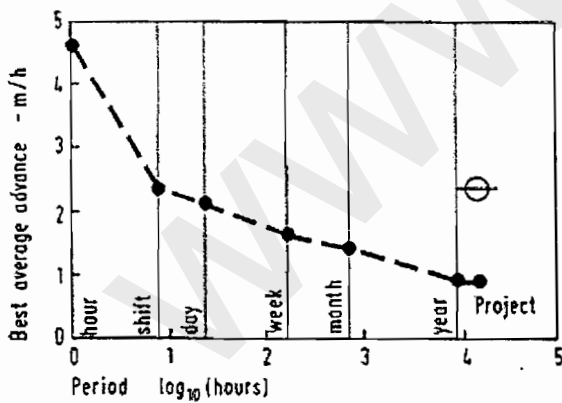
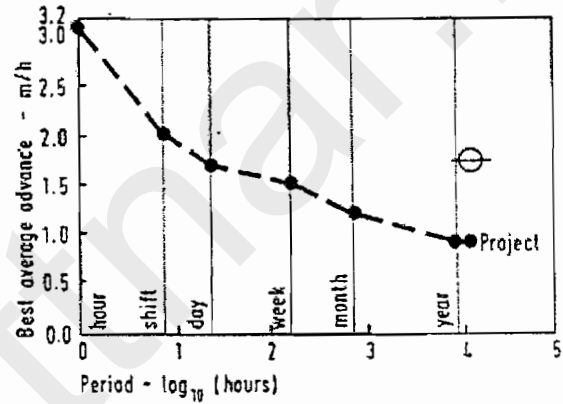
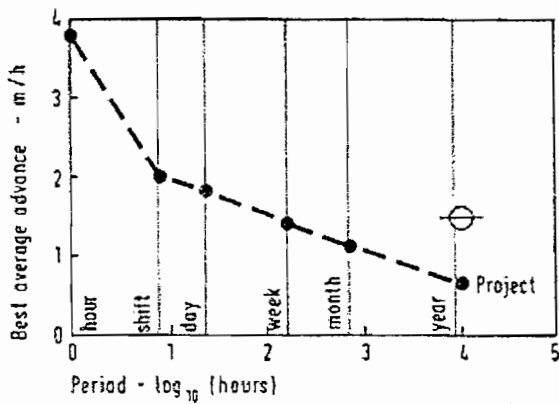
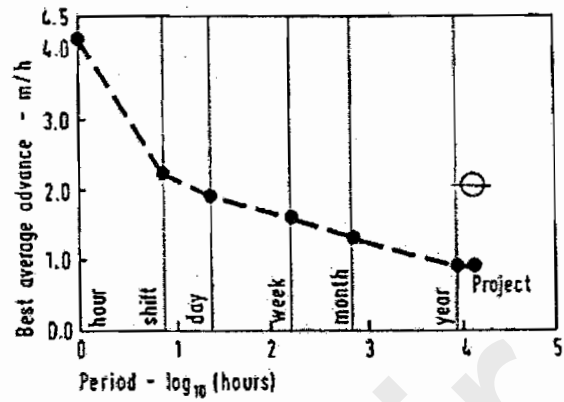
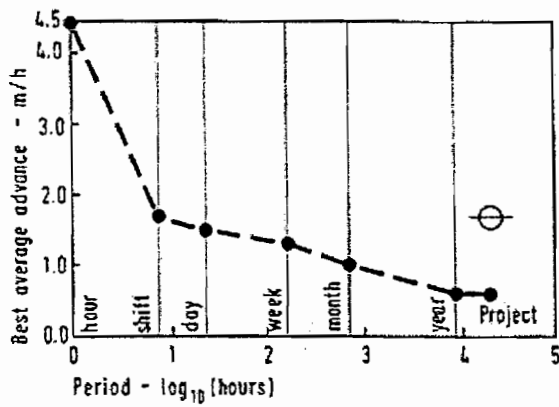


شکل ۳-۱۹- تغییرات سرعت نفوذ متوسط حجمی برای قطرهای مختلف تونل برای محدوده‌های گوناگون مقاومت سنگ



شکل ۳-۲۰- بهترین سرعت پیشروی برای ۱۲ تونل از تونلهای مطالعه شده

توسط CIRIA



ادامه شکل ۳-۲۰- بهترین سرعت پیشروی برای ۱۲ تونل از تونلهای مطالعه شده
توسط CIRIA

۳-۲-۵ تخمین کارایی TBM با استفاده از Q_{TBM}

قبلا ملاحظه شد که شاخص Q بصورت زیر تعریف میشود:

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

برای تعریف Q_{TBM} ابتدا پارامتر Q_0 را بصورت زیر تعریف می کنیم (Barton, 2000):

$$Q_0 = \frac{RQD_0}{J_n} \times \left(\frac{J_r}{J_a}\right)_c \times \frac{J_w}{SRF}$$

که در آن RQD_0 مقدار RQD در امتداد حفر تونل می باشد. J_a, J_r برای دسته درزه ای که بیشترین اثر در نفوذ ابزار برش (cutter) را دارد، انتخاب می شوند.

$$Q_{TBM} = Q_0 \times \frac{SIGMA}{F^{10}/20^9} \times \frac{20}{CLI} \times \frac{q}{20} \times \frac{\sigma_\theta}{5}$$

در رابطه فوق $SIGMA$ از روابط زیر حساب می شود:

برای گسیختگی فشاری (compressive failure):

$$SIGMA = SIGMA_{cm} = 5\gamma Q_c^{\frac{1}{3}} \rightarrow Q_c = Q_0 \times \frac{\sigma_c}{100}$$

و برای گسیختگی کششی (tensile failure):

$$SIGMA = SIGMA_{tm} = 5\gamma Q_t^{\frac{1}{3}} \rightarrow Q_t = Q_0 \times \frac{I_{50}}{4}$$

F : نیروی متوسط اعمال شده بر ابزار برش بر حسب تن نیرو که توسط ۲۰ تن نیرو نرمال شده است.

CLI : شاخص عمر ابزار برش (cutter life index)

q : محتوی کوارتز بر حسب درصد

σ_θ : تنش متوسط دو محوری در سینه حفاری (average biaxial stress on tunnel face) بر حسب مگاپاسکال که برای عمق تقریباً ۱۰۰ متر نرمال شده است.

سرعت نفوذ (penetration rate) و سرعت پیشروی (advance rate) دستگاه TBM از روابط زیر بدست می آید:

$$PR \approx 5Q_{TBM}^{-\frac{1}{5}}$$

$$AR \approx 5Q_{TBM}^{-\frac{1}{5}} T^m$$

m از رابطه زیر حساب می شود:

$$m = m_1 \left(\frac{D}{5}\right)^{0.2} \left(\frac{20}{CLI}\right)^{0.15} \left(\frac{q}{20}\right)^{0.1} \left(\frac{n}{2}\right)^{0.05}$$

m_1 = گرادیان اولیه

D : قطر TBM بر حسب متر

n : تخلخل بر حسب درصد

زمان برای تکمیل طولی معین از یک تونل با شرایط زمین شناسی مشخص از رابطه زیر برآورد می گردد:

$$T = \left(\frac{L}{PR}\right)^{\frac{1}{1+m}}$$

مثال عملی:

در این قسمت، اطلاعات ورودی (صفحه I) و محاسبات مربوط به پیش بینی عملکرد (صفحه II) برای حالتی فرضی مربوط به تونلی به طول ۱۶ کیلومتر دارای طول های مساوی (۴ کیلومتر) از ماسه سنگ (توده ای، ساینده)، فیلیت (با درزه داری ایده آل)، میکاشیست (با درزه داری ایده آل) و گرانیت (توده ای و خیلی محکم) ارائه شده است. روش Q_{TBM} سرعت های پیشروی بسیار مناسب را برای فیلیت و شیست و سرعت های پیشروی ضعیفی را برای ماسه سنگ و گرانیت برآورد می کند.

صفحه I- اطلاعات ورودی

الف- پایداری (و گرادیان اولیه m_1)

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \left(\frac{J_r}{J_a}\right)_s \times \left(\frac{J_w}{SRF}\right) \quad (\text{نامناسب ترین برای پایداری})$$

ناحیه	m_1	RQD/J_n	J_r/J_a	J_w/SRF	Q
۱- ماسه سنگ	-۰.۱۷	۱۰۰/۹	۲/۱	۰.۵/۱	۱۱
۲- فیلیت	-۰.۱۹	۳۵/۹	۱.۵/۱	۱/۱	۶
۳- میکاشیست	-۰.۲	۵۰/۹	۱/۱	۰.۶۶/۱	۴
۴- گرانیت	-۰.۱۸	۱۰۰/۶	۲/۱	۰.۶۶/۱	۲۲

ب- Q_0 جهت دار شده (در جهت تونل سازی)

$$Q_0 = \left(\frac{RQD}{J_n}\right) \times \left(\frac{J_r}{J_a}\right)_c \times \left(\frac{J_w}{SRF}\right) \quad (\text{موثرترین ابزار برش})$$

ناحیه	β°	RQD/J_n	J_r/J_a	J_w/SRF	Q_0
۱- ماسه سنگ	۲۰/۷۰	۱۰۰/۹	۲/۱	۰.۵/۱	۱۱
۲- فیلیت	۶۰	۳۰/۹	۱.۵/۱	۱/۱	۵
۳- میکاشیست	۶۰	۴۵/۹	۱/۱	۰.۶۶/۱	۳
۴- گرانیت	۱۰/۸۰	۱۰۰/۶	۲/۱	۰.۶۶/۱	۲۲

ج- مقاومت توده سنگ (SIGMA)

$$SIGMA_{cm} = 5\gamma Q_c^{\frac{1}{3}} \rightarrow Q_c = Q_0 \times \frac{\sigma_c}{100}$$

$$SIGMA_{tm} = 5\gamma Q_i^{\frac{1}{3}} \rightarrow Q_i = Q_0 \times \frac{I_{50}}{4}$$

ناحیه	γ	σ_c	Q_c	$SIGMA_{cm}$ (MPa)	I_{50}	Q_i	$SIGMA_{tm}$ (MPa)
۱- ماسه سنگ	۲.۵	۱۲۵	۱۴	۳۰	۵	---	---
۲- فیلیت	۲.۶	۷۵	۴	۲۱	۱	۱.۲۵	۱۴
۳- میکاشیست	۲.۶	۱۵۰	۴.۵	۲۱	۴	۳	۱۹
۴- گرانیت	۲.۷	۲۰۰	۴۴	۴۸	۸	---	---

|| یا $\perp$ || یا $\perp$ د- Q_{TBM}

$$Q_{TBM} = Q_0 \times \frac{SIGMA}{F^{10}/20^9} \times \frac{20}{CLI} \times \frac{q}{20} \times \frac{\sigma_\theta}{5} \quad (\text{برش دهنده } 20 \text{ tnf با } \times 20^9 / F^{10} = 0.0054)$$

ناحیه	Q_0	$SIGMA$ (MPa)	$F(tnf)$	CLI	$q(\%)$	$\sigma(MPa)$	Q_{TBM}
۱- ماسه سنگ	۱۱	۳۰	۲۵	۱۰	۷۰	۸	۲۰
۲- فیلیت	۵	۱۴	۲۵	۲۰	۲۰	۸	۰.۶
۳- میکاشیست	۳	۱۹	۲۵	۱۵	۲۰	۸	۰.۷
۴- گرانیت	۲۲	۴۸	۲۵	۱۰	۳۵	۱۲	۴۸

ل- گرادیان (m)

$$m = m_1 \left(\frac{D}{5}\right)^{0.2} \left(\frac{20}{CLI}\right)^{0.15} \left(\frac{q}{20}\right)^{0.1} \left(\frac{n}{2}\right)^{0.05}$$

ناحیه	m_1	$D(m)$	$n(\%)$	m
۱- ماسه سنگ	-۰.۱۷	۱۰.۷	۱۵	-۰.۲۷
۲- فیلیت	-۰.۱۹	۱۰.۷	۵	-۰.۲۳
۳- میکاشیست	-۰.۲	۱۰.۷	۲	-۰.۲۴
۴- گرانیت	-۰.۱۸	۱۰.۷	۱	-۰.۲۴

صفحه II- محاسبات

م- سرعت نفوذ

$$PR \approx 5Q_{TBM}^{-\frac{1}{5}} \quad AR = PR \times T^m$$

ناحیه	Q_{TBM}	$PR_{(m/hr)}$	$AR_{(m/hr)}$
۱- ماسه سنگ	۲۰	۲.۷	۰.۱۸
۲- فیلیت	۰.۶	۵.۵	۰.۷۷
۳- میکاشیست	۰.۷	۵.۴	۰.۶۷
۴- گرانیت	۴۸	۲.۳	۰.۲۲

ه- زمان برای پیشروی طول L

$$T = \left(\frac{L}{PR} \right)^{\frac{1}{1+m}}$$

ناحیه	$L(m)$	m	$\left(\frac{1}{1+m} \right)$	$T(hr)$	$T \times AR = L^*$	ساعت در سال فرض میشود	حداکثر ۸۷۳۶
۱- ماسه سنگ	۴۰۰۰	-۰.۲۷	۱.۳۷	۲۲۰۷۰	۴۰۰۲	۲.۵۳ سال	
۲- فیلیت	۴۰۰۰	-۰.۲۰	۱.۳	۵۲۵۰	۴۰۲۶	۰.۶ سال	
۳- میکاشیست	۴۰۰۰	-۰.۲۴	۱.۳۲	۶۱۴۰	۴۰۸۷	۰.۷ سال	
۴- گرانیت	۴۰۰۰	-۰.۲۴	۱.۳۲	۱۸۹۳۳	۴۰۹۷	۲.۱۷ سال	
				$\sum T = ۵۲۳۹۳$ ساعت		۶ سال	
				$\sum L = ۱۶۰۰۰m$			

* کنترل تقریبی AR و T (خطاهای ناشی از گرد کردن)

و- عملکرد کلی

PR, ΣL , ΣT (متوسط وزنی)

$$\overline{PR} = \left(\frac{PR_1 L_1 + PR_2 L_2 + \dots}{L_1 + L_2 + \dots} \right)$$

$$\overline{AR} = \left(\frac{PR_1 L_1 + PR_2 L_2 + \dots}{L_1 + L_2 + \dots} \right)$$

نواحی	$\Sigma L(m)$	$\Sigma T(hr)$	$\overline{PR}$	$\overline{AR}$
۴، ۲، ۳	۱۶۰۰۰	۵۲۳۹۳	$۶۳۶۰۰ / ۱۶۰۰۰ = ۳.۹۸$	$۷۲۸۰ / ۱۶۰۰۰ = ۰.۴۶$

ی- سرعت پیشروی در انتهای پروژه

$$AR = \overline{PR} \times \Sigma T^m \text{ (انتها)}$$

نواحی	$\overline{m}$	$\overline{PR}$	$\overline{AR}$	AR (انتها)
۴، ۳، ۲، ۱	۰.۲۴۵	۳.۹۸	۰.۴۶	۰.۲۸

حفاری ایده آلی که برای فیلیت و شیبست پیش بینی شده است به وضوح امتیاز بزرگ حفاری با TBM را نشان می‌دهد. در این مثال، با ماسه سنگ و گرانیات، که حفاریشان دشوارتر است، در دو انتهای تونل برخورد می‌شود و می‌توان در حالی که پروژه منتظر حمل و مونتاژ TBM است، این قسمت ها را به روش چالزنی و انفجار حفر کرد.

۳-۲-۶ انتخاب نوع TBM و طراحی آن

اولین قدم در انتخاب TBM، تصمیم گیری در مورد این است که از سه نوع دستگاه TBM باز، دستگاه تک‌سپری و دستگاه دو سپری، کدام نوع دستگاه برای تونل مورد نظر دارای کارایی بیشتری است. همانطور که قبلاً ذکر شد هر کدام از این TBM ها ویژگی‌های خاصی داشته و برای شرایط معینی مناسب هستند.

انتخاب نوع TBM و طراحی آن بر اساس پارامترهای مختلفی است که براساس آنها شرکت سازنده TBM اقدام به ساخت آن می‌کند. این اطلاعات و پارامترها از طریق کارفرما یا پیمانکار در اختیار شرکت سازنده دستگاه قرار می‌گیرد. در بعضی موارد ممکن است افرادی از طرف شرکت‌های سازنده نیز از محل پروژه بازدید نمایند. از جمله پارامترهای موثر در انتخاب نوع TBM و طراحی آن عبارتند از:

الف - وضعیت زمین شناسی و ژئومکانیکی مسیر تونل:

- وضعیت توده سنگ از نظر میزان درزه و شکاف، و زمان خود پایداری تونل
- وضعیت آب های زیرزمینی
- وضعیت تنش های برجا و امکان وجود شرایط فشارندگی (squeezing conditions)
- مقاومت فشاری تک محور سنگ (UCS)
- قدرت ساینده گی سنگ

ب - هندسه تونل:

- قطر تونل
- شیب تونل
- طول تونل

ج - زمان پروژه

پس از انتخاب نوع TBM، و با در نظر گرفتن شرایط فوق، مشخصات TBM از جنبه های مختلف از جمله موارد زیر مشخص می شود:

- نیروی رانش (thrust)
- کوپل پیچشی (torque)
- سرعت چرخش صفحه حفاری (RPM)
- نوع ابزار برش و نحوه آرایش آنها روی صفحه حفاری
- سیستم پشتیبانی و از جمله نیاز به وسایل نصب پایدار سازی نظیر راکبولت و یا ضرورت وجود وسایل پیش گمانه زنی (probe drilling)

۳-۲-۷ مزایا و معایب TBM

مزایای استفاده از TBM را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- سرعت پیشروی بالا
- پیشروی غیر منقطع
- آسیب کمتر به توده سنگ پیرامون تونل
- نیاز کمتر به پایدارسازی
- امنیت بیشتر کارگران
- امکان کنترل و هدایت از راه دور
- اقتصادی بودن در تونل های طویل

از معایب TBM می‌توان به مقطع دایره‌ای شکل ثابت، انعطاف پذیری محدود در مقابل تغییرات وضعیت زمین شناسی، هزینه سرمایه گذاری بالا، زمان طولانی مونتاژ و استقرار دستگاه در سینه کار اشاره کرد.

۸-۲-۳ شرکت‌های اصلی سازنده TBM

شرکت‌های متعددی در ساخت دستگاه‌های TBM فعالیت دارند که از جمله آنها می‌توان به شرکت‌های زیر اشاره نمود:

- Robbins
- Wirth
- CTS
- Voest Alpine
- Herrenknecht

۳-۳ حفاری با کله‌گاو (roadheader)

اصولا بعد از TBM، کله‌گاو مهمترین وسیله برای حفاری به روش مکانیکی است. کله‌گاو در ابعاد و اندازه‌های مختلف وجود دارد. اغلب کله‌گاو ها دارای قسمت‌های زیر هستند (شکل ۳-۲۱):

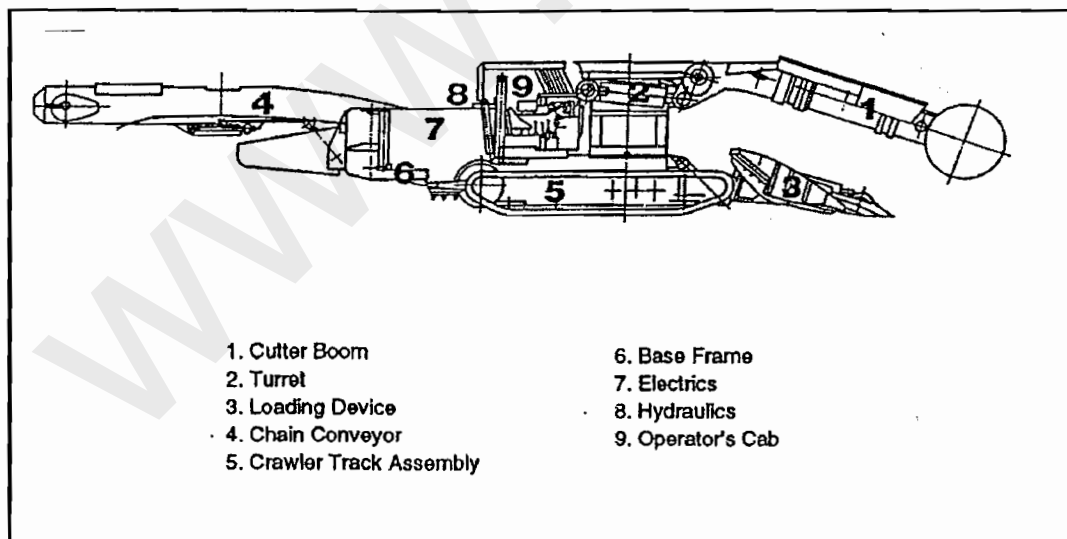
- تاج حفار
- بازوی هیدرولیکی که تاج حفار را به محل مورد نظر می‌رساند (۱)
- بخشی برای ایجاد امکان حرکت افقی کلگی (۲)
- بخش بارگیری (۳)
- تسمه نقاله برای انتقال مواد حفاری شده (۴)
- اتاقک اصلی که دارای کنترل‌های الکتریکی و هیدرولیکی و کابین اپراتور است (۶)
- وسیله حرکت روی آن که اغلب چرخ زنجیری است (۵)

بطور کلی دو نوع کله‌گاو وجود دارد:

۱- کله‌گاو از نوع تاج مخروطی (spiral type cutting head)

۲- کله‌گاو از نوع تاج طبلی (drum type cutting head)

در کله‌گاو تاج مخروطی، تاج حفار حول محوری موازی با بازوی حفاری (boom) می‌چرخد و در کله‌گاو تاج طبلی، تاج حفار حول محوری عمود بر بازو دوران می‌کند (شکل ۳-۲۲ و ۳-۲۳).



شکل ۳-۲۱- اجزای یک دستگاه کله‌گاو

۳-۱- تاریخچه دستگاههای کله گاوی

ابداع دستگاههای کله گاوی به طور مشخص در دهه ۱۹۴۰ در اروپا صورت گرفت. تا دهه ۱۹۵۰ انواع قابل توجهی از دستگاههای کله گاوی در صحنه تونلسازی پا به عرصه نهادند. پیشرفتهای عمده ای که در طول دهه ۱۹۵۰ بر روی ماشینهای بازوئی در شوروی سابق صورت گرفت، منجر به معرفی دستگاههای کله گاوی مدل PK3 روسی در سال ۱۹۶۱ در انگلستان شد.

در سالهای اخیر، توجه قابل ملاحظه ای بر افزایش ظرفیت انواع دستگاههای کله گاوی برای دستیابی به سرعتهای بیشتر تونلسازی و افزایش قابلیتهای آنها برای حفاری سنگهای سخت تر، متمرکز شده است. این مسائل موجب افزایش قابل توجهی در وزن چنین دستگاههایی گردیده است. دستگاههای کله گاوی به عنوان یک دستگاه تونلسازی، انعطاف پذیری و قابلیت جابجائی خوبی در شرایط مناسب را دارا می باشند.

با ابداع دستگاههای کله گاوی سنگین تر، دامنه کاربرد این دستگاهها برای شرایط سنگی محکمتر گسترش یافت. در جریان یک بررسی که در سال ۱۹۸۰ انجام گرفت، نشان داده شد که کاربرد دستگاههای کله گاوی در انگلستان که دارای وزنی بین ۲۱/۵ تا ۸۰ تن می باشند، برای حفر سنگهایی با مقاومت ۶۰ تا ۱۰۰ مگاپاسکال توجیه اقتصادی دارند. تاج حفار این دستگاهها از نوع مخروطی بوده، توان مصرفی تاج ۳۰ تا ۱۰۰ کیلووات و توان مصرفی کل دستگاه ۸۶ تا ۶۲۵ کیلو وات بوده است.

۳-۲- قدرت و وزن دستگاههای کله گاوی

انعطاف پذیری عملیاتی، قابلیت حفر مقاطع تونل باشکلهای مختلف و قابلیت مانور آن برای ایجاد تقاطعها از جمله خصوصیات اصلی دستگاههای کله گاوی هستند. دستگاههای سبکتر قدیمی (حدود ۲۵ تن یا کمتر) در حفر سنگهای متوسط تا سخت مواجه با عدم موفقیت شدند، زیرا لرزش دستگاه باعث وارد آمدن خسارت به سرمتها و اغلب خود دستگاه می شد. در انواع دستگاههای سنگین کله گاوی (۹۰ تن به بالا) تمام قسمتها از ساختار پیشرفته تر و محکمتری برخوردار شده اند و به تناسب آن قدرت دستگاه افزایش یافته و هزینه های تعمیر و نگهداری و زمان سرویس تا حد قابل توجهی کاهش یافته و در نتیجه حفر سنگهای سخت تر توسط این دستگاهها از جنبه اقتصادی توجیه یافته است.

یک دستگاه کله گاوی در انگلستان برای حفر سنگهایی با مقاومت بالای ۱۰۰ مگاپاسکال که در بعضی شرایط به ۲۰۰ مگاپاسکال می رسید، بکار گرفته شد که دارای وزن ۱۵۰ تن، توان تاج حفاری ۲۲۵ کیلووات و گشتاور خروجی ۳۱۲ کیلونیوتن- متر بوده است.

۳-۳-۳ مبانی برش دستگاه های کله گاوی طبلیکی و مخروطی

دستگاههای کله گاوی طبلیکی عمل حفاری را بصورت شخم زدن (ripping) و کله گاوی مخروطی حفاری را بصورت سایشی (milling) انجام می دهد. در انگلستان تقریباً کلیه دستگاههای کله گاوی مورد استفاده از نوع مخروطی می باشند. در آلمان ۶۵٪ از نوع مخروطی و ۳۵٪ از نوع طبلیکی و در آمریکا، کانادا و مکزیک ۷۵٪ از نوع طبلیکی هستند.

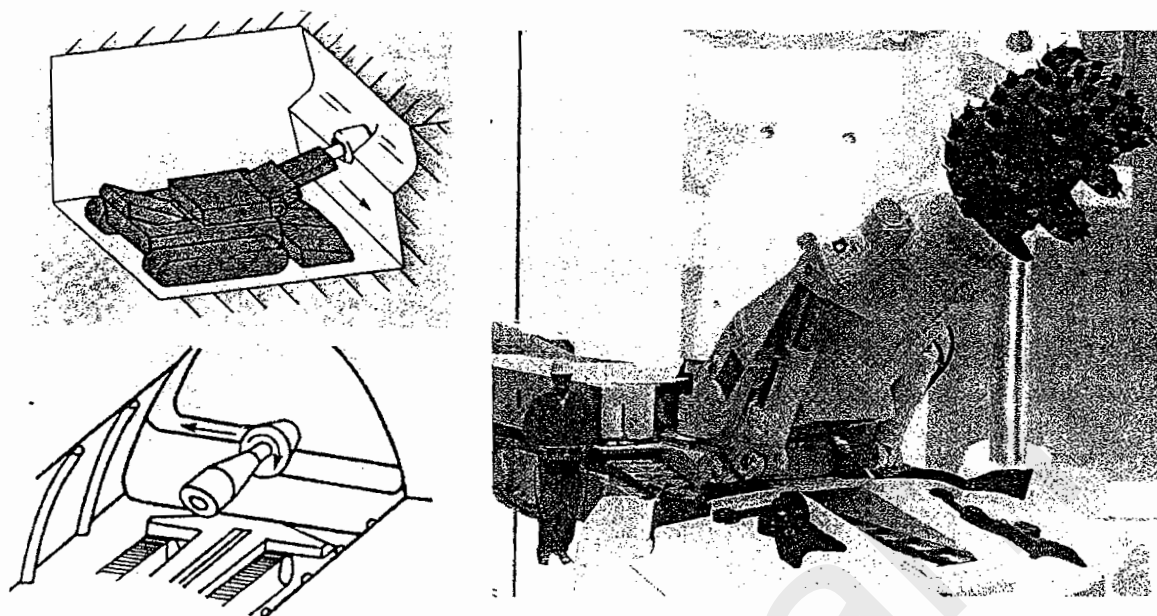
سیستم برش نوع مخروطی:

معمولترین شکل تاج حفاری در دستگاههای کله گاوی، مخروطی است که حول محوری در امتداد محور بازوی دستگاه دوران می کند. طرح تاج برشی مخروطی و موقعیت و جهت نصب آن بر روی بازو بگونه ای است که در موقعیت بهینه جهت اعمال حداکثر نیروی برشی بر جبهه کار تونل قرار گیرد. به همین دلیل این نوع دستگاههای کله گاوی توانسته اند قابلیت اجرایی پذیرفته شده ای در شرایط زمین ساختی مشکل و محکم از خود ارائه دهند و کاربرد گسترده ای در اروپا پیدا کنند. در سیستم مخروطی در مقایسه با طبلیکی، زمان کمتری صرف خرد کردن یا نفوذ اولیه (فروروی) در سینه کاری متشکل از سنگ سخت شده و امکان حفاری سریعتر در اینگونه سنگها فراهم می شود.

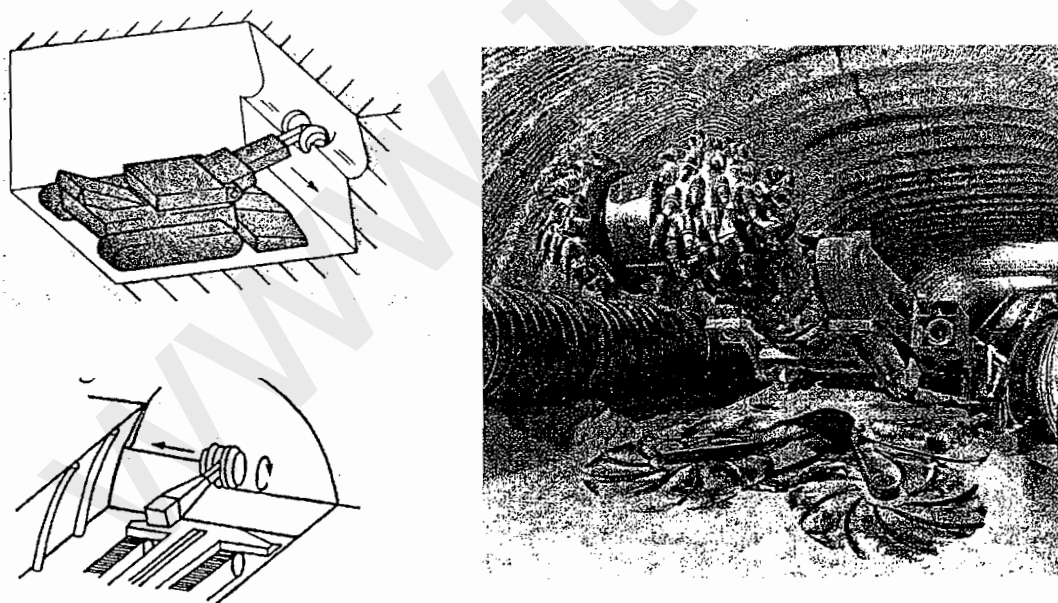
سیستم برش نوع طبلیکی:

مکانیزم برش شخم زدن یا برش نوع طبلیکی به طور گسترده ای در دستگاههای استخراج پیوسته (continuous mining machine) برای برش شرایط سنگی نسبتاً ضعیف همچون جبهه کارهای ذغالسنگی یا انواع مختلفی از سنگهای رسوبی پذیرفته شده است. بطور کلی برای شرایط سنگی سست، این مکانیزم برش سرعت برش خوبی به دست می دهد. دستگاههای حفار طبلیکی ۲۰ تا ۳۰ درصد سبکتر از دستگاههای حفار مخروطی با ظرفیت یکسان هستند. شرایط سنگی سخت یا محکم مستلزم تمرکز نیروهای برشی، بویژه در شروع برش جبهه کار تونل می باشد و سیستم برش نوع مخروطی در این گونه موارد موثرتر و کاراتر از سیستم برش نوع طبلیکی می باشد.

ویژگیهای اصلی سیستم برش نوع طبلیکی عبارت است از توانایی حفاری سطح مقطعهای بزرگ و ظرفیت بالای حفاری آنها، که این ویژگیها این دستگاه را در شرایطی که محصول یا خروجی انبوه مطلوب باشد، به صورت بسیار جذاب در آورده است و باعث به کار گیری در عملیات متعدد معدنکاری شده است.



شکل ۳-۲۲- نمونه یک دستگاه کله‌گاو با تاج حفار مخروطی و نحوه حفاری آن



شکل ۳-۲۳- نمونه یک دستگاه کله‌گاو با تاج حفار طبلکی و نحوه حفاری آن

۳-۳-۴ ابزار برش

با توسعه و پیشرفت ابزار برش به منظور بر آوردن نیازها و همپایی با پیشرفت دستگاههای کله گاوی سه نوع ابزار برش مطرح شد:

- سر مته های مخروطی (point attack picks)
- سر مته های شعاعی بزرگ (large radial picks)
- سر مته های جلو بر (forward attack picks)

سر مته های مخروطی:

یکی از ویژگیهای اصلی سر مته های مخروطی، قابلیت چرخش آن در درون پایه تا زمان سائیده شدن آن می باشد. این امر باعث افزایش عمر و کارایی سر مته ها و در نتیجه افزایش زمان بین تعویض سر مته ها می شود.

سر مته های شعاعی بزرگ:

مهمترین ویژگی این سر مته ها دسترسی به راندهای بالای برش همراه با کاهش میزان گرد و غبار می باشد اندازه بزرگ این سر مته ها، کاربرد آنها را در شرایط سنگی سست تا متوسط، مطلوب می سازد. کاربرد سر مته های شعاعی بزرگ در سنگهای سخت، می تواند موجب وارد آمدن سریع خسارت به سر مته و کاهش راندها برش و بروز لرزشهای شدید در دستگاه شود.

سر مته های جلو بر:

این سر مته ها به گونه ای طراحی شده اند که در مقایسه با سر مته های شعاعی، نیروی محوری بیشتری را در جریان برش به سنگ منتقل می کنند. پایه سر مته ها (pickbox) برای اینکه تحمل نیروهای برشی بیشتری را داشته باشند، بنحو مناسبتری تنظیم شده اند. ساق سر مته ها (pick shank) کمتر از ساق سر مته های شعاعی در معرض آسیب پذیری قرار دارند و بهتر قابل انطباق با سر مته های مخروطی هستند. آبفشانها با موفقیت همراه با سر مته های جلو بر بکار گرفته شده اند.

۳-۳-۵ توانایی برش دستگاه کله گاوی

تجارب حاصل در انگلستان نشان می دهد که دستگاههای کله گاوی قادر به حفر سنگها با دامنه مقاومتی متفاوت هستند، لیکن ضعفهای ساختاری در سنگ نظیر درزه ها و صفحات لایه بندی می توانند محدودیتهایی در جریان حفر به وجود آورند. مطالب کلی در مورد توانایی برش دستگاه کله گاوی در جدول ۳-۷ آورده شده است.

یک عامل محدود کننده در رابطه با قدرت برش، این نکته است که با افزایش قدرت برش، هزینه سر مته افزایش می یابد. سختی اجزای برشی و حفظ قدرت مؤثر برش در دماهای بالای حاصل از اصطکاک، از

ویژگیها و عوامل مهم می‌باشند. کاهش سرعت سرما به منظور افزایش عمر سرماها و حفظ قدرت برش ایجاب می‌کند که از دستگاههای کله‌گاو سنگین‌تری استفاده شود، که این امر خود معایبی نظیر افزایش هزینه‌ها و کاهش انعطاف پذیری عملیاتی و تعمیراتی را به همراه دارد. پیشرفتهایی که در زمینه تولید دستگاههای کله‌گاو سنگین در سالهای اخیر صورت گرفته، ضمن حفظ ویژگیهای برشی مؤثر سرماها، امکان افزایش قدرت حفاری انواع سنگهای سخت تر را نیز میسر ساخته است.

جدول ۳-۷- توانائی حفاری دستگاههای کله‌گاو (Whittaker and Firth, 1990)

انواع اصلی کله‌گاو	توانائی یا قدرت برش
۱- دستگاههای سبک	۱- قادر به برش سنگهایی با مقاومت ۸۰ مگاپاسکال بطور موفقیت آمیز می‌باشد.
	۲- در سنگهایی با مقاومت بیش از ۸۰ مگاپاسکال می‌تواند مشکلاتی در برش بروز کند.
۲- دستگاههای سنگین	۱- حفر موفق سنگهایی با مقاومت تا ۱۰۰ مگاپاسکال.
	۲- در سنگهایی با مقاومت بیش از ۱۵۰ مگاپاسکال وبالاتر نمی‌توان موفق بودن حفر را تضمین کرد.
	۳- یک ماسه‌سنگ متراکم با مقاومت ۲۰۰ مگاپاسکال توسط یک دستگاه کله‌گاو انگلیسی-روسی در انگلستان با موفقیت حفر شد.

۳-۳-۶ کنترل دستگاههای کله‌گاو

تجارب حاصل از کار با دستگاههای کله‌گاو در معادن ذغالسنگ انگلستان نشان داده است که محدودیت عمده ناشی از مشکل تطبیق قابلیت‌های دستگاه با شرایط متغیر لایه‌ها بوده است (بعنوان مثال کنترل میزان نیروی وارد بر سطح سینه کار با توجه به تغییر مقاومت لایه‌ها). عملکرد دستگاه در این گونه موارد، بستگی زیادی به مهارت اپراتور دستگاه دارد. برشهای کم عمق همراه با نفوذ محدود و نرخ بالای سایش سرما می‌تواند ناشی از احتیاط بیش از حد اپراتور باشد. برعکس نرخهای بالای نفوذ یا سرعت پیشروی زیاد در سنگ سخت می‌تواند موجب وارد آمدن خسارت به سرماها و تاج حفار و همچنین لرزش دستگاه شود.

طراحی به وسیله کامپیوتر (CAD) کمک مهمی برای کله‌گاو بویژه از جنبه طراحی تاج حفار و جانمایی، فاصله داری و نحوه قرارگیری (positioning) بهینه سرماها بوده است. پیشرفتهای حاصله در زمینه هیدرولیک و میکروالکترونیک محدوده روشهای کنترلی جدید را به صورت وسیعی گسترش

بخشیده است و در نتیجه سرعت پیشروی و قابلیت اطمینان به دستگاه افزایش یافته است. سرمته‌های طراحی شده جدید و سیستم‌های آبفشانی که اخیراً طراحی شده اند، پتانسیل بالائی برای بهبود عملکرد و کنترل دستگاه‌های کله‌گاوی از خود ارائه داده‌اند.

۳-۳-۷ کاربرد کله‌گاوی‌ها در روش NATM

تونلسازی به روش NATM به دلیل مقرون به صرفه تر بودن تونلسازی با این روش تحت شرایط مختلف سنگ و دیگر عوامل محیطی، روشی فراگیر و عمومی شده است. کیفیت فضای حفر شده با این روش یک عامل مهم است و دستگاه‌های کله‌گاوی با توجه به قابلیت کارشان تحت شرایط گوناگون و متنوع زمین شناسی بنحو موفق این کیفیت را تأمین کرده اند. دستگاه کله‌گاوی AMT70 (Alpine Miner Tunneller) برای روش NATM طراحی و ساخته شده است. ویژگی مهم این دستگاه قابلیت حفر تونلهائی با سطح مقطع ۶۰ متر مربع یا بیشتر می‌باشد.

حفر تونل Karawanken بین اتریش و یوگسلاوی با سطح مقطع ۱۰۱ متر مربع به صورت یک راه دوبانده و به طول ۸/۵ کیلومتر در سنگ آهک، دولومیت و ماسه سنگ باروش NATM و با استفاده از AMT70 صورت گرفته است. این تونل در دو مقطع اصلی با شرایط مشکل زمین روبرو شد. اول در یک مقطع بشدت خرد شده آبدار و دوم در یک مقطع دارای شیل‌های گرافیتی سیاه درزه دار. ابتدا قسمت بالائی و سقف تونل با سطح مقطع ۵۳ متر مربع توسط AMT70 حفر شد (باروش NATM). برای حفر بقیه سطح مقطع نیز از همین دستگاه و به صورت حفر پله‌ای استفاده گردید و در زمان حفر قسمت پائین، نگهداری قسمت بالائی تونل (قابهای فولادی، راکبوت، و بتن پاشی) انجام می‌گرفت.

۳-۳-۸ دستگاه‌های کله‌گاوی دو بازویی (twin boom roadheader)

توسعه و پیشرفت دستگاه‌های کله‌گاوی دو بازویی ناشی از تقاضای زیاد برای افزایش سرعت پیشروی بوده‌است. به عنوان نمونه دستگاه Dosco TB 600 قادر به حفاری و بارگیری ۲۰۰ متر مکعب در ساعت است. این دستگاه‌ها نرخ کندن سنگ را افزایش و در نتیجه زمان لازم برای حفر طول ثابتی از تونل را کاهش می‌دهند، و نتیجتاً، سرعت پیشروی با این دستگاه‌ها بالا می‌رود. این نوع دستگاه برای حفر تونلهائی با سطح چهارگوش مناسب‌تر می‌باشد.

تونل روزنبرگ (Rosenberg) در سوئیس، به قطر ۱۱/۴۶ متر و سطح مقطع حدود ۱۰۰ متر مربع توسط یک کله‌گاوی دارای چهار بازو بدون هیچ گونه خطر برخورد این چهار بازو با هم حفاری شده‌است.

۳-۳-۹ تأثیر ویژگیهای حفر سنگ بر عملکرد دستگاه کله‌گاوی

دستگاههای تونلسازی از جنبه قابلیت‌های اجرایی حفر در شرایط زمین شناسی مختلف مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. یکی از ویژگیهای مهمی که داشتن ارزیابی در مورد آن ضروری است، عملکرد دستگاه در انواع مختلف سنگها می‌باشد. تحقیقات در این زمینه بر تعیین شاخصها و ویژگیهای سنگ و برقراری ارتباط بین این شاخصها پیشروی کله‌گای متمرکز بوده است.

آزمایشهای لازم برای تعیین ویژگیهای حفر سنگ:

آزمایشهای لازم برای تعیین شاخصها و ویژگیهای رفتاری سنگ در برابر برش مبتنی بر تستهای آزمایشگاهی مختلف نظیر مقاومت، سختی و ساینده‌گی هستند. پارامترها بصورت منفرد مورد بررسی قرار می‌گیرند و برای قضاوت کلی راجع به رفتار برشی سنگ به صورت تجمعی مدنظر قرار داده می‌شوند. در مطالعاتی که برای اندازه‌گیری توان مصرفی در حالت‌های مختلف برش به وسیله یک دستگاه کله‌گای شرکت Dosco صورت گرفت، توان جذب شده توسط دستگاه و سرعت حفر برای هریک از حالت‌های مختلف برش و برای انواع مختلف سنگها اندازه‌گیری شد. عوامل و پارامترهای زیر پس از این مطالعات بری ارزیابی عملکرد برش ارائه گردید:

شاخص شکست (break index):

این شاخص تعیین کننده تعداد متوسط صفحات ناپیوستگی (درزه‌ها، صفحات لایه بندی، ترکها و غیره) در هر متر از هر لایه اصلی سنگ می‌باشد که آن را بطور عمودی یا افقی قطع کرده است. ضریب تغییر شکل (deformation coefficient): این ضریب معیاری جهت ارزیابی سختی سنگهای جبهه کار تونل می‌باشد که توسط آزمایش چکش اشمیت نشان داده می‌شود:

$$\text{ضریب تغییر شکل} = (R_c - R_i) / R_c$$

R_c = مقدار ثابت جهش بعد از ۲۰ آزمایش

R_i = مقدار جهش اولیه (جهش در اولین آزمایش)

انرژی ویژه (specific energy):

انرژی مصرفی توسط تاج حفار برای حفر واحد حجم سنگ را انرژی ویژه گویند. بر موارد زیر به عنوان نکات حاصل از نتایج و مشاهدات صورت گرفته در جریان مطالعات تاکید شده است:

۱- عملکرد دستگاه حفاری بنحو زیادی تحت تاثیر ویژگیهای رفتاری توده و ماده سنگ، مشخصات دستگاه، مشخصات تونل و شرایط عملیاتی قرار دارد.

۲- در صورتی که عمل حفاری در شرایطی انجام گیرد که مشکلات تخلیه مواد خرد شده و شرایط عملیاتی مانع ایجاد نکرده باشند، ویژگیهای ماده سنگ بیشترین تاثیر را در عملکرد برش دستگاه از خود نشان می‌دهد.

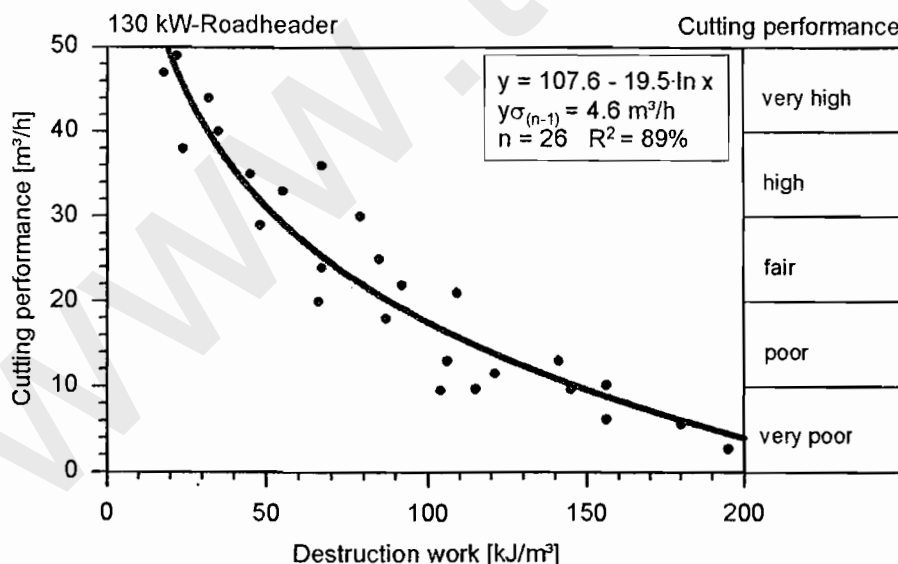
۳- ترکهای باز یا دیگر ضعفهای طبیعی در ساختار سنگ به میزان زیادی بر عملکرد برش تاثیر می‌گذارد.

۴- با افزایش نرخ حفر، انرژی ویژه کاهش می‌یابد.

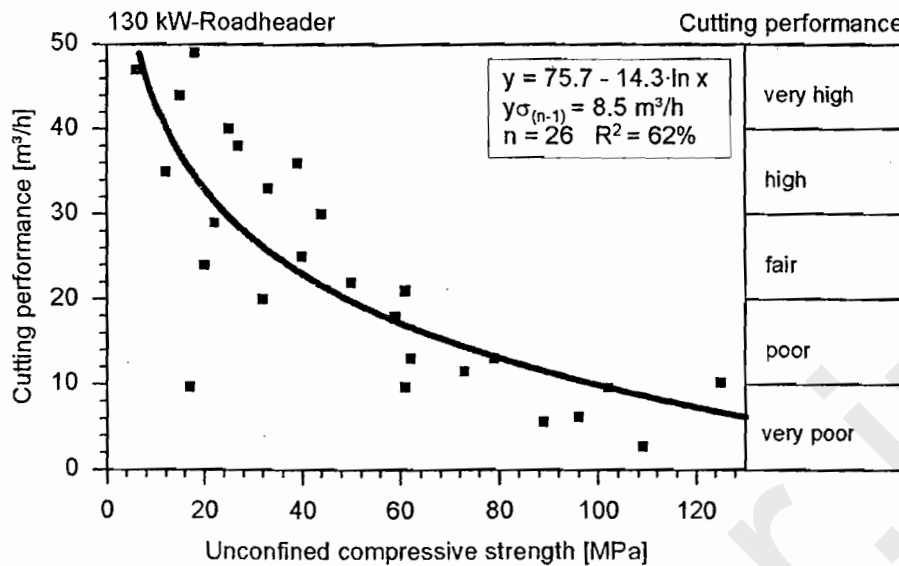
۵- مطالعات نشان داده‌است که با برنامه ریزی درست حرکات بازو می‌توان افزایش راندمان را انتظار داشت. تفاوت‌های راندمان برش در هر یک از حرکات چهارگانه بازو شامل فرو روی (sumping)، حرکت عرضی (traversing)، زیربری (undercutting)، روبری (overcutting) نشان می‌دهد که با برنامه ریزی و اجرای دقیق مراحل برش می‌توان به بهره‌وری بسیار خوبی از عملکرد برش دست یافت. شرایط لایه بندی و نوع سنگها نیز در دامنه گسترده‌ای بر عملکرد حفر تاثیر گذار هستند.

Thuro و Spaun یک ویژگی جدید بنام کار تخریبی ویژه (specific destruction work) برای سنگ تعریف کردند (Thuro & Spaun, 1996). از نقطه نظر فیزیکی، انتگرال منحنی تنش-تغییر شکل (stress-strain) نشان دهنده انرژی یا کار لازم برای گسیختگی نمونه سنگ می‌باشد. کار تخریبی ویژه (یا به اختصار کار تخریبی) بعضاً انرژی تغییر شکل (strain energy) نیز نامیده می‌شود.

در شکل ۳-۲۴ برای یک کله گاوی ۱۳۰ کیلوواتی، رابطه عملکرد برش (cutting performance) با کار تخریبی نشان داده شده است. در شکل ۳-۲۵ نیز رابطه عملکرد برش با مقاومت تک محوری سنگ برای همان کله گاوی ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که عملکرد برش دارای ضریب همبستگی بهتری با کار تخریبی در مقایسه با مقاومت تک محوری می‌باشد.



شکل ۳-۲۴- تغییرات عملکرد برش بر حسب کار تخریبی



شکل ۳-۲۵- تغییرات عملکرد برش بر حسب مقاومت تک محوری سنگ

۳-۱۰- حفر تونل با چکشهای ضربه ای هیدرولیک

چکشهای دستی هوای فشرده بنحو گسترده ای در عملیات احداث تونل به کار گرفته شده اند و حتی در حفر تونلهای با مقطع کوچک، روش اصلی حفر را تشکیل داده اند. بکارگیری چکشهای ضربه ای هیدرولیک به هر حال در تونلسازی تمام مقطع، ابداعی نسبتاً جدید بویژه در ایتالیا است که تعدادی از تونلها در آن کشور با استفاده از این روش حفر شده اند. اولین کار برد عمده چکشهای ضربه ای هیدرولیک به دهه ۱۹۶۰ برمی گردد که این تکنیک در تونلهای بزرگ متعددی به کار گرفته شد. چکشهای ضربه ای هیدرولیک ابتدا در راهسازی و خرد کردن بتن و سپس به عنوان روش حفر و خرد کردن سنگ در معادن کاربرد عمومی یافتند.

چکشهای هیدرولیکی ۳ تنی با قدرت اعمال انرژی ضربه ای در حدود ۶۰۰۰ ژول کاربرد زیادی در حفر سنگ از جمله در تونلسازی پیدا کرده اند. چکش بر روی یک بازوی هیدرولیک مناسب و این مجموعه بر روی یک شاسی متحرک معمولاً ریلی نصب می شود.

مزایای اصلی این نوع روش حفر تونل عبارتند از :

- ۱- در این روش نیازی به چالزنی و آتشیاری جبهه کار تونل نیست.
- ۲- سنگ خرد شده را می توان همزمان با حفر بارگیری نمود، مشروط بر این که سطح مقطع تونل به حد کافی بزرگ باشد.

۳- قطعات بزرگ سنگهای خرد شده را می‌توان با چکش ضربه زن خردتر کرد و به اندازه مورد نظر رساند، در نتیجه امکان انتقال و جابجائی مواد خرد شده با تقریباً کلیه سیستمهای حمل و نقل و بویژه نوار نقاله میسر است.

۴- حفر تونل تمام رخ با این روش در بسیاری از شرایط زمین شناسی که سطح مقطع تونل از ۳۰ متر مربع متجاوز است، امکان پذیر میباشد.

۵- محیط تونل با حداقل اضافه حفاری حفر می‌شود.

نحوه حفاری:

حفاری در مرکز جبهه کار از حدود ۱ تا ۱/۵ متری بالای کف شروع و تا عمق حدود ۱/۵ تا ۲ متر حفاری می‌شود. عمل حفر تا دیواره های جانبی و کف ادامه می‌یابد و در نتیجه شکافی ایجاد می‌شود که سنگهای قسمت بالای جبهه کار روی آن قرار گرفته است. حفاری به سمت بالا تا تکمیل سطح مقطع تونل ادامه می‌یابد.

شرایط مناسب کاربرد:

این روش حفر تونل برای چینه‌های با لایه‌بندی خوب و ترک‌دار روش مناسبی است. شرایط توده‌ای می‌تواند از نرخ پیشروی، تا رسیدن به یک سرعت پیشروی که از جنبه اقتصادی مقرون به صرفه نباشد، بکاهد. در سنگهای محکم که دارای درزه های زیاد باشند و رفتاری شبیه لایه های دارای باندهای ضعیف در بین لایه‌ها از خود نشان دهند، می‌توان با استفاده از چکشهای ضربه ای بنحو موفقیت‌آمیزی اقدام به حفر تونل نمود.

با استفاده از این روش در پنج تونل در ایتالیا به نرخ پیشروی در محدوده ۲ تا ۹ متر در شیفت (۱۲ ساعته) و به طور متوسط ۶ متر در ۱۲ ساعت دست یافته‌اند و حجم سنگ حفر شده بین ۳۰۰ تا ۹۰۰ متر مکعب بوده است.

تونل Rieti در نزدیکی رم به طول ۱۰۲ کیلومتر به منظور ایجاد یک راه دو بانده به سطح مقطع ۸۰ متر مربع (ارتفاع ۷.۲ و عرض ۱۱.۱ متر) در لایه های آهکی با لایه‌بندی خوب حفر شد. در هر روز کاری (۲۴ ساعت) طی ۵ سیکل، ۷-۸ متر تونل حفر و نگهداری شد و باربری مواد خرد شده نیز صورت گرفت. برای نگهداری از قابهای قوسی فلزی چهار تکه که به فواصل ۱/۵ متری از هم نصب شده بودند و برای بارگیری همزمان با حفر از لودر تخلیه از جلو و برای حفر از چکش ضربه ای مدل Liebherr 962 استفاده شد که نرخ پیشروی آن ۱/۵ متر در ۱/۲۵ ساعت بود.

تونل دیگری که با این روش احداث شد ۷ کیلومتر طول داشت و به منظور ایجاد راه آهن سریع السیر در لایه های ماسه سنگی، مارلی و شیستهای آرژیلیتی به شدت چین خورده و گسله حفر شد. عملیات در چهار سیکل و با نرخ پیشروی ۱۰ متر در ۲۴ ساعت انجام گرفت. عملیات حفر و بارگیری همزمان انجام می شد.

۳-۳-۱۱ ملاحظات دیگر

- ۱- دستگاههای کله گاوی دارای انعطاف پذیری خوب در عملیات و توانائی برش تونلها با شکلهای مختلف، علاوه بر قابلیت مانوردهی بالا در حفر تقاطعها در تونلها هستند.
- ۲- در صورتی که تونل در شرایط سنگی لایه ای که دارای باندهای عریض سست در جبهه کار تونل هستند، حفر شود می توان در ابتدا اقدام به حفر این باندهای سست نمود. در نتیجه این عمل امکان آزاد شدن تنش و ضعیف شدن سایر لایه های تشکیل دهنده جبهه کار را فراهم می آورد که پس از آن می توان آنها را با سرعت حفر کرد.
- ۳- استفاده از آبفشان یا جت آب با فشار بالای ۷۰۰ بار می تواند کاهش عمده ای در نیروهای برشی سرمته ایجاد کند.
- ۴- توسعه و به بازار آمدن دستگاههای کله گاوی سنگین در عین حالی که ویژگیهای اصلی برش و عملکرد مؤثر سرمته را از طریق طراحی خوب تاج حفر حفظ کرده است، توانائی برش انواع سنگهای سخت تر را افزایش داده است.
- ۵- دامنه کاربرد دستگاههای حفاری بازوئی در شرایط سنگی سخت، بنحو فزاینده ای افزایش یافته است. این امر توسعه انواع سنگین دستگاهها و در نتیجه افزایش قابل ملاحظه بکارگیری چنین دستگاههای تونلسازی را موجب شده است.
- ۶- مزایای حاصل از کاربرد CAD در تاج حفر دستگاههای کله گاوی به طور عمده عبارتند از: توانائی طراحی برای عملکرد بهتر برش، توزیع بهتر بار بین سرمته ها، همراه با کاهش عمده میزان لرزش.
- ۷- آبفشانهای فشار بالا سهم عمده ای در بالا بردن نرخ حفر داشته اند و در عین حال از انرژی ویژه حفر و میزان گرد و غبار تولیدی کاسته اند.
- ۸- ظهور دستگاههای کله گاوی سنگین با سرعت مشخص کرد که سرمته های برشی در زنجیره توسعه از رشدی همپای دستگاههای حفار برخوردار نبوده اند.
- ۹- هدایت اتوماتیک دستگاههای کله گاوی توانائی حفاری دستگاه را افزایش داده است. با هدایت اتوماتیک میتوان پیشروی را علیرغم فقدان دید لازم بدلیل گرد و خاک ایجاد شده، ادامه داد.
- ۱۰- چکشهای ضربه ای هیدرولیک میتوانند نیاز به چالزنی و آتشباری در جبهه کار تونل حذف کنند. مزیت مهم این روش بارگیری همزمان با حفر است که امکان می دهد تونل سطح مقطع کافی داشته باشد. این روش برای شرایط زمین شناسی که سنگها درزه دار باشند، روش مناسبی است.

از مدتها پیش نیاز به دستگاهی ارزان، سبک و متحرک برای حفر و نگهداری فضاهائی با هر شکل مقطعی احساس می شده است. دستگاههای کله گاوی در ترکیب با سپرهای تونلسازی تا حد زیادی به این نیاز پاسخ داده اند.

۳-۱۲ مقایسه کله گاوی های تاج حفار مخروطی و تاج حفار طبلیکی

تحلیل بردارهای سرعت سرمته:

در حین چرخش تاج حفار، برای هر یک از سرمته ها دو بردار سرعت متصور است. یکی در جهت چرخش تاج حفاری که به آن بردار سرعت چرخشی (slewing speed) گفته می شود و دیگری در جهت فرو روی سرمته به داخل سنگ، که آنرا بردار سرعت برشی (cutting speed) نامیده می شود.

در تاجهای مخروطی دوران حول محور بازوی دستگاه انجام می شود، بنابراین صفحه گذرنده از دو بردار مذکور عمود بر محور بازوی دستگاه می باشد. در تاجهای طبلیکی محور چرخش تاج عمود بر محور بازوی دستگاه بوده و بردار سرعت چرخشی و سرعت برشی، بردار سرعت منتهی را بوجود می آورند. زاویه این بردار نسبت به محور بازو بستگی به نسبت سرعتهای چرخشی و برشی دارد.

لغزش دستگاه در اثر نیروهای عکس العمل:

نیروهای اصطکاک بین کف تونل و چرخ زنجیری یک عامل موثر در کنترل تکانهای ناشی از نیروی عکس العمل وارد به کله گاوی می باشد. به همین دلیل کله گاوی هایی که توان حفر بیشتری دارند، به منظور افزایش نیروی اصطکاک باید از وزن بالاتری نیز برخوردار باشند.

همانگونه که قبلاً ذکر شد در تاج های مخروطی گشتاور عکس العمل وارد به تاج در صفحه ای عمود بر محور بازوی دستگاه وارد می شود. همین امر سبب ایجاد تکانهای شدید می شود اما در تاجهای طبلیکی با توجه به اینکه جهت نیروی عکس العمل تقریباً در امتداد قائم و به موازات راستای بازوی دستگاه وارد می شود، تکانهای حاصله نیز بسیار کمتر است.

در شرایط عملیاتی مشابه و با یک موتور محرکه مشابه، با استفاده از سیستم تاج طبلیکی وزن دستگاه نسبت به حالتی که از سیستم تاج مخروطی استفاده می شود، کمتر خواهد بود. و یا به عبارت دیگر در یک کله گاوی با وزن مشخص، سیستم تاج طبلیکی قابلیت استفاده از موتورهای قوی تری را خواهد داشت.

بطور کلی در فرایند حفر مقدار انرژی که از طریق هر یک از سرمته ها می توان منتقل نمود، به دو عامل عمده سختی سنگ و پایداری (stability) دستگاه بستگی دارد. بدین معنی که در حفر یک سنگ

سخت هر چه انرژی پشت سرمته‌ها بیشتر شود، نرخ استهلاک آنها نیز به شدت افزایش می‌یابد. در این حال عدم استحکام دستگاه (مقاومت در برابر لرزش‌های شدید)، در مواجهه با نیروهای قوی عکس العمل سنگ، سبب تخریب قطعات مختلف کله‌گاو می‌شود. به هر ترتیب انرژی ویژه (انرژی که به هر یک از سرمته‌ها وارد می‌شود) به عواملی از قبیل سرعت چرخش، جرم تاج و همچنین تعداد سرمته‌هایی که در هر لحظه با سینه درگیر هستند، بستگی دارد. همانگونه که قبلاً ذکر شد کله‌گاوهای تاج طبلیکی نسبت به نیروهای عکس العمل وارد به تاج تکانهای کمتری نشان می‌دهند. بنابراین با استفاده از افزایش سرعت چرخش و جرم تاج می‌توان انرژی ویژه حفر را تا حد قابل ملاحظه‌ای افزایش داد.

مقایسه مشخصات فنی

در جدول زیر مشخصات فنی یک دستگاه کله‌گاو تاج مخروطی با یک دستگاه کله‌گاو تاج طبلیکی با قدرت موتور یکسان مقایسه شده‌است.

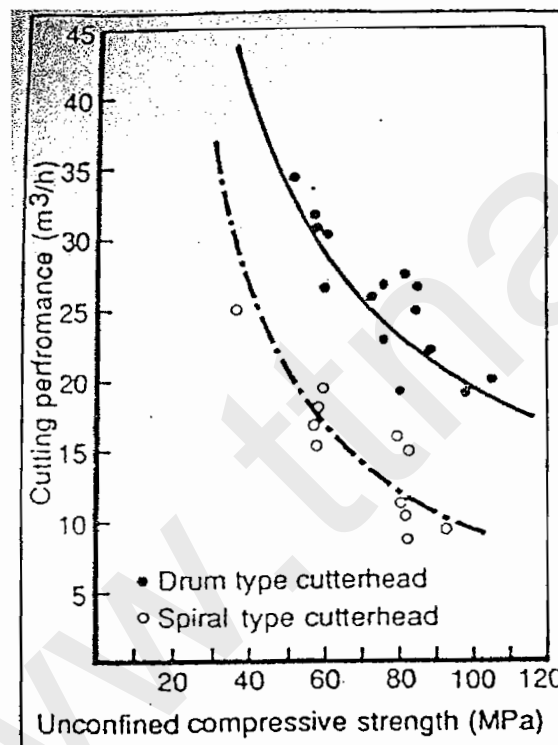
جدول ۳-۸- مشخصات دو نوع کله‌گاو تاج مخروطی و تاج طبلیکی

مشخصات	کله‌گاو تاج مخروطی	کله‌گاو تاج طبلیکی
قدرت موتور تاج حفار	۳۰۰ (kW)	۳۰۰ (kW)
وزن	۱۱۰ (ton)	۹۵ (ton)
تعداد سرمته‌ها	۱۰۵	۲x۹۹
سرعت برشی متوسط (V)	۱/۵ (m/s)	۲/۸ (m/s)
نیروی حفر در حرکت افقی	۲۰۰ (kN)	۸۵ (kN)
نیروی حفر در حرکت رو به بالا	۲۰۰ (kN)	۳۰۰ (kN)
نیروی حفر در حرکت رو به پایین	۲۰۰ (kN)	۲۲۵ (kN)
عرض دستگاه	۳/۶ (m)	۳ (m)
طول دستگاه	۱۳/۵ (m)	۱۲ (m)
ارتفاع دستگاه	۲/۷ (m)	۱/۸۵ (m)
فاصله مرکز ثقل تا محور تاج	۵ (m)	۴/۵ (m)
فاصله مرکز ثقل جکهای نگهدارنده	-	۶ (m)

مقایسه عملکرد کارگاهی

این مقایسه بر مبنای بررسی توانایی‌های اجرایی یک کله‌گاو تاج مخروطی با توان اسمی ۲۳۰ کیلو نیوتن، و یک کله‌گاو طبلیکی با توان اسمی ۲۵۰ کیلو وات (Alpine Miner AM100) در شرایط مشابه زمین ساختی، انجام گرفته است.

در شکل ۳-۲۶ عملکرد حفاری (cutting performance) کله گاوی تاج مخروطی و تاج طبلکی در سنگ های با مقاومت فشاری تک محوره مختلف نشان داده شده است. مشاهده می شود عملکرد حفاری کله گاوی تاج طبلکی بطور قابل ملاحظه ای بیشتر از کله گاوی تاج مخروطی می باشد، که با افزایش مقاومت فشاری سنگ این اختلاف زیادتر می شود. بنابراین به طور مثال برای مقاومت فشاری تک محوری ۸۰ مگاپاسکال، توان حفر کله گاوی تاج طبلکی ۲۳ متر مکعب بر ساعت و توان حفر کله گاوی تاج مخروطی ۱۲ متر مکعب بر ساعت بدست خواهد آمد که نسبت به یکدیگر حدود ۱۰۰٪ اختلاف دارند.



شکل ۳-۲۶- عملکرد حفاری در سنگ های با مقاومت فشاری مختلف

استهلاک سرمه: مقدار استهلاک سرمه یا مصرف ویژه سرمه (specific pick consumption) بر حسب تعداد سرمه بر متر مکعب حفاری در دو نوع دستگاه مذکور، در منحنی های شکل ۳-۲۷ نشان داده شده است. این منحنی ها از روابط زیر پیروی می کنند:

$$C_p = 0.76 \cdot F^{0.39}$$

تاج حفار طبلکی

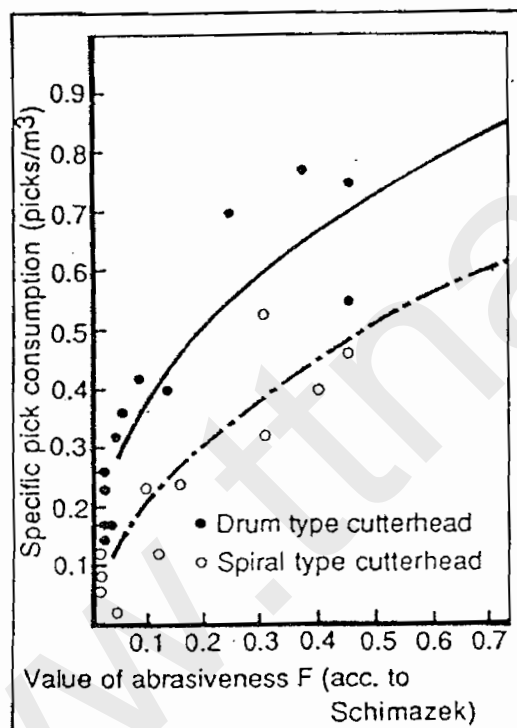
$$C_p = 0.96 \cdot F^{0.56}$$

تاج حفار مخروطی

F= مقدار سختی سایشی در مقیاس شیمازک (Schimazek)

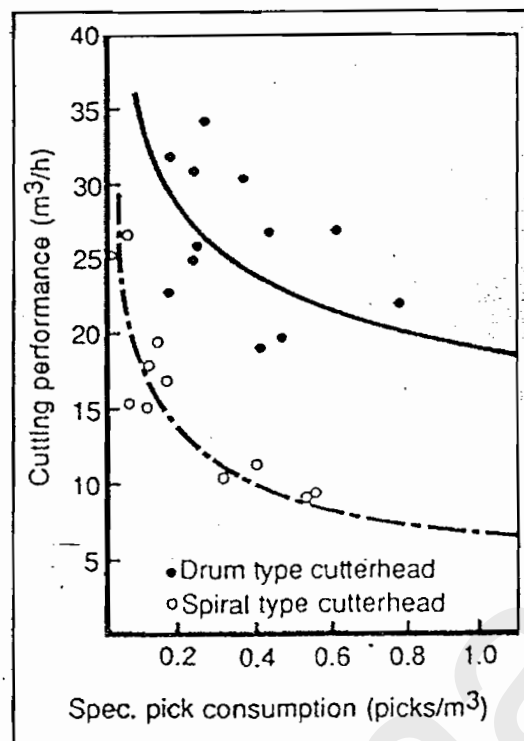
مقدار مصرف ویژه سرمته در کله‌گاوی‌های تاج طبلیکی از تاج مخروطی بیشتر می‌باشد، بطوریکه برای $F=0.4$ مقدار مصرف ویژه سرمته تاج طبلیکی ۵۰٪ بالاتر از تاج مخروطی است.

مصرف سرمته اصولاً باید در ارتباط با عملکرد حفاری بررسی شود (شکل ۳-۲۸). همانطور که از این شکل ملاحظه می‌شود، برای یک مصرف ویژه معین، عملکرد کله‌گاوی تاج طبلیکی بیش از دو برابر عملکرد کله‌گاوی تاج مخروطی می‌باشد.



شکل ۳-۲۷- مصرف ویژه سرمته برحسب مقدار سختی سایشی

در کله‌گاوی‌های دارای تاج طبلیکی، جهت چرخش تاج به گونه ای است که درصد عمده سنگهای خرد شده توسط پاروهای جمع کننده دستگاه، به سهولت بارگیری می‌شوند. اما در کله‌گاوی‌های تاج مخروطی، به علت جهت چرخش تاج مقداری از سنگهای خرد در خارج از محدوده سینی جمع کننده مواد ریخته، و این امر لزوم بارگیری مجدد را اجتناب ناپذیر خواهد کرد.



شکل ۳-۲۸- عملکرد حفاری بر حسب مصرف ویژه سرمته

شکل دهی مقطع طولی تونل:

صاف بودن جداره تونل عامل مهمی در کیفیت و سهولت نصب وسایل نگهداری می‌باشد. اصولاً کله‌گاوی‌های تاج مخروطی، به علت شکل هندسی تاج حفار، در ایجاد یک سطح صاف در جداره تونل قابلیت بسیار بالایی دارند و اما نکته‌ای که در این مورد باید به آن توجه شود، نسبت ارتفاع تونل به طول بازوی کله‌گاوی تاج مخروطی است. اگر ارتفاع تونل نسبت به طول بازو از حد معینی بیشتر شود سطح سقف تونل به شکل مضرس خواهد شد. در کله‌گاوی‌های تاج طبلکی ایجاد یک سطح عاری از تضرس بسیار مشکل می‌باشد و حتی با استفاده از ماهرترین اپراتورها نیز حداقل ۱۰-۵ سانتیمتر تضرس در جداره تونل بوجود خواهد آمد.

تولید گرد و غبار:

یکی از مشکلات مهم کار با دستگاه‌های کله‌گاوی تولید گرد و غبار در حین کار می‌باشد. به طور کلی مقدار گرد و غبار حاصله به عوامل زیربستگی دارد:

- توان حفر دستگاه
- خصوصیات فیزیکی و مکانیکی دستگاه
- شرایط زمین شناسی از قبیل رطوبت و لایه بندی
- شکل و محل سائیدگی بر روی سرمته‌ها

- کارآیی سیستم آب پاش

از آنجا که تاج های طبلمکی دارای سرعت چرخش بالاتری هستند، بنابراین مقدار گرد و غبار تولید شده نسبت به تاج های مخروطی نیز بیشتر خواهد بود.

حفاری در سینه کارهای دارای لایه بندی:

تیپ شاخص این سینه کارها، سنگهای رسوبی می باشند. در چنین ساختارهایی لایه مختلف از نظر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی و ضخامت تنوع زیادی هستند. این لایه ها عموماً چین خوردگی و گسلهایی نیز دارند. از طرفی حتی در سینه کاری با یک سنگ مشخص نیز احتمال تغییرات قابل توجه در مقاومت سنگها وجود دارد. در هر صورت چنین شرایطی می تواند برای کله گاوی ها مشکل آفرین، و باعث کاهش سرعت حفر، شود.

به علت شکل مخروطی تاج، بازوی کله گاوی های تاج مخروطی در همه قسمتهای سینه کار با انعطاف پذیری بسیار خوبی کار می کند. بنابراین با استفاده از برش لایه های نرم تر، سطح اتکای لایه های مقاومتر را از بین برده، و باعث سهولت در حفر بخشهای مقاوم می شود. اما قابلیت انعطاف در کله گاوی های تاج طبلمکی به علت شکل تاج نسبتاً ضعیفتر و بنابراین در حفاری انتخابی سینه کار نیز کارایی کمتری دارد ولی در عین حال در هنگام برخورد با لایه های مقاوم، نسبت به کله گاوی های تاج مخروطی قابلیت بالاتری دارند.



شکل ۳-۲۹- نمونه آبفشان در کله گاوی ها

۳-۳-۱۳ ابداع و توسعه تکنولوژی آیفشان در کله گاوی ها

استفاده از آیفشان در افزایش توان حفر کله گاوی ها در سنگهای سخت نقش بسیار موثری دارد. پاشیده شدن آب بر روی نوک ابزاربرش و سنگهای درگیر سبب کاهش گرد و غبار، افزایش قدرت حفر کله گاوی، کاهش استهلاک ابزاربرش و کاهش خطرات احتمالی آتش سوزی می شود. آیفشانها را می توان به سه دسته کلی تقسیم کرد :

نسل اول، آیفشان کم فشار:

برای مدت ده سال پس از ابداع آیفشان این نوع از آیفشان ها در کله گاوی های انگلیسی مورد استفاده قرار می گرفت. فشار آب در این نوع به حدود ۴۰ بار می رسید و بطور عمده سبب کاهش گرد و غبار و خنک کردن ابزاربرش و در نتیجه افزایش عمر آنها می شد
نسل اول آیفشانها تاثیر قابل توجهی در افزایش قدرت حفر کله گاوی ها نداشت. این آیفشانها آب را به جلوی ابزاربرش می پاشیدند و از این جهت در کنترل جرقه های پشت ابزاربرش و خطرات آتش سوزی (در سنگهای دارای گاز) ناتوان می نمود.

نسل دوم، آیفشان فشار متوسط:

در این نوع آیفشانها فشار آب بین ۲۰۰-۱۵۰ بار می باشد. شرکت های Voest-Alpine در اتریش و Gmbh در آلمان، سیستمی را ابداع کرده اند که در آن آیفشان دارای یک شیر قطع و وصل بر سر مسیر آب می باشد که بر روی پایه ابزاربرش سوار، و هر گاه نوک ابزاربرش با سنگها برخورد می کند این شیر باز شده، و عمل پاشش آغاز می شود. به این ترتیب از خروج آب اضافی غیر از زمان درگیری ابزار برش با سنگ جلوگیری به عمل می آید. مقدار مصرف آب در این سیستم به ازاء هر ابزاربرش حدود ۴۰-۶۰ لیتر بر دقیقه می باشد.

اگر چه نتایج آزمایشگاهی بسیار جالب توجه بود، اما عملکرد کارگاهی این سیستم انتظارات اولیه را برآورده نکرد. مهمترین مسئله قیمت تمام شده بسیار بالا بود. هر ابزاربرش دارای شیر ضربه ای قیمتی معادل ۲۹۵ دلار داشت بنابراین قیمت تاج حفر یک کله گاوی AM100 (Alpine Miner) با ۱۹۸ قطعه ابزاربرش آیفشان دار، معادل ۱۱۴۰۰۰ دلار می شد، بدون اینکه افزایش قابل توجهی در قدرت حفر کله گاوی بدست آمده باشد.

نسل سوم، آیفشان فشار قوی:

این نوع آیفشانها به منظور دسترسی به خصوصیات زیر ابداع شد :

- ۱- کاهش گرد و غبار و خطرات آتش سوزی (در توده های دارای گاز متان)
- ۲- کاهش استهلاک ابزاربرش

- ۳- افزایش قدرت حفر و سرعت پیشروی بدون نیاز به افزایش قدرت موتور تاج حفر
- ۴- افزایش توانایی دستگاه در حفر سنگهای سخت تر بدون نیاز به افزایش وزن دستگاه.
- ۵- کاهش هزینه استخراج هر متر مکعب سنگ ($\$/m^3$)

برای بررسی موارد فوق دو طرح مورد ارزیابی قرار گرفت، اولین طرح در آمریکا (Bruceton, Pennsylvania) با استفاده از یک کله گاوی تاج طبکی ۱۰ تن، با قدرت موتور ۳۳ کیلووات انجام شد، که در آن آب فشار قوی از یک پمپ سه مرحله ای با دبی ۸۰ لیتر بر دقیقه و فشار ۷۰۰ بار تامین می شد. این آبفشان نرخ حفاری را تا ۲ برابر افزایش داده و باعث کاهش گرد و غبار تا ۷۰٪ و به میزان ۲ میلی گرم بر متر مکعب شد.

تحقیقات آزمایشگاهی که در آمریکا بر روی انواع سنگ و ذغال انجام شده حاکی از آنست که بهترین نتایج استفاده از آبفشان در فشارهای بین ۲۴۰۰-۷۰۰ بار حاصل می شود. همچنین این تحقیقات نشان می دهد که با استفاده از جت آب در ابزاربرشی مخروطی می توان تا حدود ۶۰٪ از نیروی نرمال ابزاربرش کاست.

بر مبنای این آزمایشات می توان مقایسه ای بین یک کله گاوی ۷۰ تن (با قدرت موتور تاج ۲۰۰ کیلو وات) و یک کله گاوی ۲۸ تن با آبفشان فشار قوی (و قدرت موتور تاج ۹۰ کیلو وات) انجام داد. در این حالت کله گاوی آبفشان دار با وزن و قدرت موتور کمتر (و بالطبع با صرف هزینه سرمایه ای کمتر) دارای قدرت حفاری برابر با کله گاوی ۷۰ تن می باشد. در حال حاضر یک کله گاوی ۷۰ تن با قیمتی در حدود ۸۰۰.۰۰۰ دلار دارد، در حالیکه یک کله گاوی ۲۸ تن با قیمتی در حدود ۳۸۰.۰۰۰ دلار فروخته می شود. به هر حال با استفاده از این نوع آبفشان به طور متوسط هزینه حفر هر متر تونل تا ۴۰٪ کاسته می شود.

طرح دیگری که مورد بررسی قرار گرفت در سنگهای آهکی (Middleton, Derbyshire) در انگلیس توسط یک کله گاوی تاج مخروطی Dosco MK2A (در رده کله گاوی های سبک) با قدرت موتور ۴۸/۵ کیلو وات، مجهز به یک آبفشان با فشار ۷۰۰ بار بود. تاج حفر این کله گاوی با ۹ آبفشان با دبی ۴ لیتر بر دقیقه برای هر افشانه، تجهیز شده بود. در شرایط معمول کله گاوی Dosco MK2A برای کار در سنگهایی با مقاومت کمتر از ۷۰ مگاپاسکال مناسب می باشد، اما با نصب این آبفشان کله گاوی قادر به حفر سنگهای آهکی با مقاومت ۱۳۷-۱۰۸ مگاپاسکال شد. ضمناً مقدار مصرف ابزاربرش نیز در حد متعارف بوده است. تاثیر مثبت نصب آبفشان مستقیماً در کاهش لرزش دستگاه (که تاثیر مستقیم بر تخریب قسمتهای مختلف دستگاه می گذرد) نیز مشاهده می شد.

با توجه به بررسی های انجام شده بر روی کله گاوی های آبفشان دار (تا فشار ۷۰۰ بار) مشاهده می شود که انرژی ویژه حفر به طور متوسط حدود ۳۲٪ کاهش، و میزان پیشروی در سنگهای متوسط تا سخت به طور متوسط حدود ۵۰٪ افزایش داشته است. گرد و غبار حاصله در فشار آب بین ۲۰ تا ۴۰ بار به شدت کاهش می یابد به طوری که در فشار ۹۰ بار تا حدود ۵۰٪ از گرد و غبار کاسته می شود. مقدار مصرف ابزار برش نیز بسیار کمتر می شود.

۳-۳-۱۴ تشریح عملکرد آبفشان

در چند دهه اخیر موسسات تحقیقاتی مختلف به منظور بررسی دقیق تاثیرات کاربرد آبفشان در حفر سنگ تستهای آزمایشگاهی و بعضاً کارگاهی فراوانی ترتیب داده اند در این آزمایشها تغییرات پارامترهایی نظیر نیروهای وارده بر ابزاربرش، درجه حرارت اصطکاکی، و میزان گرد و غبار تولید شده و عوامل دیگر مد نظر قرار می گیرند.

در آزمایشگاههای تحقیقاتی وسایل و تجهیزات مختلفی برای شبیه سازی آبفشانها مورد استفاده قرار می گیرند. این تجهیزات ضمن شبیه سازی عمل حفر سنگ، قادر به اندازه گیری پارامترهای موثر در حفر که بدان اشاره شد نیز هستند. در این دستگاه حرکت خطی یک قطعه ابزاربرش سبب حفر (برش) سنگ و ایجاد شیار بر آن می شود و در همان حین پارامترهای مورد نظر اندازه گیری و ثبت می شوند.

ذیلا نتایج حاصل از اینگونه آزمایشات مورد بررسی قرار می گیرد :

بکار بردن آبفشان همراه با ابزاربرش دو تاثیر مهم به همراه دارد. اول آنکه سبب سهولت بیشتر شکست سنگ شده، و در نتیجه برای حفر یک سنگ مشخص نیروی کمتری به پشت ابزاربرش وارد شده و توان مصرفی نیز کاهش می یابد، بنابراین می توان با کم کردن سرعت خطی ابزار برش گامی در جهت کاهش حرارت اصطکاکی برداشته و به این ترتیب به عمر مفید ابزاربرش افزود. دومین تاثیر کاربرد آبفشان تاثیر خنک کنندگی سطح درگیر سنگ و ابزاربرش می باشد. بنابراین با خنک نگه داشتن دمای ابزاربرش کمک موثری در تقلیل استهلاک ابزاربرش می شود.

تاثیر آبفشان در تقلیل نیروی پشت ابزاربرش:

نتایج آزمایشهای انجام شده بر روی سنگهای متوسط تا سخت نشانگر آنست که با کاربرد آبفشان با فشار حدود ۷۰ پاسکال، نیروی وارد بر پشت ابزاربرش به میزان قابل توجهی تقلیل می یابد. در تستهای آزمایشگاهی که بر روی نوریت (norite) که یک سنگ آذرین است انجام گرفته میزان نیروهای قائم و مماس نوک ابزاربرش در مقابل عمق فرو روی ابزاربرش به داخل سنگ اندازه گیری و ثبت شده است.

تاثیر آبفشان در تقلیل نیروی قائم بسیار بیشتر از نیروی مماسی می باشد. لازم به ذکر است که عامل اصلی ایجاد ترک و شکست در ابزاربرش نیز همان نیروهای قائم هستند. مشابه این آزمایش آزمایشگاهی نیز توسط محققان دیگر انجام شده است. همگی این آزمایشات نشان از آن دارند که با کاربرد آبفشان نیروی وارد به پشت ابزاربرش حدود ۵۰٪ - ۴۰٪ تقلیل یافته است. در حقیقت قطعات خرد شده و نیمه شکسته سنگ که در مقابل نوک الماسه ابزاربرش قرار دارند، مانع انتقال کامل نیرو به سنگ می باشند. فشار آبی که توسط آبفشان به این قطعات وارد می شود سبب جابجایی آنها و در نتیجه سهولت در فرآیند حفر می شود. با در نظر گرفتن مکانیزم شکست می توان تاثیر آبفشان در تقلیل نیروهای وارد بر ابزاربرش و افزایش راندمان حفر را با دلایل زیر توصیف نمود :

۱- شکست سنگ توسط ابزاربرش، با ایجاد ترکهای ریز اولیه آغاز می شود و به تدریج با افزایش فشار وارد از ابزاربرش این ترکها گسترش یافته و منجر به جدا شدن قطعات سنگها می شود. اما حضور آبفشان و نفوذ فشار آب درون ترکهای تولید شده سبب گسترش سریع این ترکها و همچنین جدا شدن آنها می شود. به این ترتیب سهمی از نیروی لازم برای شکست توسط فشار آب تامین میشود.

۲- پاکسازی قطعات خرد شده: باقی ماندن قطعات خرد شده سنگ در مقابل ابزاربرش سبب انتشار تنش های وارده در یک سطح بزرگتر و تعدیل آنها می شود. بنابراین برای شکست سنگ در این مرحله لازم است تا نیروی بیشتری از طریق ابزار برش وارد شود. اما فشار آبی که توسط آبفشان به این قطعات وارد می شود سبب جابجایی آنها و در نتیجه سهولت در فرآیند حفاری می شود.

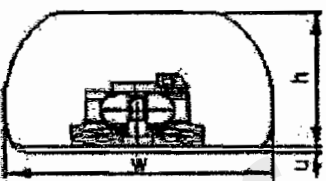
۳-۱۵ شرکت های اصلی سازنده کله گاوی

از شرکت های متعددی که در ساخت دستگاه های کله گاوی فعالیت دارند شرکت های زیر را می توان نام برد:

- Voest Alpine
- Paurat
- Dosco
- Eickoff

مشخصات دستگاه های تولید شده توسط شرکت Eickoff به عنوان نمونه در جدول ۳-۹ ذکر شده است.

جدول ۳-۹- مشخصات کله گاوی های تولیدی توسط شرکت Eickoff

type	performance	total performance instalated	weight	dimensions (approx. in mm)					
	kW	kW	tons	length	width	height	w	h	u
ET 100 series - the small versions with high power									
ET 120	132	220	34	8500	1900	1950	5500	4050	200
ET 170	132	220	35	9000	1900	2700	6100	4600	250
ET 180*	100	230	40	10000	2100	1950	6500	5100	600
ET 200 series - for heavy duty applications in mining and construction									
ET 210	200	350	57	10200	2800	2400	7100	4700	185
ET 250	200	350	64	10500	2800	3200	7500	5500	85
ET 300 series - specifically designed for advanced crown headings									
ET 380*	200	380	100	17300	3400	4100	9800	7450	1000
ET 400 series - for cavern excavation and large cross sections in tunnelling and mineral mining									
ET 410	300	470	105	16000	3400	3400	10000	5500	250
ET 450	300	490	110	16000	3400	3900	10300	7300	250
ET 480*	300	490	120	16600	3600	3600	11000	7900	250

* telescopic cutting boom

۴ - تهویه، آبکشی و تخلیه تونل‌ها

۴-۱ تهویه تونل‌ها

تهویه تونل‌ها را می‌توان به دو مرحله تقسیم نمود:

تهویه در مرحله اجرا

تهویه در مرحله بهره‌برداری

با توجه به موضوع گزارش، در این گزارش فقط تهویه تونل‌ها در مرحله اجرا مورد بررسی قرار می‌گیرد. کلیات تهویه در مرحله بهره‌برداری نظیر تهویه در مرحله اجرا می‌باشد. در تونل‌های راه، هدف اصلی از تهویه، کنترل میزان آلاینده‌های خروجی از آگروز وسایل نقلیه هنگام بهره‌برداری عادی و کنترل دود و گازهای گرم در مواقع اضطراری آتش‌سوزی است. در مورد تونل‌های راه‌آهن، هدف اصلی از تهویه در هنگام بهره‌برداری، کاهش آلودگی و حرارت ناشی از احتراق موتورهای دیزلی لوکوموتیو می‌باشد.

تهویه تونل‌ها یا از طریق دمیدن هوا (سیستم دهشی) یا مکش هوا (سیستم مکشی) از طریق یک داکت می‌تواند صورت پذیرد. در سیستم دهشی، هوای تازه خارج تونل از طریق خط تهویه به نزدیک سینه کار تونل هدایت می‌شود. این امر باعث می‌شود که هوای آلوده، کل طول مسیر تونل را طی کند تا به خروجی تونل برسد. مزیت این سیستم این است که هوای تازه بطور پیوسته به سینه کار که اکثر کارها در آنجا متمرکز است هدایت می‌شود. اما عیب این روش آن است که بقیه طول تونل در معرض هوای آلوده که در سینه کاری تولید شده است قرار گیرد.

در سیستم مکشی، هوای آلوده از طریق خط تهویه مکیده و خارج می‌شود و هوای تازه در ورودی تونل (پرتال) یا شافت وارد شده و طول تونل را می‌پیماید تا به سینه کار برسد. اگرچه این سیستم محیط بهتری را در طول تونل ایجاد می‌کند ولی باعث می‌شود که هر گونه حرارت، رطوبت، گرد و غبار و دود موجود در طول تونل به نزدیک سینه کار منتقل شود.

سیستم مکشی معمولاً برای حفاری با TBM در سنگ ترجیح داده می‌شود زیرا گرد و غبار تولید شده که از طریق گردگیر (dust collector) گرفته نشده است مجبور به طی کل طول مسیر تونل برای خارج شدن نخواهد داشت. در صورت حفاری تونل به روش چالزنی و انفجار، سیستم تهویه می‌تواند بعد از آتشباری بمدت ۱۵ الی ۳۰ دقیقه بصورت مکشی انجام شود تا قسمت عمده دود و گرد و غبار گرفته شود و سپس به سیستم دهشی تغییر وضعیت پیدا کند.

مقررات مربوط به تهویه تونل‌ها معمولاً در آیین‌نامه‌های بهداشت و ایمنی مربوط به هر پروژه خاص مشخص می‌شود. بطور معمول یک سرعت حداقل ۱۵ متر در دقیقه در تونل و حداقل حجم ۵/۷

مترمکعب در دقیقه هوای تازه به ازای هر کارگر داخل تونل در نظر گرفته می شود. در صورت استفاده از ماشین آلات دیزلی، به ازای هر اسب بخار (brake horse power)، $2/8$ مترمکعب در دقیقه هوای تازه مورد نیاز می باشد. معمولاً وقتی چند دستگاه با هم کار می کنند تمام آنها بطور همزمان از حداکثر توان خود استفاده نمی کنند، بنابراین می توان این موضوع را در برآورد هوای لازم بنحوی لحاظ کرد. بعضی آیین نامه ها بر اساس میزان مواد آلاینده موجود در تونل، هوای تازه مورد نیاز را تعیین می کنند. خصوصیات گازهای مختلف و تاثیر فیزیولوژیکی آنها بر روی افراد شاغل در تونل در جدول ۴-۱ ذکر شده است.

طبق آیین نامه های اخیر بهداشت و ایمنی مقدار گرد و غبار در تونل باید در سطح پایینی نگه داشته شود. چالزنی توام با استفاده از آب (wet drilling) و پاشیدن آب به مواد حفاری شده پس از آتشباری الزامی می باشد. در مورد TBM گرد و غبار تا حد زیادی توسط سپر گرد و غبار (dust shield) به سینه کاری محدود می شود که از آنجا به گردگیر (dust collector) منتقل می گردد.

جدول ۴-۱- خصوصیات بعضی گازهایی که ممکن است در تونل موجود باشد

گاز	چگالی*	رنگ	بو	منبع	آثار فیزیولوژیکی بر روی کارکنان
اکسیژن (O_2)	۱.۱۱	بی رنگ	بی بو	هوا معمولاً ۲۰.۹۳٪ O_2 دارد	برای نگه داشتن سلامتی نرمال حداقل ۲۰ درصد لازم است. اگر تراکم اکسیژن به ۱۵ درصد برسد کارکنان دچار سرگیجه می شوند. برخی افراد ممکن است در ۱۲.۵ درصد بمیرند. بسیاری از کارکنان در ۹ درصد دچار ضعف می شوند. مرگ در ۶ درصد و زیر آن رخ می دهد.
نیتروژن (N_2)	۰.۹۷	زرد	بی بو	هوا معمولاً ۷۸.۱۰٪ N_2 دارد	نیتروژن جز رقیق کردن و کاهش O_2 اثر دیگری ندارد.
دی اکسید کربن (CO_2)	۱.۵۰	بی رنگ	بی بو	هوا معمولاً ۰.۰۳٪ CO_2 دارد. این گاز از فساد الوار، آتش و گازهای ناشی از احتراق دیزل ایجاد می شود.	CO_2 به عنوان محرک دستگاه تنفسی است و ممکن است اثر سایر آلوده کننده ها را افزایش دهد. در ۵ درصد CO_2 تنفس دشوار می گردد. تراکم ۱۰ درصدی آن تنها برای چند دقیقه قابل تحمل است.
مونوکسید کربن (CO)	۰.۹۷	بی رنگ	بی بو	در گاز خروجی از احتراق گازوئیل و گازهای حاصل از انفجار دیده می شود	CO راحت تر از اکسیژن به خون جذب می شود. در آن واحد تراکم ناچیز آن نیز به مسمومیت منجر می گردد. تراکم کمی کمتر از ۰.۰۱٪ می تواند به سردرد و حالت تهوع منجر شود. تراکم بالاتر از ۰.۲٪ مهلک خواهد بود.
متان (CH_4)	۰.۵۵	بی رنگ	بی بو	در سنگ های مشخصی که دارای مواد کربناته هستند دیده می شود	به جز رقیق کردن O_2 اثر دیگری ندارد. خطر آن به دلیل خاصیت انفجاری آن می باشد. در تراکم ۵.۵ تا ۱۴.۸٪ متان دارای خاصیت انفجاری می باشد. در تراکم ۹.۵٪ بیشترین انفجار ممکن را دارد.
سولفید هیدروژن (H_2S)	۱.۱۹	بی رنگ	تخم مرغ گندیده	در برخی تشکیلات سنگی وجود دارد، بعضاً در گازهای حاصل از انفجار هم موجود است.	به شدت سمی - ۰.۰۶٪ حتی در دقایقی اندک مشکلاتی اساسی ایجاد می کند.
اکسید گوگرد (SO_2)	۲.۲۶	بی رنگ	گوگرد سوخته	در گاز خروجی از احتراق گازوئیل و گازهای حاصل از انفجار دیده می شود	در تراکم های کم به سوزش شدید اعضای مخاطی منجر می گردد. می توان با محدود کردن گوگرد سوخت (fuel) به ۰.۵٪ در زیر حد مشخص نگه داشت.
اکسیدهای نیتروژن	حدود ۱.۵	زرد-قهوه ای	بینی را می سوزاند	در گاز خروجی از احتراق گازوئیل و گازهای حاصل از انفجار دیده می شود	NO بسیار سمی می باشد. تمام اکسیدهای نیتروژن در تراکم بالا می توانند به اثرهای سوزشی شدید در دستگاه تنفسی منجر شوند. اثرهای حاد ممکن است در چند روز تا چند هفته بدلیل آسیب ریه ها به مرگ منجر گردد

*نسبت وزن واحد حجم گاز به وزن واحد حجم هوا

امکان مواجه شدن با گازهای سمی یا قابل انفجار همواره باید در حفاری تونل‌ها مد نظر باشد. در صورت محتمل بودن چنین مسئله‌ای تدابیر ویژه‌ای را باید بکار گرفت که از جمله استفاده از وسایل برقی خاص و یا تهویه بیشتر می‌باشد. همچنین در چنین شرایطی باید با استفاده از ابزار اندازه‌گیری میزان گازهای سمی یا قابل انفجار شرایط تونل را دائما مورد پایش قرار داد. باید به خصوصیات فیزیکی انواع گازها نیز توجه لازم بعمل آید، زیرا بعضی گازها در قسمت‌های پایین و بعضی در قسمت‌های فوقانی تونل تجمع پیدا می‌کنند.

دو متغیر مهم که طراحی یک سیستم تهویه با ظرفیت مشخص را تحت تاثیر قرار می‌دهد عبارتند از قطر لوله تهویه و توان مورد نیاز. هر قدر قطر لوله زیادتر باشد توان کمتری مورد نیاز خواهد بود. لیکن لوله با قطر بیشتر مستلزم هزینه بیشتری بوده و همچنین در هر تونلی برای تعبیه لوله تهویه مقدار محدودی فضا را می‌توان اختصاص داد. اصولا باید ترکیبات مختلفی از قطر و توان را بررسی و از میان آنها ترکیب مناسب را انتخاب نمود که در این مورد هم باید هزینه‌های اولیه و هم هزینه‌های تعمیر و نگهداری را مد نظر قرار داد.

۴-۱-۱ مراحل انتخاب سیستم تهویه

مراحل طراحی سیستم تهویه تونلها در مرحله حفاری را می‌توان به شرح زیر تقسیم‌بندی کرد:

انتخاب روش تهویه

محاسبه مقدار هوای لازم

محاسبه نشت هوا

محاسبه افت فشار در طول لوله

انتخاب بادبزن یا بادبزن‌ها

۴-۱-۲ محاسبه مقدار هوای لازم

شدت جریان هوای لازم برای تهویه سینه کار تونل بر اساس موارد زیر به طور جداگانه محاسبه می‌شود:

الف- حداکثر تعداد نفرات

ب- هوای لازم برای برطرف کردن آلودگی‌های حاصل از ماشین آلاتی که در تونل کار می‌کنند.

ج - هوای لازم برای رقیق کردن گازهای حاصل از آتشباری

د - هوای لازم برای برطرف کردن گرد و غبار

ه - هوای لازم بر اساس حداقل سرعت هوا

پس از محاسبه شدت جریان هوای لازم برای موارد مختلف، بزرگترین آنها برای تهویه سینه کار انتخاب می‌شود. تصحیحات مختلف برای ضریب اطمینان و میزان نشت نیز اعمال می‌شود (مدنی، ۱۳۷۸).

۳-۱-۴ انتخاب لوله تهویه

برای تهویه جبهه کار تونل، لوله تهویه تا حوالی جبهه کار نصب شده و بسته به سیستم تهویه، هوا به طرف جبهه کار دمیده و یا از آن محل مکیده می شود. بدیهی است هر قدر قطر لوله بیشتر باشد، قیمت آن زیادتر است و فضای بیشتری را اشغال می کند. از سوی دیگر، هر قدر قطر لوله بیشتر باشد، افت فشار در طول لوله و بنابراین فشار لازم برای به جریان انداختن هوا، کمتر است. میزان نشت هوا نیز تابع جنس لوله و اتصالات است. بدین ترتیب، در هر مورد باید لوله های مختلف را از نظر هزینه خرید و مصرف انرژی و نوع بادبزن مقایسه کرد و مناسب ترین را برگزید.

۴-۱-۴ محاسبه نشت هوا

لوله تهویه معمولاً از ورقهای فلزی و یا قطعات پارچه ساخته می شود و هر قدر هم که در ساخت این لوله ها دقت شود، مقداری هوا از میان درزهای لوله به خارج نشت خواهد کرد. محل اتصال قطعات مختلف لوله تهویه نیز از جمله نقاط ضعف آن است و به مقدار قابل توجهی هوا را هدر می دهد. در حالت کلی میزان نشت هوا به عواملی نظیر نوع اتصالات، قطر و یا به عبارت دیگر محیط لوله، طول هریک از قطعات لوله و اختلاف فشار هوا بین داخل و خارج لوله بستگی دارد.

با توجه به مطالب یاد شده، ابتدا میزان نشت هوا در لوله را با توجه به مشخصات آن حساب می کنند و از جمع آن با شدت جریان لازم برای تهویه جبهه کار، شدت جریانی را که بایستی از ابتدای لوله عبور کند (یا به وسیله بادبزن تولید شود) به دست می آورند.

۵-۱-۴ محاسبه افت در لوله های تهویه

پس از انتخاب نوع لوله تهویه و تعیین شدت جریان هوایی که باید از آن عبور کند، افت فشار بین دو سر آن را محاسبه می کنند تا به کمک آن، بادبزن مناسب انتخاب شود. افت کلی از مجموع افت اصطکاک و افت در نقاط اتصالات تشکیل می شود که در هر مورد آنها را باید بطور جداگانه محاسبه کرد.

۶-۱-۴ انتخاب بادبزن

پس از تعیین شدت جریان و فشاری که باید به وسیله بادبزن تامین شود، با توجه به ضرایب اطمینان لازم، آنها را تعدیل می کنند. اگر P و Q مقادیر نهایی شدت جریان و فشار باشد، با مراجعه به منحنی مشخصه بادبزنهاي مختلف، بادبزنی انتخاب می شود که نقطه با مختصات P و Q در منحنی مشخصه آن واقع باشد.

کارخانه های سازنده بادبزن، نمودارهایی را تهیه کرده اند که به کمک آنها، به آسانی می توان بادبزن مناسب را انتخاب کرد. در این نمودارها، با انتقال مختصات P و Q مورد نظر، مدل ونوع بادبزن مناسب انتخاب می شود.

۴-۱-۷ محاسبه توان لازم

اگر P فشار کلی بادبزن و Q شدت جریان آن باشد، توان بادبزن از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$N = \frac{PQ}{\eta_1 \eta_2}$$

که در آن η_1 و η_2 به ترتیب راندمان بادبزن و راندمان موتور الکتریکی آن است. اگر P بر حسب پاسکال و Q بر حسب متر مکعب در ثانیه بیان شود، N بر حسب وات به دست می آید.

۴-۱-۸ لوله های تهویه

لوله تهویه باید به گونه ای ساخته شود که افت فشار در آن حداقل باشد و در ضمن از موادی ساخته شود که غیر قابل سوختن باشد و یا لاقط شعله را منتقل نکند. مهمترین انواع لوله های تهویه به شرح زیر است:

لوله های تخته ای:

این لوله ها معمولاً با تخته سه لایه ساخته می شود. مقطع لوله ها ابتدا مربع بود ولی امروزه با مقطع دایره ای ساخته می شوند. از این لوله ها معمولاً در مواردی که لوله های فلزی زود خورده می شوند استفاده می کنند. برای اینکه در مواقع آتش سوزی، آتش به وسیله این لوله ها منتقل نشود، در فاصله های معینی یک تک لوله را که با مواد مخصوص ساخته شده است، در لوله کشی به کار می برند تا در مواقع آتش سوزی، درز طرفین لوله مزبور ذوب شده و با افتادن این قطعه، ارتباط لوله ها با قسمتی که در آن حریق واقع شده است قطع شود. قطعات لوله های تخته ای را با استفاده از وشر و پیچ و مهره به یکدیگر وصل می کنند.

لوله های فلزی:

لوله های فلزی را از ورق های آهن سفید به ضخامت ۱ تا ۳ میلیمتر می سازند. انتخاب ضخامت ورق به قطر لوله تهویه بستگی دارد. برای تهیه لوله های فلزی، ابتدا ورق مورد نظر را انتخاب می کنند و سپس با استفاده از نوردهای دستی و یا به کمک چکش، آنها را به شکل لوله در می آورند. درز لوله به وسیله جوش و یا به کمک پرچ محکم می شود. لوله های فلزی به قطر ۲۰ تا ۸۰ سانتیمتر ساخته می شوند.

لوله های پارچه ای:

لوله های پارچه ای را از پارچه های مختلف مثل پارچه های پنبه ای، برزنت و الیاف مصنوعی می دوزند. طول این لوله ها ۱۰ تا ۳۰ متر و قطرشان از ۳۰ تا ۶۰ سانتیمتر تغییر می کند. این لوله ها در مقایسه با انواع فلزی به مراتب سبکترند و نصب آنها به سادگی انجام می گیرد. در مقابل این امتیازات، می توان

مقاومت مکانیکی کم آنها را به عنوان عیب ذکر کرد. علاوه بر این، از این لوله ها تنها در تهویه دهشی میتوان استفاده کرد. البته اگر لوله ها بوسیله مفتول فلزی تقویت شوند، می توان از آنها در تهویه مکشی نیز استفاده کرد. در ایران غالباً از لوله های برزنتی برای این منظور استفاده می کنند. برای وصل قطعات لوله های پارچه ای، در انتهای هر قطعه یک حلقه فلزی نصب می کنند که حالت فنری دارد و به سهولت داخل حلقه لوله دیگر قرار می گیرد.

لوله های پلاستیکی:

لوله های پارچه ای که در داخل به وسیله P.V.C و در خارج به وسیله پی وی سی کلریتی شده (Chlorinated PVC) اندود شده اند، وسیله مناسب دیگری برای تهویه جبهه کارند. قطعه های این لوله ها را به طریقی می سازند که به سهولت داخل یکدیگر قرار گیرند و بدین ترتیب اتصال آنها ساده است.

۹-۱-۴ نصب لوله های تهویه

با توجه به قطر نسبتاً زیاد لوله های تهویه، نصب آنها در محل های مناسب باعث صرفه جویی در فضای مفید تونل می شود. لوله های فلزی را معمولاً به وسیله مفتول های فلزی یا وسایل دیگر نگهداری نصب میکنند. لوله های پارچه ای معمولاً به فاصله هر چند متر حلقه های مخصوصی دارند که به کمک آنها میتوان به سهولت لوله را به میخهایی که در تونل نصب می شود آویزان کرد. از آنجا که ضمن حرکت هوا در لوله های تهویه، به خصوص لوله های پارچه ای، مقداری الکتریسیته ساکن تولید می شود که ممکن است جرقه تولید کند، لذا در فواصل مناسب بایستی این لوله ها را به ریل یا وسایل فلزی دیگر موجود در تونل وصل کرد تا الکتریسیته آنها به زمین تخلیه شود.

۱۰-۱-۴ بادبزن ها

بادبزنهایی را که برای تهویه جبهه کار تونلها به کار می روند از نقطه نظر نیروی محرکه به دو دسته بادبزنهای با موتور هوای فشرده و بادبزنهای با موتور برقی تقسیم می کنند. هریک از این دو دسته خود ممکن است از نوع محوری یا شعاعی باشد.

بادبزنهای با موتور هوای فشرده

این بادبزن ها از جمله متداولترین بادبزن ها در تونل های معادن زغال سنگ هستند. گر چه موتور هوای فشرده سروصدای زیادی دارد و راندمان آن چندان بالا نیست ولی به خاطر ایمنی بیشتر، از نوع برقی متداولتر است. بادبزن با موتور هوای فشرده را معمولاً از نوع محوری می سازند. نیروی محرکه این بادبزن ها به وسیله یک توربین هوای فشرده تامین می شود.

بادبزنهای با موتور برقی

استفاده از این بادبزن ها راندمان بهتری دارد. بادبزن برقی نیز در دو نوع شعاعی و محوری ساخته می شود که نوع محوری آن مناسب تر است و به تدریج جای بادبزن شعاعی را که دارای ابعاد بزرگ و وزن زیاد

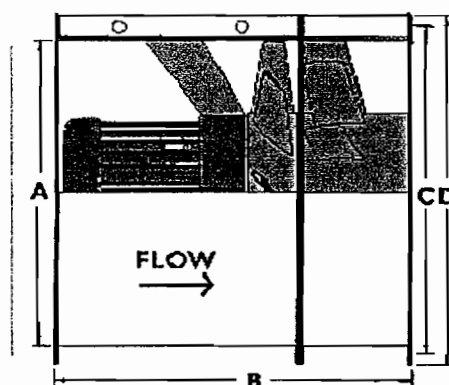
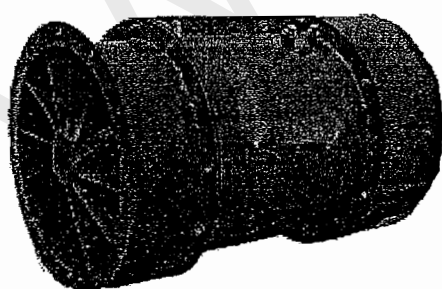
است می گیرد. بادبزنهای برقی را طوری می سازند که موتور و چرخ گردنده آن مشترکاً در پوشش واحدی قرار می گیرد و این امر باعث سهولت حمل و نقل آنها می شود (مدنی، ۱۳۷۸).

برای برخی شرایط طبق مقررات OSHA سیستم تهویه باید دو طرفه (reversible) باشد. جریان هوا در بادبزنهای با جریان محوری را می توان با نصب سویچ برعکس کننده، براحتی برعکس نمود. برای تونل های طویل، معمولاً از بادبزنهای با جریان محوری استفاده می شود که همراه با پیشرفت حفاری تونل بادبزنهای دیگر نیز در خط لوله تهویه نصب می شود. این سیستم می تواند هم بصورت دهشی و هم بصورت مکشی مورد استفاده قرار گیرد (Bickel et al., 1996).

در جدول ۲-۴ مشخصات بعضی از بادبزنهای برقی روسی متداول در ایران درج شده است. در شکل ۱-۴ یک نمونه بادبزن محوری و در جدول ۳-۴ ابعاد مربوط به آن داده شده است.

جدول ۲-۴- مشخصات بعضی از بادبزنهای برقی روسی متداول در ایران

BMII 5-240	BMII 2-200	BM-300	BM-200	Ka-600	Ka-500	Ka-400	نوع بادبزن مشخصات فنی
۶۷۰	۵۳۰	۶۰۰	۵۵۰	۶۰۰	۵۰۰	۴۰۰	قطر استوانه گردنده (mm)
۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۱۴	۰/۱۶۵	۰/۱۶۵	۰/۱۶۵	حداکثر راندمان (%)
۲۰/۴	۷/۶	۲۴	۶/۳	۳۰	۱۱	۳/۸	قدرت موتور (kW)
۲۴۷	۱۹۰	۳۱۵	۲۰۰	۴۷۰	۲۶۵	۱۴۰	وزن (kg)



شکل ۱-۴- نمونه یک بادبزن محوری ساخت شرکت SMJ

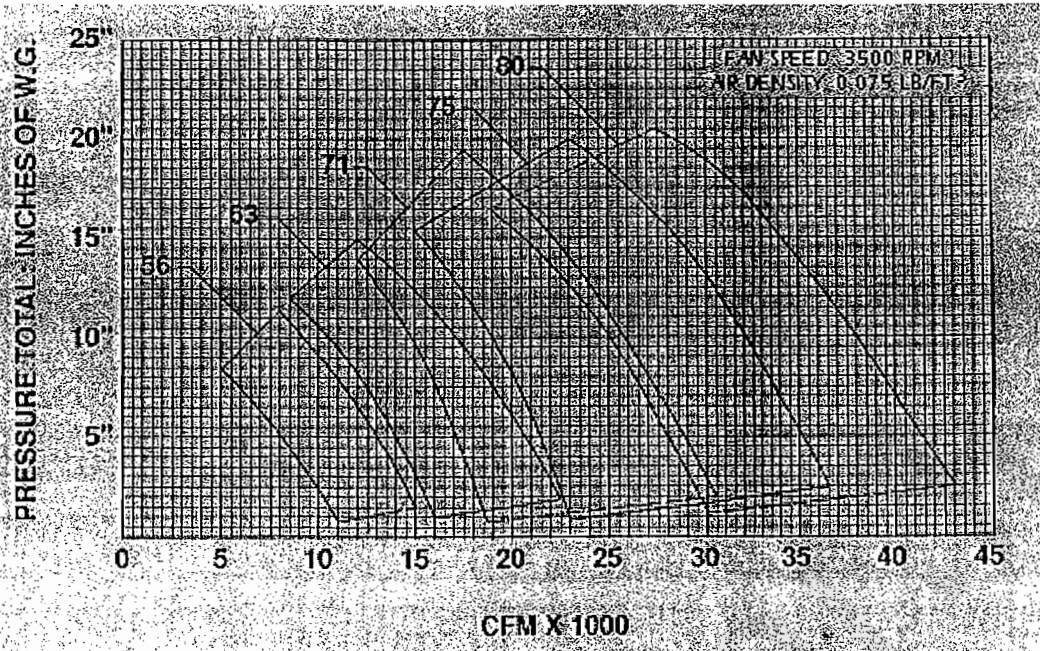
جدول ۴-۳- شماره ابعاد مربوط به بادبزن های محوری
نشان داده شده در شکل ۴-۱

FAN SIZE	A	B	D	HP	RPM
56	22" (56cm)	44" (112cm)	27.5" (70cm)	25 - 40	3500
63	25" (63cm)	47" (119cm)	30.5" (77cm)	25 - 40	3500
71	28" (71cm)	50" (127cm)	33.5" (85cm)	40 - 75	3500
75	30" (75cm)	50" (127cm)	35.5" (90cm)	50 - 100	3500
80	31.5" (80cm)	50" (127cm)	37" (94cm)	50 - 100	3500

۴-۱-۱۱ منحنی مشخصه بادبزنها

یکی از مهمترین خصوصیات تهویه جبهه کار تونلها این است که بادبزن بایستی مقدار هوای لازم را در لوله ای که طول آن در حال تغییر است، به جریان اندازد. این بادبزنها باید به گونه ای ساخته شوند که این امر در راندمان آنها چندان تاثیری نداشته باشد. بدیهی است نقطه عملکرد، محل تلاقی منحنی های مشخصه بادبزن و لوله تهویه است. بدین ترتیب هر قدر شاخه منحنی مشخصه به حالت قائم نزدیکتر باشد، وضعیت بادبزن مناسبتر است.

در شکل ۴-۲ منحنی های مشخصه بادبزن های نشان داده شده در شکل ۴-۱ به عنوان نمونه نشان داده شده است.



شکل ۴-۲- منحنی‌های مشخصه بادبزن‌های نشان داده شده در شکل ۴-۱

۴-۱-۱۲ استفاده از چندین بادبزن

از آنجا که طول لوله تهویه با ازدیاد طول تونل افزایش می‌یابد، در اینصورت اگر مشخصات بادبزن ثابت بماند، شدت جریان ناشی از آن به مرور کم و هوارسانی مشکل می‌شود. برای اینکه در تمام مراحل هوای کافی به وسیله بادبزن به جریان افتد، روشهای ذیل را می‌توان به کار برد:

الف - از ابتدای کار، یک بادبزن قوی در نظر گرفته شود به طوری که در آخرین مراحل کار نیز قادر باشد حجم مورد نظر از هوا را به جریان اندازد. عیب این روش آن است که در ابتدای کار که طول لوله تهویه و در نتیجه مقاومت آن کم است، شدت جریان و سرعت هوا زیاد است و تولید گرد و غبار خواهد کرد. همچنین مقداری انرژی در این روش بیهوده تلف می‌شود.

ب - ممکن است بادبزنی را به کار برند که زاویه تمایل پره‌های آن، و در نتیجه شدت جریانش، قابل تنظیم باشد. عیب این روش آن است که نوع بادبزن قابل تنظیم با قدرتهای کوچک خیلی گران است.

ج - در این روش ابتدا یک بادبزن کوچک و سپس در مراحل مختلف بادبزنهایی با قدرتهای متفاوت نصب میکنند. این امر مستلزم داشتن بادبزنهایی با قدرتهای مختلف است که می‌توان از نقاط ضعف این روش دانست.

د- در این طریقه، که متداولترین روشهاست، ابتدا از یک بادبزن استفاده کرده و در مراحل بعد توام با افزایش طول لوله، از دو یا چند بادبزن به حالت سری یا موازی استفاده می‌کنند. برای بالا بردن فشار هوا می‌توان دو یا چند بادبزن را بطور سری بهم متصل نمود و برای افزایش دبی هوا باید بادبزن‌ها را بصورت موازی بهم متصل کرد.

۴-۲ آبکشی تونل‌ها

مقدار مشخصی از آب ورودی به تونل، در صورت حفاری در جهت سربالایی بطور ثقلی قابل تخلیه است. این آب از طریق نهري که در یک طرف تونل قرار دارد به بیرون هدایت می‌شود. در مورد تونل‌هایی که با دستگاه TBM حفاری می‌شود آب از قسمت گودی کف (invert) تونل می‌تواند به بیرون هدایت شود. در صورتی که مقدار آب ورودی به تونل زیاد باشد یا در صورتی که تونل در جهت سرازیری حفر شود نیاز به پمپاژ برای تخلیه آب خواهد بود. در این موارد آب در گودال‌هایی (sumps) که در فواصل ضروری از همدیگر قرار گرفته‌اند جمع‌آوری شده و بوسیله پمپ‌های کف‌کش به بیرون از تونل پمپ می‌شود.

آب در گودی‌های موجود در سینه کار جمع شده و توسط پمپ کف‌کش قابل حمل الکتریکی و یا بادی به اولین گودال ایجاد شده دائم منتقل می‌شود. لوله تخلیه آب معمولاً از دیواره تونل آویزان می‌شود.

از آنجائیکه مقدار آب ناشی به تونل قابل پیش‌بینی دقیق نبوده و نظر به اینکه مقدار آب در طی زمان معمولاً کم می‌شود، سیستم آبکشی باید دارای حداکثر انعطاف‌پذیری باشد. پمپ‌های اصلی باید مجهز به کلیدهای اتوماتیک شناور باشند. مشخصات پمپ‌های مورد استفاده باید با محدوده وسیعی از فشارها و دبی‌ها قابل انطباق باشد.

آبی که از داخل تونل به بیرون از آن تخلیه می‌شود باید طبق مقررات زیست‌محیطی دفع شود. در بعضی موارد ممکن است نیاز به استفاده از حوضچه‌های ته‌نشینی یا سایر اشکال تصفیه آب باشد.

۴-۳ جابه جایی مواد و تجهیزات اجرایی

هر پروژه تونل سازی به یک سیستم حمل و نقل اصلی برای جابجایی پرسنل و مواد به داخل و خارج تونل نیاز دارد. این سیستم معمولاً جهت حمل مواد حفاری از سینه کار به بیرون از تونل نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

دو نوع حمل و نقل اصلی برای تونل سازی وجود دارد. یکی استفاده از خط آهن و انواع واگن ها و دیگری استفاده از راه (roadbed) و وسایل نقلیه چرخ لاستیکی .

۴-۳-۱ خط آهن

از نقطه نظر مصرف انرژی، خط آهن کارآمدترین شیوه حمل مواد را در تونل تامین می کند.

مزایا:

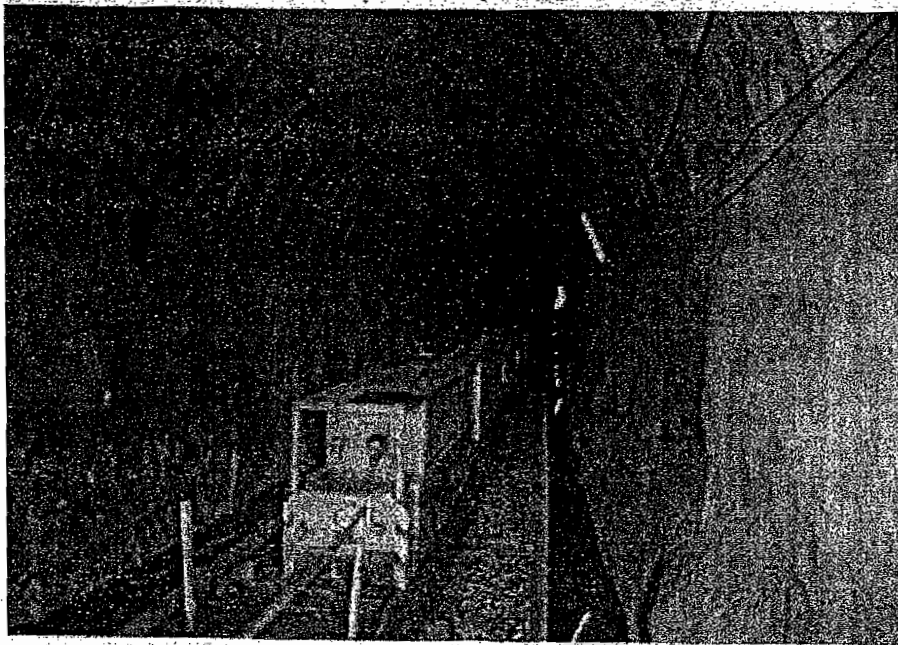
- ۱- سهولت تعمیر و نگهداری
- ۲- حداقل نیاز به تهویه
- ۳- سازگاری با اکثر روش های حفاری و بارگیری
- ۴- قابلیت هماهنگی با تقریباً تمام تونل ها با ابعاد مختلف
- ۵- توانایی استفاده از چندین منبع انرژی
- ۶- سیستم هدایت ثابت استفاده از حد آزاد (clearance) کوچکتری را امکان پذیر می سازد
- ۷- هیچ محدودیتی در ارتباط با طول تونل وجود ندارد.

معایب:

- ۱- نیاز به توسعه مداوم در نزدیکی سینه کار دارد.
- ۲- محل عبور ثابت بوده و یا فقط نیمه متحرک (semimovable) می باشد.
- ۳- در صورت از خط خارج شدن واگن ها یا دیگر حوادث، تمام سیستم از کار می افتد.
- ۴- مراکز تخلیه بار کمابیش ثابت هستند.
- ۵- این سیستم امکان فعالیت در کف تونل را محدود می کند.

محدودیت ها:

- ۱- شیب ۳٪ یک محدودیت عملی برای ریل محسوب می شود، هر چند شیب تا ۶٪ هم در شرایط خاص مورد استفاده قرار گرفته اند. شیب های تندتر نیاز به استفاده از تجهیزات خاصی مثل کابل ها (cables) و بالابر ها (hoists) دارد. تمهیدات ایمنی جهت جلوگیری از حوادث برای شیب های بیش از ۱٪ باید در نظر گرفته شوند.
- ۲- با استانداردهای فعلی اجرا و نگهداری، سرعت به حدود 15mph (24km/h) محدود می شود. با اعمال شرایط بهتر در ساخت ریل و زیرسازی، سرعت های بالاتر نیز امکان پذیر است.



شکل ۳-۴- سیستم ریلی مورد استفاده در تونل گاوشان



شکل ۴-۴- تخلیه مواد حفاری شده توسط TBM به Tipping Ramp - تونل گاوشان

نیروی محرکه

واگن‌های روی ریل به وسیله لوکوموتیوهایی که دارای موتورهای از نوع احتراق داخلی و یا موتورهای برقی هستند حرکت می‌کنند. هوای فشرده تنها برای کارهای سبک و فواصل کوتاه مناسب است. به دلایل ایمنی و زیست محیطی تنها سوخت دیزلی قابل استفاده در کارهای زیرزمینی می‌باشد. لوکوموتیوهای دیزلی بیشترین انعطاف پذیری را دارند از این نظر که می‌توانند محدوده قدرت زیادی داشته و نیازی به منابع انرژی خارجی نداشته باشند. بزرگ‌ترین عیب این سیستم‌ها گازهای سمی منتشر شده می‌باشد. این امر ظرفیت بالاتر تهویه را طلب می‌کند و در تونل‌های بزرگ می‌تواند به عنوان یک مشکل اساسی مطرح گردد.

قوانین زیست محیطی بر لزوم فرآوری شدن گازهای خروجی از موتورهای دیزلی قبل از ورود به فضای تونل تاکید دارند. هدف اصلی کاهش میزان مونوکسید کربن و اکسیدهای نیتروژن و رساندن آنها به حدی است که قابل رقیق شدن توسط سیستم تهویه تونل باشند. بدین منظور از فیلترهای (scrubber) از نوع کاتالیتیک (catalytic) یا از نوع واشر (washer) استفاده می‌شود. مدل کاتالیتیک به نگهداری و تعمیرات کمتری نیاز دارد اما برخی آژانس‌های ایمنی این مدل را دارای مقاومت کمتر در برابر آتش و دارای اطمینان کمتری تلقی می‌کنند.

لوکوموتیوهای برقی می‌توانند با باتری‌های قابل شارژ یا با برق بالاسری (overhead trolley conductor) کار کنند. لوکوموتیوهایی که با باتری کار می‌کنند قابلیت‌هایی مشابه لوکوموتیوهای دیزلی دارند با این مزیت که گازهای سمی متصاعد نمی‌کنند. هر چند محدوده فعالیت آنها محدود به مقدار انرژی قابل ذخیره شدن در باتری می‌شود. این لوکوموتیوها به باتری‌های یدکی و نیز تجهیزاتی جهت شارژ و تعمیر آنها احتیاج دارند.

به استثنای بدنه واگن‌های بزرگ، حداقل شعاع انحنا در تونل بسته به ابعاد چرخ‌های لوکوموتیو و واگن‌ها دارای محدودیت است. (جدول ۴-۴).

فاصله بین ریل‌ها در محل انحنا باید بیشتر شود. این فاصله معمولاً به ازای هر ۲/۵ درجه انحنا به میزان ۱/۱۶ اینچ افزایش می‌یابد.

۴-۳-۲ وسایل نقلیه چرخ لاستیکی

حمل و نقل با وسایل نقلیه چرخ لاستیکی انعطاف پذیری بالایی دارد چرا که کارایی آنها محدود به وجود تجهیزات ثابت مانند خط آهن نمی‌شود. طیف وسیعی از وسایل نقلیه با اندازه‌ها متفاوت که معمولاً دیزلی بوده و روی اگزوز آنها فیلتر (scrubber) نصب شده، وجود دارند.

جدول ۴-۴- حداقل شعاع انحنای ریل بر حسب متر

قطر چرخ (cm)											حداکثر اندازه پایه چرخ (cm)
۹۱.۴	۸۳.۸	۷۶.۲	۷۱.۱	۶۶.۰	۶۱.۰	۵۵.۹	۵۰.۸	۴۵.۷	۴۰.۶	۳۵.۶	۹۱.۴
				۴.۳	۴.۰	۴.۰	۴.۰	۳.۷	۳.۷	۳.۷	۹۶.۵
			۴.۶	۴.۶	۴.۳	۴.۳	۴.۳	۳.۷	۳.۷	۳.۷	۱۰۱.۶
		۴.۹	۴.۹	۴.۹	۴.۳	۴.۳	۴.۳	۴.۰	۴.۰	۴.۰	۱۰۶.۷
		۴.۹	۴.۹	۴.۹	۴.۶	۴.۶	۴.۶	۴.۳	۴.۳	۴.۳	۱۱۱.۸
	۶.۱	۵.۲	۵.۲	۵.۲	۴.۹	۴.۹	۴.۹	۴.۶	۴.۶	۴.۶	۱۲۱.۹
۶.۷	۶.۷	۵.۸	۵.۸	۵.۸	۵.۲	۵.۲	۵.۲	۴.۹	۴.۹	۴.۹	۱۳۷.۲
۷.۶	۷.۶	۶.۴	۶.۴	۶.۴	۵.۸	۵.۸	۵.۸	۵.۵	۵.۵		۱۵۲.۴
۷.۶	۷.۶	۶.۴	۶.۴	۶.۴	۵.۸	۵.۸	۵.۸	۵.۵	۵.۵		۱۶۷.۶
۹.۴	۹.۴	۷.۹	۷.۹	۷.۹	۷.۰	۷.۰	۷.۰	۶.۷			۱۸۲.۹
۱۰.۴	۱۰.۴	۸.۵	۸.۵	۸.۵	۷.۹	۷.۹	۷.۹	۷.۶			۲۱۳.۴
۱۱.۹	۱۱.۹	۱۰.۱	۱۰.۱	۱۰.۱	۹.۱	۹.۱	۹.۱	۸.۸			۲۴۳.۸
۱۳.۷	۱۳.۷	۱۱.۳	۱۱.۳	۱۱.۳	۱۰.۴	۱۰.۴	۱۰.۴				۲۷۴.۳
۱۵.۵	۱۵.۵	۱۳.۱	۱۳.۱	۱۳.۱	۱۱.۹	۱۱.۹	۱۱.۹				۳۶۵.۸
۲۰.۷	۲۰.۷	۱۷.۱	۱۷.۱	۱۷.۱	۱۵.۸	۱۵.۸	۱۵.۸				

مواد حفاری شده را با استفاده از وسایل نقلیه چرخ لاستیکی می توان مستقیماً به یک یا چند محل دپوی مورد نظر حمل کرد. در صورت وجود چند سینه کار، وسایل نقلیه چرخ لاستیکی می توانند بسته به میزان حفاری در سینه های مختلف کار از یک سینه کار به سینه کار دیگر منتقل شوند.

مزایا:

- ۱- در یک تونل عریض، وسایل نقلیه به سهولت می توانند از کنار هم عبور کنند.
- ۲- امکان توقف کل کار بعثت بروز مشکل برای یک وسیله نقلیه به حداقل می رسد.
- ۳- حداکثر انعطاف پذیری در عملیات را دارد.
- ۴- امکان استفاده از سیستم ترکیبی بارگیری و حمل وجود دارد.
- ۵- کار در کف تونل به آسانی قابل انجام است.

معایب:

- ۱- نگهداری زیرساخت راه (کف تونل) مشکل است مخصوصا در صورتی که جنس زمین نرم و خیس باشد.
- ۲- به سیستم تهویه قویتری نیاز دارد.
- ۳- عدم سازگاری با برخی سیستم‌های حفاری و بارگیری.
- ۴- در تونل‌های باریک، نقاط عبور وسایل نقلیه از کنار هم محل مشخصی دارند.
- ۵- وسایل نقلیه با اندازه‌های معمول در تونل‌های کوچک قابل استفاده نیستند. ظرفیت حمل، حتی با استفاده از تجهیزات خاص یا تورفتگی دیواره‌ها برای عبور، در تونل‌های کوچک کاهش می‌یابد.
- ۶- موتور دیزل تنها منبع تامین انرژی لازم است.
- ۷- به استثنای تونل‌های خیلی بزرگ، تامین حد آزاد (clearance) معمولا مشکل است.

محدودیت‌ها:

- ۱- شیب‌های ۱۰٪ هیچ مشکلی ندارند. شیب‌های تا ۲۵٪ نیز امکان‌پذیر است.
- ۲- با یک زیرسازی خوب، سرعت‌های ۲۵ مایل بر ساعت (۴۰ کیلومتر بر ساعت) غیرعملی نیست. سرعت تا ۵۰ مایل بر ساعت (۸۰ کیلومتر بر ساعت) برای وضعیت راه بسیار عالی نیز امکان‌پذیر است.
- ۳- به علت مشکلات تهویه و زیرسازی، حمل و نقل با کامیون در تونل‌های با طول بیش از حدود ۲ مایل (۳/۲ کیلومتر) اقتصادی نیست.

۴-۳-۳ نوار نقاله

پیشرفت در ساخت دستگاه‌های TBM با میزان تولید زیاد مواد حفاری شده، استفاده از نوار نقاله در تونل‌سازی را متداول کرده‌است. نوار نقاله می‌تواند در اندازه‌ای انتخاب شود که حداکثر خروجی کوتاه مدت تونل را حمل کند.

مزایا:

- ۱- ظرفیت جابه‌جایی مواد حفاری شده با هر سرعت تولید
- ۲- قابل انطباق با تقریبا هر اندازه‌ای از تونل
- ۳- نیاز به حد آزاد (clearance) نسبتا کم
- ۴- قابلیت اطمینان عالی و نیاز کم به تعمیر و نگهداری
- ۵- حمل مواد بصورت پیوسته
- ۶- قابل انطباق برای حمل مواد فله‌ای (bulk material) به درون تونل
- ۷- مناسب برای شیب‌های زیاد

معایب:

- ۱- هزینه سرمایه گذاری اولیه بالا
- ۲- خراب شدن یک قسمت موجب توقف کل سیستم می شود.
- ۳- حداکثر اندازه مواد قابل حمل محدود است اما با خرد کردن مواد این مشکل قابل رفع است.
- ۴- به سیستم سازه ای گسترده ای به عنوان تکیه گاه نیاز دارد.
- ۵- در نزدیک سینه کار نیاز به سیستم پیچیده ای جهت توسعه دارد.
- ۶- در صورت وجود انحنای زیاد در تونل، نیاز به طراحی خاص دارد.

محدودیت ها:

- ۱- شیب مسیر چه بصورت سربالایی و چه بصورت سرپایینی به ۱۸ تا ۲۰ درجه محدود می شود.
- ۲- بسته به پهنای نوار، حداکثر اندازه مواد قابل حمل حدود ۸ تا ۱۸ اینچ (۲۰ تا ۴۵ سانتی متر) می باشد.

۵ - پایدارسازی تونل‌ها

۵-۱ مقدمه

در اغلب موارد، انواع راکبالت (rockbolt) و میل مهار (dowel) همراه با شاتکریت مسلح شده با توری سیمی، سیستم اصلی پایدارسازی و حائل‌بندی تونل‌ها تشکیل می‌دهند. در برخی موارد ممکن است نیاز به حائل‌های چدنی، قاب‌های فولادی، سگمنت‌های بتنی و نیز پوشش بتنی در جا نیز باشد. مهمترین جنبه‌های استفاده از حائل‌ها در اینجا مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۵-۲ حائل‌های چدنی

به نظر می‌رسد تکنیک استفاده از چدن برای اولین بار به Peter Barlow در ۱۸۹۶ برای ساخت تونل Tower Subway در لندن برگردد. اگرچه یک طراحی مشابه توسط Marc Brunel در ۱۸۱۸ برای تونل Thames در Rotherhithe انگلیس همراه با سپر پیشنهاد شده بود ولی طرح او سرانجام رد شد. قبل از استفاده از سپر تونل‌زنی، برای حفاظت دائمی تونل‌ها از مصالح بنایی استفاده می‌شد ولی این مصالح برای استفاده در تونل‌زنی با سپر مناسب نیستند زیرا این مصالح برای کسب مقاومت لازم نیاز به زمان داشتند تا هم در مقابل بار اعمال شده توسط زمین مقاومت کنند و هم نیرویی اعمال شده توسط جک‌های رانشی را تحمل کنند. لذا استفاده از پوشش چدن خاکستری (grey cast iron) متداول شد که هم به سهولت قابل نصب هستند و هم بلافاصله پس از نصب توانایی مقابله با نیروهای شعاعی (radial) و طولی (longitudinal) را دارند. این نوع پوشش‌ها بیش از ۱۰۰ سال است که مورد استفاده قرار می‌گیرند اگرچه برخی جزئیات تغییر کرده است.

۵-۲-۱ چدن خاکستری (Grey iron)

چدن خاکستری نوع سنتی چدن برای استفاده در پوشش تونل‌ها از زمان اولین استفاده آن در تونل Tower Subway در ۱۸۶۹ بوده است. کلمه خاکستری بدلیل ظاهر خاکستری ناشی از وجود گرافیت (graphite) آزاد مورد استفاده قرار می‌گیرد. چدن خاکستری بدلیل ویژگی‌هایی که داشت و نیز بدلیل وفور آن در اواسط ۱۸۰۰ به عنوان یک حائل استاندارد متوسط استفاده می‌شد. ویژگی‌های خاص چدن خاکستری که آن را برای استفاده به عنوان حائل در تونل‌ها توجیه می‌کرد شامل مقاومت فشاری بالا و مقاومت آن در برابر خوردگی بود. هر چند مقاومت کششی چدن خاکستری در مقایسه با مقاومت فشاری اش کم است و این می‌تواند به عنوان یک فاکتور مهم در طراحی پوشش باشد.

۵-۲-۲ چدن نودولار (nodular iron)

تکنیک ساخت چدن نودولار در نتیجه تحقیقات متالوژی در سال ۱۹۴۷ توسعه یافت. مشخصات مکانیکی چدن نودولار شبیه فولاد می باشد. مقاومت فشاری چدن نودولار کمی بیشتر از چدن خاکستری است اما مزیت اصلی آن نسبت به چدن خاکستری مقاومت کششی بالاست که برابر مقاومت فشاری آن است. این افزایش مقاومت کششی و همچنین ضربه ای علاوه بر شکل پذیری و مدول الاستیسیته بالا به پوشش نودولار این اجازه را می دهد که بتواند تحت بارهای سنگین قرار گرفته و تغییر شکل کمتری داشته باشد. همچنین چدن نودولار قابلیت ریختگری، قابلیت تراش و مقاومت در برابر خوردگی بالایی نسبت به چدن خاکستری دارد. با توجه به اینکه هزینه چدن نودولار تقریباً دو برابر چدن خاکستری است اصولاً باید در مواردی از آن استفاده شود که بهبود مشخصات کششی و دوام کاربرد آن را توجیه می کند.

با رواج پوشش های بتنی سگمنتی قبل از جنگ جهانی دوم در نتیجه کمبود چدن، کاربرد پوشش های چدنی بطور قابل توجهی کمتر شده است. قبل از آن، پوشش های چدنی بطور وسیعی در انواع تونل ها از جمله تونل های راه و راه آهن بکار گرفته می شدند.

محدوده وسیعی از پوشش های بتنی پیش ساخته برای تونل ها توسعه یافته اند و بطور کلی مشخص شده است که این پوشش ها اقتصادی تر از پوشش های چدنی هستند. این روند با افزایش نسبی قیمت چدن و بتن سرعت گرفت به این ترتیب که در دوره زمانی اوایل دهه ۱۹۶۰ تا اواسط دهه ۱۹۷۰ قیمت چدن ۴ تا ۵ برابر افزایش یافت در حالیکه قیمت بتن ۲ یا ۳ برابر شد.

۵-۳ حائل های فولادی

مقاطع فولادی نورد شده مورد استفاده زیادی در تونل های حفر شده در سنگ دارند. بطور معمول، این قبیل حائل ها در وضعیت هایی بکار برده می شوند که توده سنگ خرد شده است یا تا حدی ضعیف است که راکبوت غیر قابل استفاده می باشد یا احتمال گسیختگی وسیع در اثر حفاری وجود دارد. شرایط تنش های درجای بالا نسبت به مقاومت سنگ نیز مستلزم روش های حائل بندی مناسب از قبیل استفاده از حائل های فولادی می باشد.

معمول ترین مقطع مورد استفاده در حائل های فولادی مقطع H شکل است که شکل توسعه یافته مقطع I شکل تیرهای فولادی مورد استفاده در صنعت ساختمان است. تیرهای با مقاطع I و H شکل براساس ایده سازه ای قراردادن جرم مقطع دور از تار خنثی جهت افزایش مقاومت خمشی مقطع میباشد. برای یک شاهتیر با مقطع H شکل مقاومت حول محور X چندین برابر مقاومت حول محور Y است.

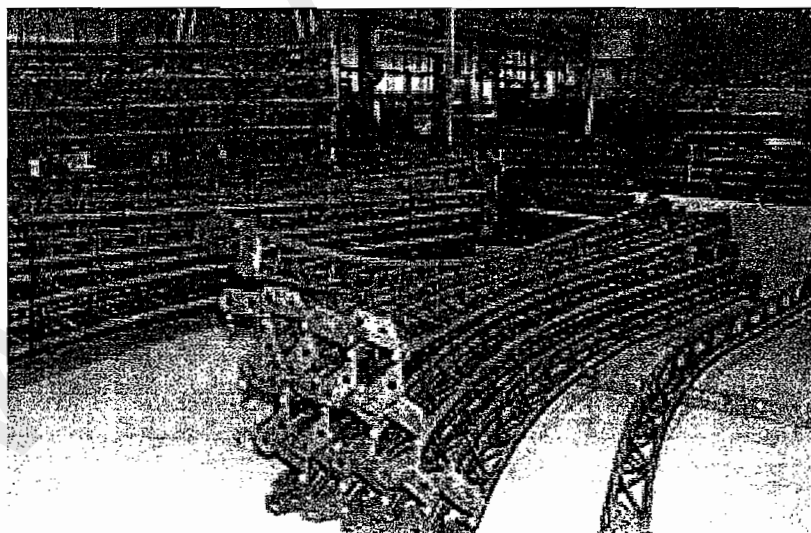
مشکل اصلی پوشش های فولادی مقاومت نسبتاً کم آنها در برابر خوردگی می باشد . این مشکل را می توان تاحدی با گالوانیزه کردن یا رنگ کردن پوشش برطرف کرد اما اینکار باعث افزایش هزینه می شود در مواردی که از بتن درجا بعنوان پوشش نهایی استفاده می شود پوشش فولادی عملاً داخل بتن قرار می گیرد که بدین ترتیب از خوردگی فولاد جلوگیری بعمل می آید.

۴-۵ تیر مشبک (lattice girder)

تیرهای مشبک از نظر تحمل لنگر خمشی می توانند مانند قاب های فولادی عمل کنند ولی وزن کمتری نسبت قاب های فولادی دارند .

در شکل ۱-۵ نمونه ای از قطعات تیر مشبک نشان داده شده است و در شکل ۲-۵ نمایی از نصب این تیرها ارائه شده است.

شبهه باز این تیرها موجب می شود که شاتکریت براحتی داخل آن جای گرفته و بنابراین یک سازه مرکب (composite structure) تشکیل شود.



شکل ۱-۵- نمونه ای از قطعات تیر مشبک



شکل ۵-۲- نصب تیر مشبک - تونل گاوشان

۵-۵ انواع راکبولت و میل مهار و کاربرد آنها

شکل ۵-۳ کاربرد معمول راکبولت ها و میل مهارهایی که برای کنترل خرابیهای مختلف در توده های سنگ در اطراف تونل ها نصب می شوند را نشان می دهد.

انواع مختلف سیستم راکبولت و میل مهار وجود دارد و بطور کلی می توان تقسیم بندی زیر را در مورد آنها بعمل آورد:

انواع راکبولت:

- راکبولت های گیردار شده بصورت مکانیکی (mechanically anchored rockbolts)

- راکبولت های گیردار شده با رزین (resin grouted rockbolts)

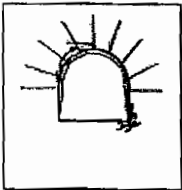
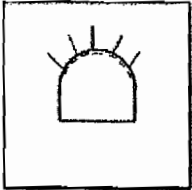
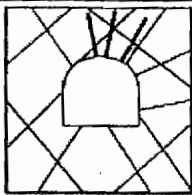
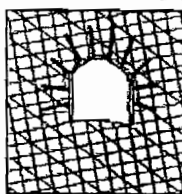
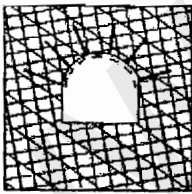
انواع میل مهار:

- میل مهارهای تزریق شده (grouted dowels)

- میل مهارهای اصطکاکی یا مجموعه شکافدار (split set)

- میل مهارهای از نوع Swellex

تفاوت راکبولت با میل مهار آن است که می توان در راکبولت پیش تنیدگی (کشش) ایجاد نمود. میل مهارها در مواردی بکار می روند که نصب خیلی سریع آنها امکانپذیر باشد. میل مهارها صرفا وقتی کشیده شده و تحت بار قرار می گیرند که سنگ اطراف آنها بتواند تغییر شکل داده و نتیجتا راکبولت به کشش بیفتد. اگر این میل مهارها خیلی دور از سینه کار نصب شوند، بیشتر تغییر شکل های آنی و کوتاه مدت سنگ قبلا اتفاق افتاده و عملا میل مهار موثر نخواهد بود. در صورتی که پیمانکاری ماهر مسئول اجرا و نصب این راکبولت ها بوده و زمان نصب آنها حساب شده باشد، میل مهارها می توانند ابزار خیلی موثری در پایدار سازی تونل باشند. ولی در صورت عدم نصب مناسب، حاصل آن در شرایط خوب هدر دادن سرمایه و در بدترین حالت باعث ناپایداری و ریزش تونل خواهد بود.

	سطح تنش بالا	سطح تنش پایین
سنگ سالم	 توده سنگ سالم که در معرض تنشهای زیادی قرار دارد. استفاده از راک بولت یا میل مهار همراه با توری سیمی یا شاتکریت مانع شکست سنگها و سقوط آنها می شود.	 توده سنگ سالم که در معرض تنشهای کمی قرار دارد. مهار بندی مختصر موجب ایمنی بیشتر می گردد.
سنگ با درزه و ترکهای کم	 توده سنگ با درز و ترکهای کم در معرض تنشهای زیاد. با بکار بردن راکبولت یا میل مهارهای قوی که ناپیوستگیها را بیکدیگر می دوزند همراه با توری سیمی و شاتکریت یا شاتکریت الیافدار در سقف و دیوارها می توان مهار مناسب را ایجاد کرد.	 توده سنگ با درز و ترکهای کم در معرض تنشهای کم. نصب راکبولت بطور موضعی برای جلوگیری از ریزش سنگهای منفرد بکار می رود. بولتها باید کشیده شوند.
سنگ با درزه و ترکهای زیاد	 توده سنگ با درز و ترکهای زیاد در معرض تنشهای زیاد. در این موارد راکبولت یا میل مهارهای قوی همراه با توری سیمی و شاتکریت یا شاتکریت الیافدار باید مورد استفاده قرار گیرد. در شرایط خیلی بد ممکن است نیاز به قابهای فولادی با مفاصل لغزنده (sliding joints) باشد. کف تونل هم ممکن است برای جلوگیری از تورم (heave) نیاز به تیر کف یا تاوه بتنی داشته باشد.	 توده سنگ با درز و ترکهای زیاد که در معرض تنشهای کم قرار دارد. راک بولت گذاری مختصر به همراه مش یا شاتکریت می تواند مانع افتادن تکه سنگهای سقف و دیوارها شود.

شکل ۵-۳- نمونه ای از کاربرد راکبولت و میل مهار برای کنترل گسیختگی در شرایط مختلف توده سنگ

۵-۵-۱ راکبولتهای گیردار شده بصورت مکانیکی

مهمترین نوع راکبولتهای گیردار شده بصورت مکانیکی، راکبولت با پوسته منبسط شونده (expansion shell rockbolt) است. در توده های سنگی با کیفیت خوب می توان راکبولت را تا حد تنش تسلیم کشید. لیکن خرد شدن محلی سنگ در نقاطی که راکبولت گیردار شده است منجر به لغزش راکبولت در سنگ های با کیفیت ضعیف می گردد. پیچ های شکافدار و گوه (slotted bolt and wedge) نیز از انواع دیگر راکبولتهای گیردار شده بصورت مکانیکی هستند که امروزه از آنها استفاده چندانی نمی شود.

مهارى های مکانیکی، نظیر پوسته منبسط شونده که در شکل ۵-۴ مشاهده می شود. بطور وسیعی در کارهای عمرانی و معدنی مورد استفاده قرار گرفته است. تعداد زیادی از انواع گوناگون پوسته های منبسط شونده طراحی و تولید شده اند اساسا کلیه گیردار کننده های پوسته ای منبسط شونده به شیوه یکسانی عمل می کنند و انتخاب نوع گیردار کننده برای کارهای خاص معمولاً بیشتر بستگی به قیمت و قابلیت دسترسی به آن در بازار دارد.

در سنگ های سخت و باکیفیت خوب، مهارى های مکانیکی کارایی زیادی دارند و سریع و راحت می توان آنها را نصب نمود. در سنگ های ضعیف تر و نرم تر تاثیر گیردار کننده مکانیکی بعلت خرد شدگی محلی و موضعی سنگ در طول غلاف راکبولت، کاهش می یابد. در شیل های خیلی ضعیف، گل سنگ ها و ماسه سنگ های ضعیف، استفاده از گیردار کننده های مکانیکی توصیه نمی شود. انواع راکبولت با پوسته منبسط شونده از اصول مشابهی پیروی می کنند. گوه ای که به انتهای میله راکبولت متصل می شود به داخل غلاف گیردار کننده مخروطی شکل کشیده شده و در نتیجه بدنه راکبولت را با فشار بطرف دیواره های چال منبسط می سازد.

در پوش دوغاب بند لاستیکی (rubber grout seal) برای قرار دادن راکبولت در امتداد محور چال و برای آب بندی کردن دهانه چال در مقابل نشت دوغاب استفاده می شود. طریق دیگر آب بندی استفاده از خمیر زودگیری است که در دهانه چال مورد استفاده قرار می گیرد. در شکل ۵-۴ طرق مختلف نصب لوله های ورود و خروج دوغاب نشان داده شده است که در همه آنها (بجز چال های سربالا) تزریق از دهانه چال صورت می گیرد و لوله برگشت تا انتهای چال امتداد می یابد. تزریق هنگامی متوقف می شود که هوای داخل چال کاملاً خارج شده و دوغاب از لوله برگشت بیرون بزند.

یکی از بحرانی ترین مراحل تزریق راکبولتها آب بندی دهانه چال است. اولین اقدام مهم در این امر دقت در آماده سازی سطح سنگ و قرار دادن واشر است. عدم دقت در قرار دادن صحیح راکبولت و فقدان آماده سازی سطح سنگ، تقریباً آب بندی دهانه چال را غیر ممکن می سازد.

وقتی که امکان جاگذاری راکبوت در محل خود بگونه‌ای که سطح اطراف دهانه به اندازه کافی هموار باشد وجود ندارد، می‌توان با استفاده از ملات سطح صاف و مناسبی زیر واشر ایجاد نمود تا سطح تماس خوب فراهم گردد و امکان آب بندی دهانه چال بوجود آید. وارد کردن آب تحت فشار به داخل چال قبل از شروع تزریق موجب شسته و تمیز شدن چال شده و نیز می‌توان به این طریق چگونگی آب بندی دهانه چال را آزمایش نمود.

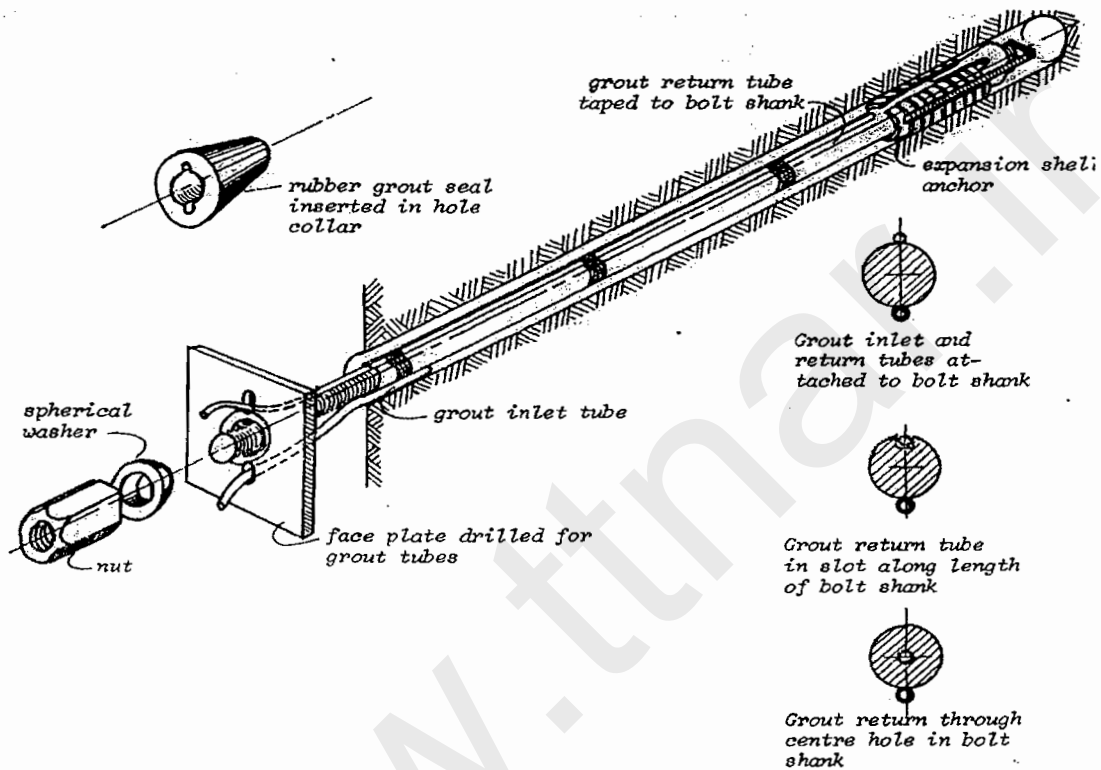
شکل ۴-۵ نمونه‌ای از لوله و وسایل تزریق را نمایش می‌دهد که برای استفاده در چال هایی که بصورت سربالا هستند مفید است. یک لوله پلاستیکی کوتاه (به قطر داخلی حدود ۸ میلیمتر و قطر خارجی حدود ۱۱ میلیمتر) برای تزریق دوغاب بکار می‌رود. برگشت دوغاب توسط لوله پلاستیکی دیگری به قطر داخلی ۶ میلیمتر و قطر خارجی ۸ میلیمتر که به سراسر راکبوت بسته شده است، انجام می‌شود. قطر اتصالات دستگاه تزریق باید چنان باشد که فقط به لوله تزریق بزرگتر متصل شود. در مواردی که تزریق در چال هایی که بصورت سربالایی هستند انجام می‌شود، تزریق باید از پایین و ته چال شروع شود و لوله برگشت کوتاهی به ابتدا و سرچال متصل گردد.

لوله برگشتی که در قسمت خارجی بدنه راکبوت پیچیده می‌شود در طول جابجایی و نصب راکبوت به آسانی صدمه دیده و خراب می‌شود و باید دقت خاص از این نظر بکار برد تا آسیبی به لوله وارد نشود. چنانچه این لوله آسیب ببیند باید میله راکبوت از چال خارج شده و تعویض گردد. چنانچه میله راکبوت را نتوان خارج نمود، لوله تزریق دیگری را می‌توان به داخل چال توسط مفتول محکم و سفتی هدایت کرد و سپس مفتول را بیرون کشید تا لوله در محل خود باقی بماند.

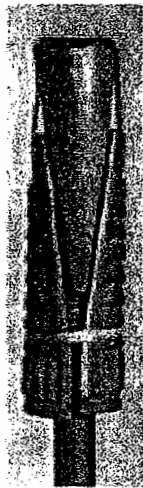
همانطور که در شکل ۴-۵ ملاحظه می‌شود، برای اینکه لوله برگشت در معرض آسیب کمتری قرار گیرد، می‌توان آن را در شکافی که روی میله راکبوت تعبیه شده جاسازی کرد یا از راکبوت توخالی برای این منظور استفاده کرد. علیرغم گران تر بودن آن نسبت به سیستمی که در بالا توصیف شد، این روش برای لوله برگشت دوغاب درجه اطمینان بالایی را فراهم می‌نماید. فشار تزریق دوغاب باید زیر kPa ۱۷۲ ($25lb/in^2$) حفظ شود تا از آسیب رساندن (jacking) به توده سنگ اجتناب شود. تزریق باید آنقدر ادامه یابد تا جریان پیوسته‌ای از دوغاب در داخل لوله برگشت برقرار شود.

از مزایای این راکبوت آن است که آن را می‌توان بلافاصله پس از نصب کشید و در مرحله بعدی پس از متوقف شدن تغییر مکان کوتاه مدت تزریق نمود. گیرداری خیلی مطمئن در سنگ های خوب ایجاد می‌کند و توان باربری زیادی را می‌توان تامین نمود.

از معایب این نوع راکبوت آن است که نسبتاً گران بوده و نصب صحیح آن نیاز به کارگران ماهر و نظارت دقیق دارد. به لوله های تزریق اغلب آسیب وارد می شود و لذا تست آنها با پمپاژ آب تمیز قبل از تزریق ضروری است.



شکل ۴-۵- راکبوت با پوسته منبسط شونده



Pattin bolt

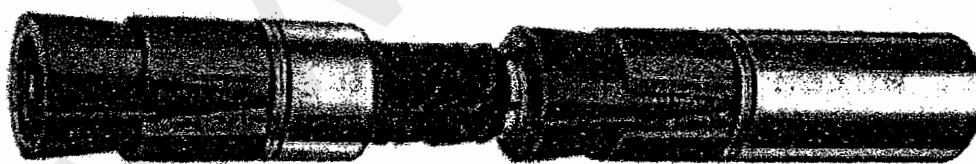


Goldenberg bolt



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 می گیرند یا در سنگهای ضعیف استفاده می شوند، 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 شده اند از دو محفظه جداگانه که یکی شامل رزین و دیگری شامل کاتالیست می باشد. ابتدا رزین ها در داخل چال حفاری شده قرار داده می شوند و سپس بولت به داخل رزین فروبرده می شود. بدین ترتیب پوشش پلاستیکی محفظه ها پاره شده و رزین و کاتالیست با یکدیگر مخلوط می گردند. نصب راکبولتهای رزین دار فقط چند دقیقه طول می کشد (بستگی به مشخصات رزین دارد) و مهار بسیار مقاومی را ایجاد می کنند.

این نوع مهار در اکثر سنگها خوب عمل می کند مانند شیل های ضعیف و گل سنگهایی که برای آنها راکبولتهای منبسط شونده مناسب نمی باشد. برای مصارف دائمی باید از راکبولتهای با تزریق کامل رزین استفاده کرد. در این موارد، تعدادی از کپسول های رزین کنگیر در کنار کپسولهای شامل رزین زودگیر کننده جا داده می شوند. پس از گیرش رزین تند گیر، بولت کشیده می شود و سپس گیرش رزین کنگیر آغاز می شود.

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:

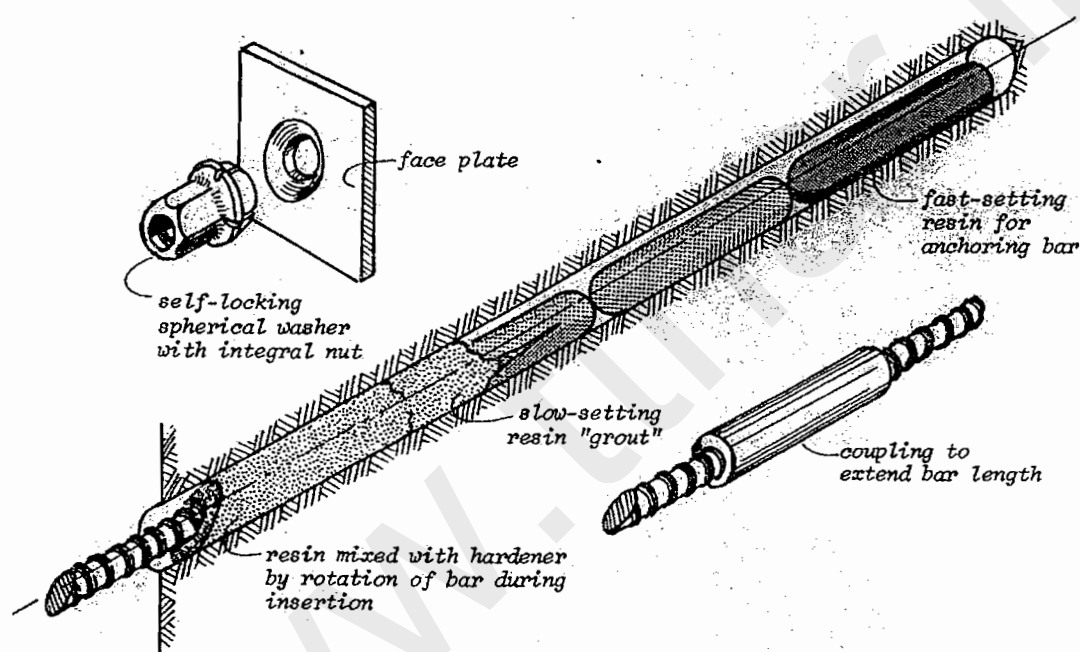
- ۱- سرعت بالا: نصب سریع بولتها را ممکن می‌سازد. بولتها را می‌توان در عرض چند دقیقه نصب و پس کشیده کرد و به این ترتیب به سرعت برای تونلها حائل فراهم نمود.
- ۲- دوام: این نوع رزین بولتها را در مقابل خوردگی در برابر آب، نمک و اسیدها و بازهای رقیق محافظت می‌کند.

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 کشورهایی است که خود آنها را تولید می کنند و لذا سرعت در دسترس بوده و مشکل نگهداری در انبار وجود ندارد.



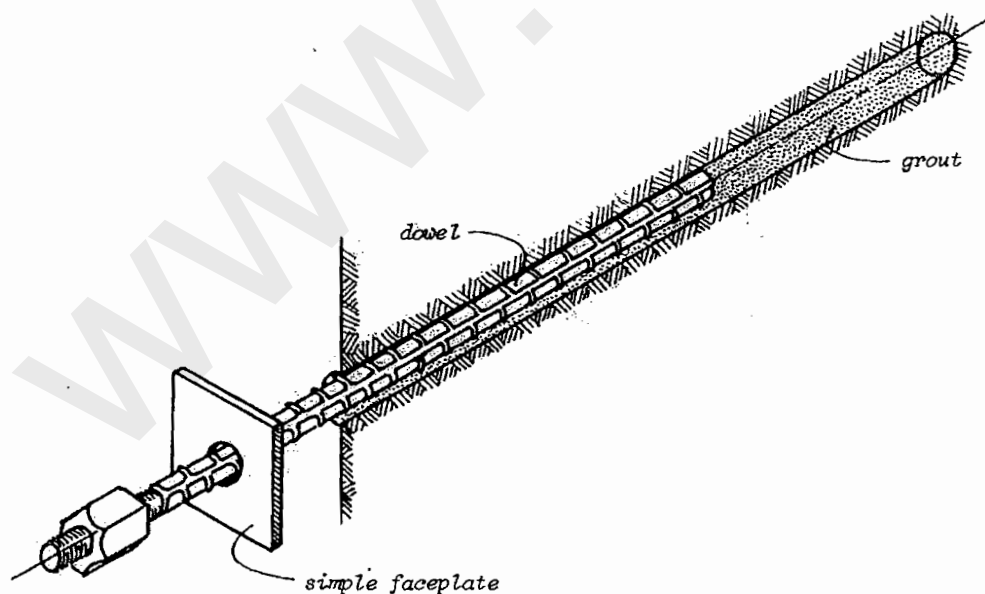
شکل ۵-۷- راکبولت گیردار شده با رزین

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 $0/3$ یا $0/35$) با گذاشتن لوله تزریق در انتهای سوراخ و با پیشروی تزریق، کشاندن آن به سمت بیرون انجام می گیرد. چنانچه ویسکوزیته دوغاب مورد استفاده مناسب باشد از حفره بیرون نمی ریزد. میل مهار تا نیمه در داخل سوراخ فرو می رود و قبل از فرو کردن تمام آن، خم کوچکی به آن داده می شود. این خم سبب می شود تا در هنگام گرفتن دوغاب، میل مهار در جای خود نگه داشته شود. پس از گرفتن دوغاب، صفحه پیشانی در محل خود قرار داده شده و مهره را سفت می نمایند. گذاشتن صفحه پیشانی ضروری است بدلیل اینکه اگر میل مهار طوری باشد که در برابر تغییر مکان سنگ واکنش نشان دهد، سنگ مجاور سوراخ تمایل به کشیده شدن از کنار میل مهار دارد، مگر اینکه توسط صفحه پیشانی نگه داشته شده باشد.

سیستم هایی هم عرضه شده اند که از کپسولهای حاوی پودر سیمان در آنها استفاده می شود که در آنها کپسولهای کوچکتر حاوی آب وجود دارد. عملیات نصب و چرخاندن میله باعث خورد شدن کپسول ها شده و یک دوغاب زودگیر ایجاد می شود. 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 میل مهارها، ساده و ارزان بودن آنهاست. از معایب آن این است که این راکبولتها را نمی توان کشید و بنابراین باید قبل از اینکه برای توده سنگ تغییر شکل قابل ملاحظه و زیادی رخ بدهد نصب شود.

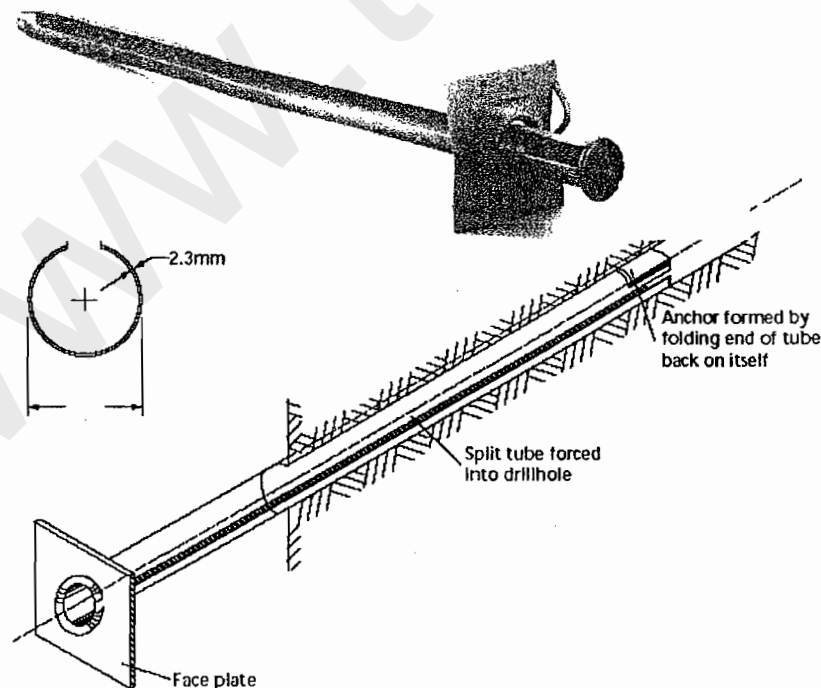


شکل ۵-۸- میل مهار تزریق شده

۵-۵-۴ میل مهارهای اصطکاکی یا مجموعه شکافدار

این میل مهارها 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 مهارهای 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 تیپ این مهارها 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- میل مهار اصطکاکی یا مجموعه شکافدار

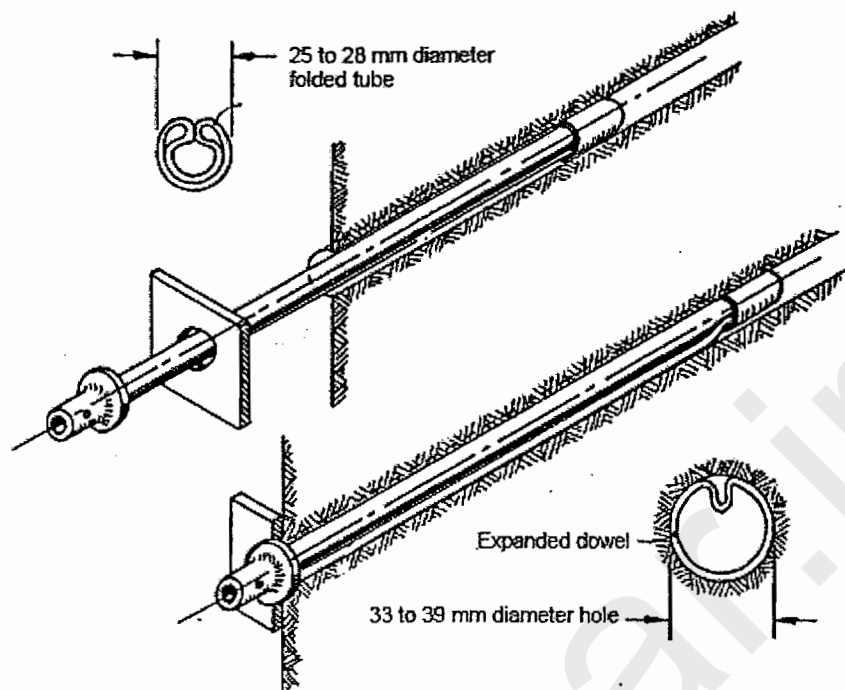
جدول ۵-۱- مشخصات انواع مجموعه شکافدار

مدل مجموعه شکافدار	SS-۳۳	SS-۳۹	SS-۴۶
قطر پیشنهادی سرمه	۳۱mm تا ۳۳mm	۳۵mm تا ۳۸mm	۴۱mm تا ۴۵mm
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 می شود 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 می آید بعلت بزرگ بودن یا کوچک بودن قطر چال است. در مواردی زنگ زدگی خیلی سریع اتفاق می افتد و ثابت شده است که این زنگ زدگی وقتی که راکبولت بعنوان حائل و تقویت کننده در دراز مدت استفاده می شود مشکل آفرین است.

۵-۵-۵ میل مهارهای از نوع Swellex

سیستم Swellex که در شکل 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 مچاله می شود تا به قطر ۲۵mm تا ۲۸ برسد و می تواند داخل سوراخهایی با قطر ۳۲mm تا ۳۹ نصب شود. در هنگام داخل کردن آن به داخل سوراخ نیروی فشاری مورد نیاز نمی باشد و پس از آن با فشار زیاد آب (حدود ۳۰MPa یا ۴۳۰۰psi) لوله مچاله شده را باز می کنند 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 ۱۰۰ kN را دارد. در حالیکه Swellex سوپر، برای بار ۱۹۰ 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 حرکات 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 راکبولت ها و میل مهارها

Stillborg (1994) یک سری آزمایش بر روی بولتها و داولهای نصب شده در جهت عمود بر یک درزه مدل سازی شده که با استفاده از دو بلوک بتنی مسلح با مقاومت بالا (دارای مقاومت فشاری 60 MPa) ساخته شده بود. این نوع آزمایش شرایط واقعی تری را نسبت به آزمایش کشش (pull-out test) ایجاد می کند.

راک بولتها و داولهای مورد آزمایش در چالهای حفر شده با چکش ضربه ای و با همان روشهایی که در شرایط واقعی کار گذاشته می شوند، نصب شدند. سپس این سیستمهای حائل با کشیدن دو بلوک بتنی به سمت خارج (در جهت مخالف یکدیگر) با سرعتی ثابت و اندازه گیری 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 بولت ها و داولهای مورد آزمایش ارایه می دهد.

۵-۷ توری سیمی

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

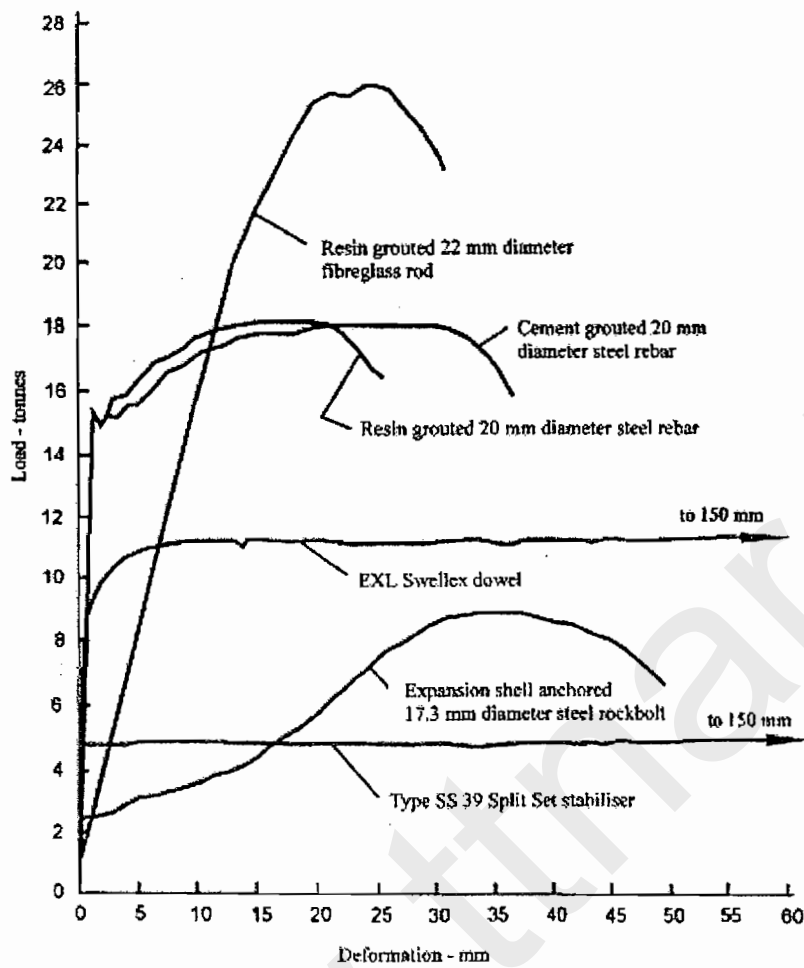
الف - توری بافته یا توری سرندي (chainlink mesh).

ب - توری جوش شده (weld mesh).

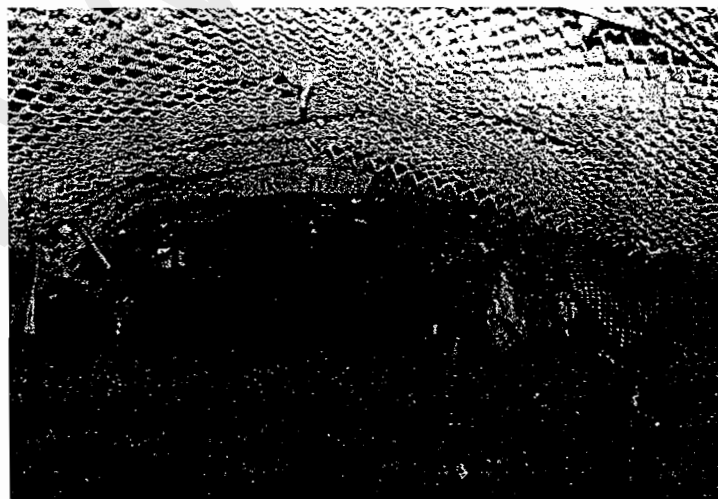
۵-۷-۱ توری بافته یا توری سرندي

این توری که معمولا برای حصارکشی هم بکار می رود مرکب از سیم یا مفتول بافته است. مفتول را می توان 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 می شود که توری سرندي به سقف تونل توسط راکبولت متصل شده است. قطعات کوچک سنگ که از سقف جدا می شوند توسط توری نگهداری می شوند، که بسته به فاصله نقاط تکیه گاهی می تواند بار قابل ملاحظه ای از سنگها را تحمل نماید.

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



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



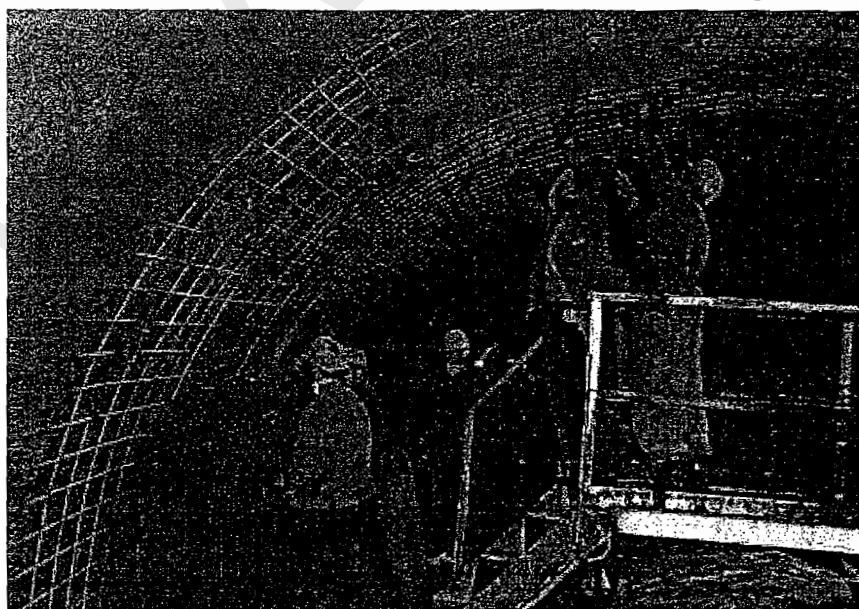
شکل ۵-۱۲- نمونه توری سرندی

۵-۷-۲ توری جوش شده

توری جوش شده عموماً برای مسلح کردن شاتکریت مورد استفاده قرار می‌گیرد و مرکب از شبکه‌ای مربعی از سیم فولادی است، که در نقاط تقاطع جوش شده‌است. نمونه‌ای از این توری برای استفاده در کارهای زیرزمینی، شامل مفتول‌های به قطر $4/2$ میلیمتری است. که بصورت شطرنجی به فواصل $100 \times 100 \times 4/2$ میلیمتر از یکدیگر قرار گرفته و تحت عنوان توری $100 \times 100 \times 4/2$ مشخص می‌شود و در اندازه‌های 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 میله‌های کوتاه که به دیواره تونل متصل می‌شود، نگهداری می‌شوند. این میله‌ها 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 20 سانتی‌متری (۸ اینچی) از سینه کار قرار گرفته بتن پاشی کند، فاصله زیاد موجب هدر رفتن بتن می‌گردد، زیرا باید آنقدر بتن پاشی ادامه یابد تا توری را کاملاً بپوشاند.

توری‌ها در مقابل پرتاب قطعه سنگ‌های ناشی از آتشکاری‌های 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 پوشش‌های مقاوم در مقابل انفجار از آسیب رسیدن به توری جلوگیری نمود. قسمت‌هایی از توری که آسیب می‌بیند باید از شبکه جدا شده و با توری سالم جایگزین شود، تا بطور کافی قسمت‌های مجاور را بپوشاند و پیوستگی توری در بتن تامین شود. توری‌های جوش شده نسبت به توری‌های سرندی از این امتیاز برخوردارند که در اثر آسیب دیدگی از هم باز نمی‌شوند. نمونه‌ای 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 توری 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 امکانپذیر است. زیرا به این ترتیب با تغییر زاویه برخورد بتن با توری کلیه حباب ها پر می شود.

۸-۵ شاتکریت (shotcrete)

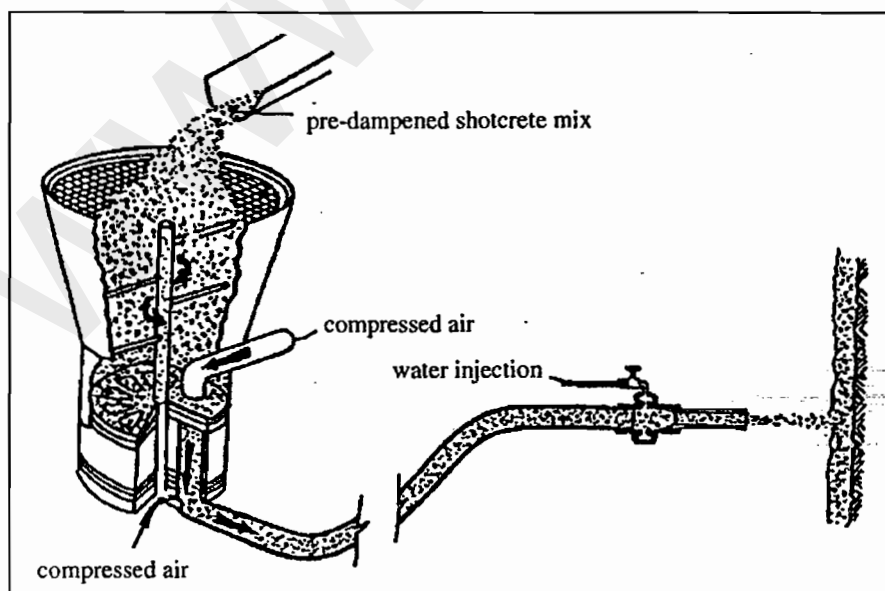
۸-۵-۱ انواع شاتکریت

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:

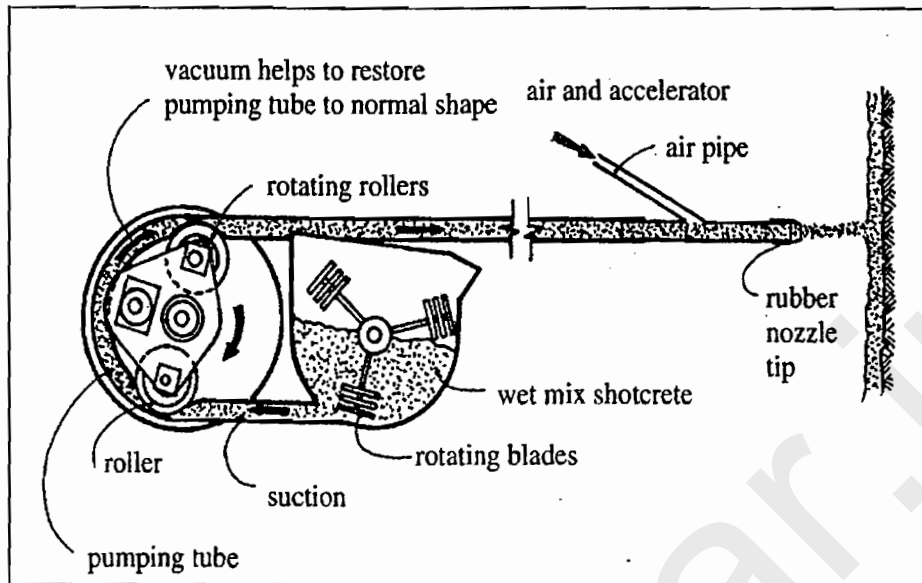
- شاتکریت خشک (dry-mix shotcrete)

- 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 اسلالمپ پایین تهیه می شود و سپس به شیپوره پمپ شده و پخش می گردد. در صورتیکه از شاتکریت خشک استفاده شود. از ماده زودگیر کننده در مخلوط می توان استفاده کرد، لیکن چنانچه از شاتکریت تر استفاده شود ماده زودگیر 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 می شود.	- گرد و غبار کمتر تولید می کند.
- وسایل و دستگاههای مورد نیاز در مخلوط خشک معمولاً ارزان تر 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 نمی باشد.
	- 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 می شود.
	- دستگاه به آسانی تمیز می شود.
	- هزینه های نگهداری کمتر است.

نسبت اختلاط

مخلوط شاتکریت بطور معمول شامل نسبت های زیر از مصالح بصورت خشک می باشد (Hoek & Brown, 1994):

- سیمان ۱۵ - ۲۰٪
- سنگدانه های درشت ۳۰ - ۴۰٪
- سنگدانه های ریز یا ماسه ۴۰ - ۵۰٪

نسبت آب به سیمان در شاتکریت به روش خشک بین ۰/۳ تا ۰/۵ در صد قرار دارد که با توجه به شرایط محلی، توسط اپراتور شاتکریت تنظیم می گردد. در شاتکریت تر نسبت آب به سیمان بین ۰/۴ تا ۰/۶ در صد است.

۵-۸-۳ انتخاب مصالح

سیمان

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

سیمان تیپ II (نسبتا 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 نسبتا ملایم است.

سیمان تیپ III - بعلت ترکیبات این سیمان و ریز دانه بودن آن مقاومت فوری و اولیه زیاد ایجاد می کند. معمولا 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 زودگیر کننده 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.

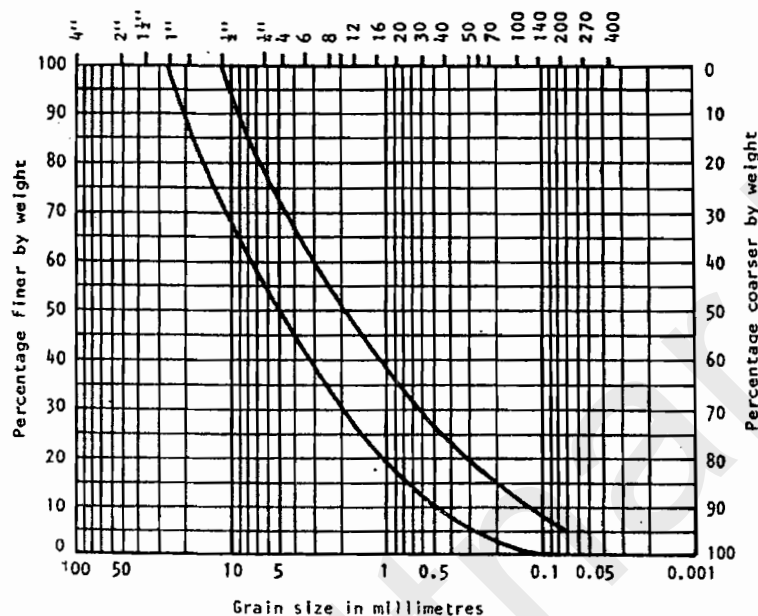
سنگدانه ها باید تمیز (clean)، سخت (hard)، سفت (tough)، محکم (strong) و بادوام (durable) باشد. نباید بیش از ۲٪ از مصالح سنگی از الک شماره ۲۰۰ (۰/۰۷۵mm) عبور نماید. سنگدانه ها باید عاری از مواد سیلتی و دانه های نرم یا پوشیده شده از مواد بوده و نیز میکا و مواد مضر قلیایی و آلی نباید در آن یافت شود. از مصرف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

اصولا بزرگترین اندازه دانه ها نباید از یک سوم قطر لوله انتقال در باریکترین قسمت ها تجاوز نماید. دستگاههای 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 پخش، 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 زودگیرکننده مخصوص برای استفاده در شاتکریت به بازار عرضه شده است و این مواد به مراتب سریع تر از مواد معمول زودگیرکننده مورد استفاده در بتن عمل می کنند. این مواد زودگیرکننده معمولاً حاوی نمکهای قابل انحلال در آب شامل: کربنات سدیم، آلومینات سدیم و هیدروکسید کلسیم می باشند. نسبت اختلاط این مواد و سایر مواد زودگیرکننده از یک تولید کننده به تولید کننده دیگر متفاوت است و برای ساختن مخلوط آزمایشی بعنوان شروع کار باید از مقررات و دستورالعملی که سازنده ارائه می دهد استفاده کرد. مواد زودگیرکننده 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 پاشی قسمت های بالا دست و در سقف ها و دیواره ها یعنی قسمت هایی که ضخامت شاتکریت قابل ملاحظه است بطور معمول از مواد زودگیرکننده استفاده می شود. در بتن ریزی کف تونلها و در قسمت هایی که ضخامت شاتکریت یا 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 زودگیرکننده 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 زودگیرکننده 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 ای 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	
۴۱/۴ MPa	۵/۲ MPa	۰/۲ MPa	صفر	شاتکریت بدون مواد زودگیرکننده
۳۴/۵ MPa	۱۰/۳ MPa	۵/۲ MPa	۰/۶۹ MPa	شاتکریت با ۳٪ مواد زودگیرکننده

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. لق گیری (scaling) سطح کار از نظر فراهم سازی ایمنی مجریان شاتکریت و نیز کاهش احتمال طبله کردن بتن بعلت پاشیدن آن در قسمت های سست، از اهمیت زیادی برخوردار است. روشن است که اگر سنگ خیلی ضعیف باشد. لق 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 پایداری سازی بشود.

سطح کاری که قرار است شاتکریت شود باید عاری از هر گونه مواد خارجی یا مواد لق 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 (۰/۴ - ۰/۳ MPa) تنظیم شده باشد، انجام داد. آب را باید به اندازه کافی در دستگاه وارد نمود تا کلیه مواد زائد ولق جدا شوند. شیپوره باید حدوداً در فاصله یک تا دو متری از سینه 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.

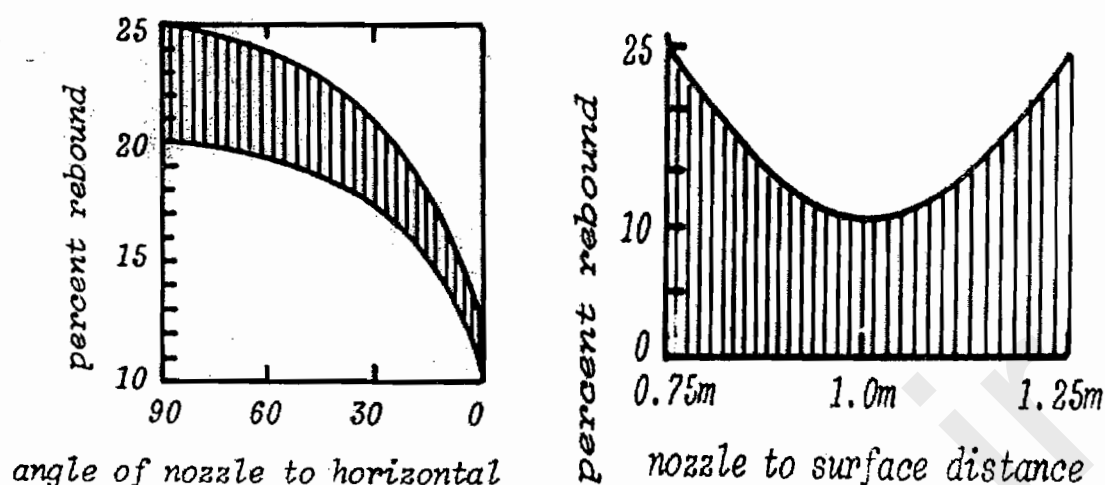
در مواردی که سطح مورد اجرا درزه های آبدار مشخصی داشته باشد، باید تمهیداتی را برای زهکشی آب از درون لایه شاتکریت اجرا شده به کار بست. بدین منظور، معمولاً تعدادی لوله پلاستیکی در شاتکریت کار می گذارند تا آب از طریق آنها خارج شود. (شکل ۵-۱۷).



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

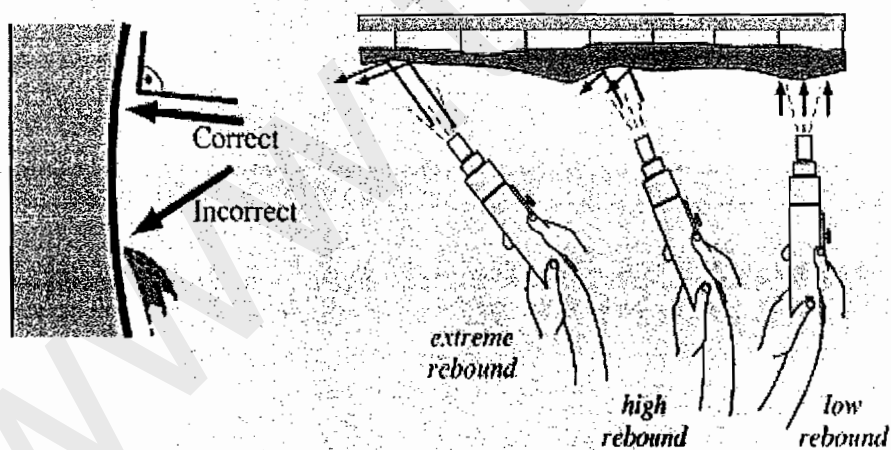
در صورتی که خروج آب از سطح مورد اجرا، محدود به نقاط مشخصی نباشد، قبل از اجرای شاتکریت حصیر الیافی متخلخلی (porous fibre mat) را می توان به سطح مورد اجرا نصب نمود. در ضمن اجرا، آب از طریق الیاف این حصیر زهکشی شده و از طریق نهر کنار تونل به بیرون هدایت می شود.

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.



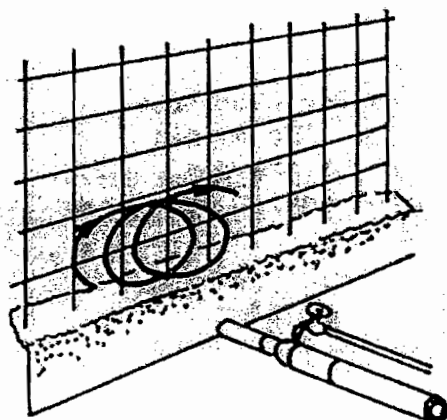
شکل ۵-۱۸- اثر فاصله و زاویه شیپوره بر ریخت و پاش شاتکریت

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



شکل ۵-۱۹- نحوه صحیح پاشیدن شاتکریت

هنگام بتن پاشی، باید شیپوره 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 شده‌است که بتن پاشی در امتداد حلقه‌های دایره‌ای یا بیضی شکلی که رویهم را می‌پوشانند مطابق شکل ۵-۲۰ انجام پذیرد. طول حلقه‌های بیضی معمولاً ۵۰ سانتی‌متر و عرض آنها ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود. فاصله دو حلقه ۱۰ سانتی‌متر انتخاب می‌شود.



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 (ربات) 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 عموما 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، تقریبا 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 راکبوت در سیستم حائل سازه استفاده شده است می توان انتهای میله های راکبوت را روی سطح کارباقی گذاشت تا از آنها به عنوان شاخص اندازه گیری ضخامت شاتکریت استفاده کرد. برخی از طراحان 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 برایین 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 شده‌است.

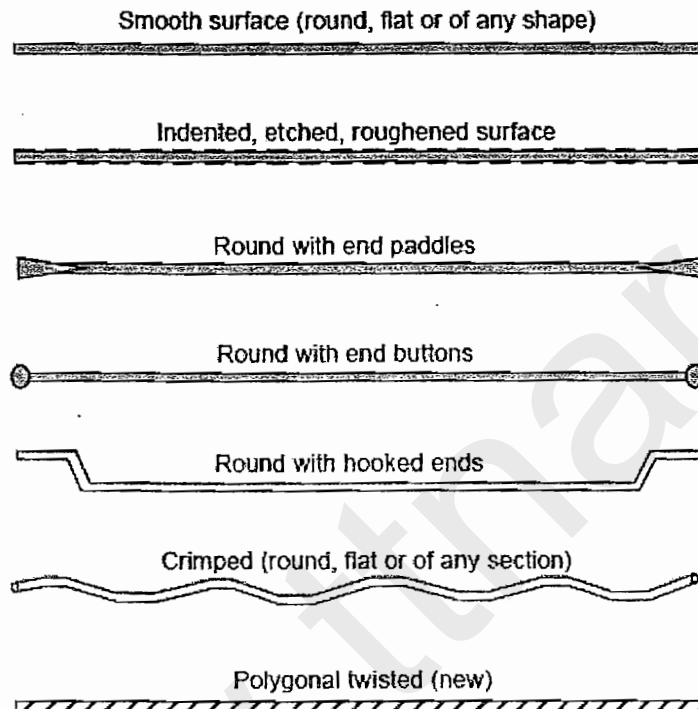
در بیشتر تحقیقات و کارهای آزمایشگاهی اخیر، الیاف فولادی بطول ۲۵ میلیمتر و قطر ۰/۲۵ میلیمتر و با نسبت ۳ تا ۶ درصد وزنی به سیمان و سنگدانه‌ها اضافه گردیده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که استفاده از الیاف بیش از این درصد، آمیختن آن با شاتکریت و پاشیدن شاتکریت را با مشکل روبرو می‌سازد. اشکالات ناشی از در هم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

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 ۵-۲Mpa قابل ملاحظه است.

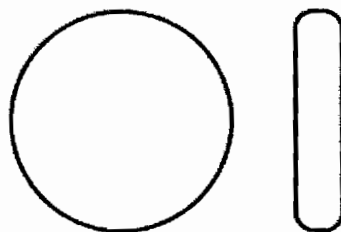
برای افزایش چسبندگی بین الیاف و ملات می‌توان الیاف را با زیر نمودن سطح آن یا با ایجاد تغییر شکلهای مکانیکی اصلاح نمود. بنابراین الیاف می‌تواند به فرم‌های صاف، آجدار، مارپیچ، موج دار و تابیده شده باشد همراه با انتهای قلاب شکل، پره‌ای، دکمه‌ای یا دیگر شکلهای مهارى به عنوان مثال نمونه‌های متداول الیاف فولادی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

- ۱- سطح صاف (گرد، تخت یا اشکال دیگر)
- ۲- سطح زیر، 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 پلاسمای 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

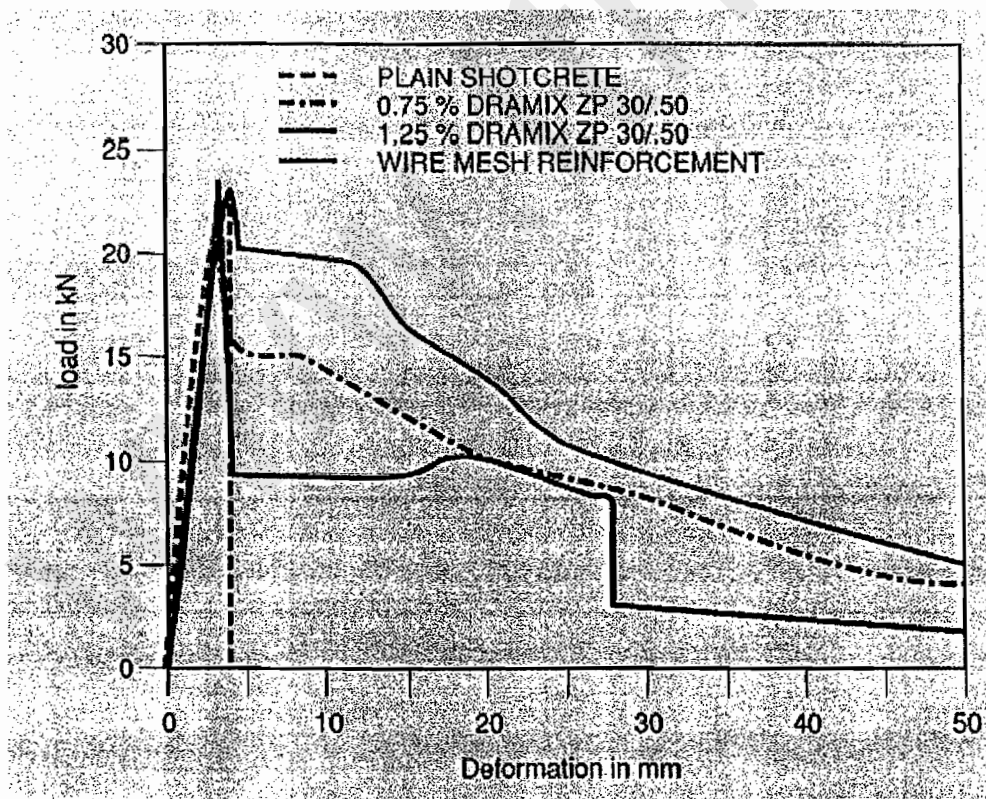


شکل ۵-۲۲- الیاف با شکل حلقه بسته

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 ³	درصد وزنی	kg/m ³	
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	۲۳۲۱	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 شده‌است.

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

مشخصات توده‌سنگ	رفتار توده‌سنگ	حائل مورد نیاز	استفاده از شاتکریت
سنگ متراکم دگرگونی یا آذرین، شرایط تنش پایین	پوسته پوسته نمی‌شود، ورقه‌ورقه نمی‌شود، دچار خرابی نمی‌شود.	لازم نیست.	لازم نیست.
سنگ متراکم رسوبی، شرایط تنش پایین	در اثر تغییر رطوبت ممکن است سطوح بعضی از شیل‌ها، لای سنگها و یا گل سنگها فرو بیاشد.	آب‌بندی سطوح برای جلوگیری از فروپاشی	استفاده از شاتکریت ساده به ضخامت ۲۵ میلیمتر در سطوح دائم هرچه سریعتر بعد از حفاری. در صورت لزوم تعمیر شاتکریت در اثر صدمات ناشی از آتشیاری.
سنگ متراکم با یک گسل پهن منفرد یا ناحیه برشی	مواد پرکننده گسل ممکن است سست و قابل فرسایش باشد و باعث بروز مشکلات پایداری در سنگ درزه‌دار مجاور بشود	حائل‌بندی و آب‌بندی سطحی در اطراف مناطق سست ناشی از گسل یا ناحیه برشی	برداشت مواد سست تا عمقی برابر با عرض گسل یا ناحیه برشی و نصب میلگرد تا سنگ سالم جانبی، در صورت لزوم می‌توان برای نگهداری موقت ریزش سنگ از توری سیمی 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 پر شدگی گسل باید به کار برد.
سنگ متراکم دگرگونی یا آذرین، شرایط تنش بالا	لایه‌لایه شدن سطحی (surface slabbing)، پوسته‌پوسته شدن (spalling) و امکان خطر ناشی از ترکش سنگ (rock burst)	حفظ سنگ شکسته و کنترل تورم یا انبساط توده‌سنگ	استفاده از یک لایه شاتکریت به ضخامت ۵۰ میلیمتر بر روی توری سیمی 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، سپس اجرای لایه دوم شاتکریت به ضخامت ۲۵ میلیمتر. ادامه استفاده از شاتکریت تا پایین دیواره‌های جانبی در موارد لزوم.
سنگ متراکم 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 میل‌مهار نیز برای نگهداری کاملتر 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 مهاری	استفاده از شاتکریت مسلح با الیاف فولادی به ضخامت ۵۰ میلیمتر بر روی سطوح سنگ در نقاطی 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 مهاری موجود. آب‌بندی رخنمون سطوح لایه‌بندی ضعیف	استفاده از شاتکریت مسلح به ضخامت ۷۵ میلیمتر بر روی توری فلزی خاص به آثار سطوح لایه‌بندی.
سنگ دگرگونی یا سنگ آذرین درزه‌دار، شرایط تنش بالا	ترکیب شکستهای ساختاری و تنشی پیرامون محدوده توتل	جلوگیری از ریزش سنگ شکسته و کنترل انبساط توده‌سنگ	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.

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

مشخصات توده‌سنگ	رفتار توده‌سنگ	حائل مورد نیاز	استفاده از شاتکریت
سنگ ضعیف لایه‌لایه و درزه‌دار رسوبی، شرایط تنش بالا	پوسته‌پوسته شدن، خرد شدن و احتمال فشارزدگی	کنترل فشارزدگی و شکستگی توده‌سنگ	اجرای هرچه سریعتر شاتکریت مسلح به الیاف فولادی به ضخامت ۷۵ میلیمتر بر روی سطوح تمیز سنگ، نصب راکبوت 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 پیش‌رونده	اجرای شاتکریت مسلح به الیاف فولادی به ضخامت ۵۰ میلیمتر بر روی سطوح تمیز سنگ در سقف تونل. ممکن است برای نگهداری کاملتر بلوکهای بزرگ، راکبوت یا میل‌مهار نیز لازم باشد.
سنگ رسوبی لایه‌لایه و یا با درزه زیاد، شرایط تنش پایین	جدیی لایه‌ها در تونل‌های با دهانه بزرگ و ریزش در امتداد لایه‌بندی در سینه کارهای شیب‌دار	کنترل جدایش لایه و ریزش	برای کنترل جدایش لایه‌ها باید از راکبوت و میل‌مهار استفاده کرد. اجرای شاتکریت مسلح به الیاف فولادی به ضخامت ۷۵ میلیمتر بر روی آثار صفحات لایه‌بندی قبل از نصب راکبوت.
سنگهای بسیار پر درزه دگرگونی یا آذرین، کنگومرا یا سنگ سیمانی شده، شرایط تنش بالا	فشارزدگی و جریان پلاستیک توده‌سنگ در اطراف فضای زیرزمین	کنترل شکستگی و انبساط توده‌سنگ	اجرای هرچه سریعتر شاتکریت مسلح به الیاف فولادی به ضخامت ۱۰۰ میلیمتر و نصب راکبوت همراه با صفحه پیشانی. اجرای لایه دوم شاتکریت اضافی به ضخامت ۵۰ میلیمتر در موارد ضروری، در صورت لزوم، سیستم نگهداری تا پایین دیوارهای جانبی ادامه یابد.
سنگ رسوبی بسیار پر درزه با سطوح پوشیده از رس، شرایط تنش بالا	فشارزدگی و جریان پلاستیک توده‌سنگ در اطراف حفاری. سنگهایی که رس زیاد داشته باشند، ممکن است دچار تورم شوند.	کنترل گسیختگی و انبساط توده‌سنگ	اجرای هرچه سریعتر شاتکریت مسلح به الیاف فولادی به ضخامت ۵۰ میلیمتر، نصب شبکه فولادی یا قاپهای فولادی سبک در مکانهای ضروری. سپس اجرای لایه دوم شاتکریت مسلح به الیاف فولادی برای پوشش دادن قاپها یا شبکه. ممکن است استفاده از سیستم پیش نگهداری و پیش حائل‌زنی برای پایدارسازی 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 فشارزدگی و تورم ممکن باشد. بعد از حصول پایداری باید فضای خالی را پر نمود.
شرایط ترکش (rockburst) سنگ ملایم در توده‌سنگ مترکم 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 گسیختگی	اجرای شاتکریت به ضخامت ۵۰ تا ۱۰۰ میلیمتر بر روی توری سیمی یا کابلی که با کمک راکبوت یا کابل مهاری 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 قطعاتی، 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 مزبور 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 قطعاتی 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 قطعاتی 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 (۱).

۵-۹-۲ مشخصات پوشش

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

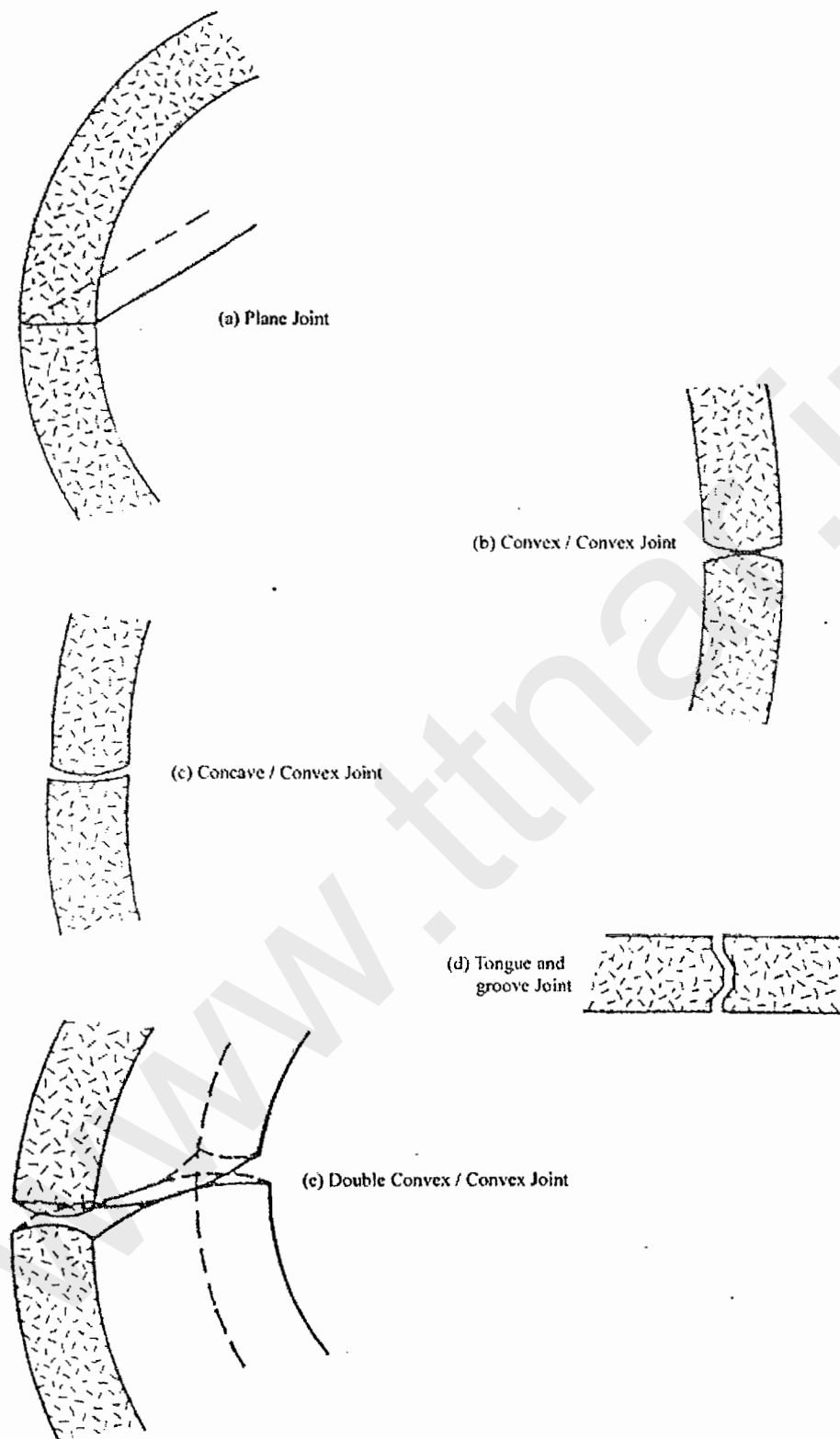
- ۱- قطر تونل
- ۲- حداکثر ابعاد مجاز قطعات برای حمل و نقل
- ۳- توانایی دستگاه نصب قطعات
- ۴- تعداد جک های رانش و نحوه توزیع آنها در محدوده حلقه.

۵-۹-۳ اتصالات قطعات بتنی

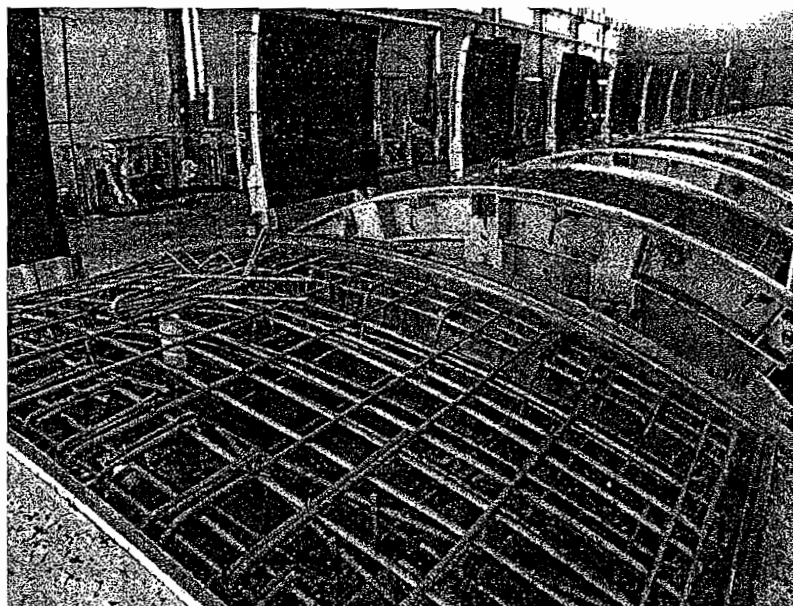
پنج نوع اصلی اتصال وجود دارد که در ساخت پوشش قطعاتی بین قطعات مورد استفاده قرار می گیرد. انواع این اتصالات در شکل ۵-۲۴ نشان داده شده است (Whittaker and Firth, 1990).

در مواردی که قطعات بتنی بعنوان سیستم نگهداری اولیه مورد استفاده قرار می گیرند اگر در مجاورت سینه کار نصب شوند بار قابل ملاحظه ای 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 می گیرد و بنا بر این تحت تاثیر بار زیادی واقع می شود. 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 می شود. 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.

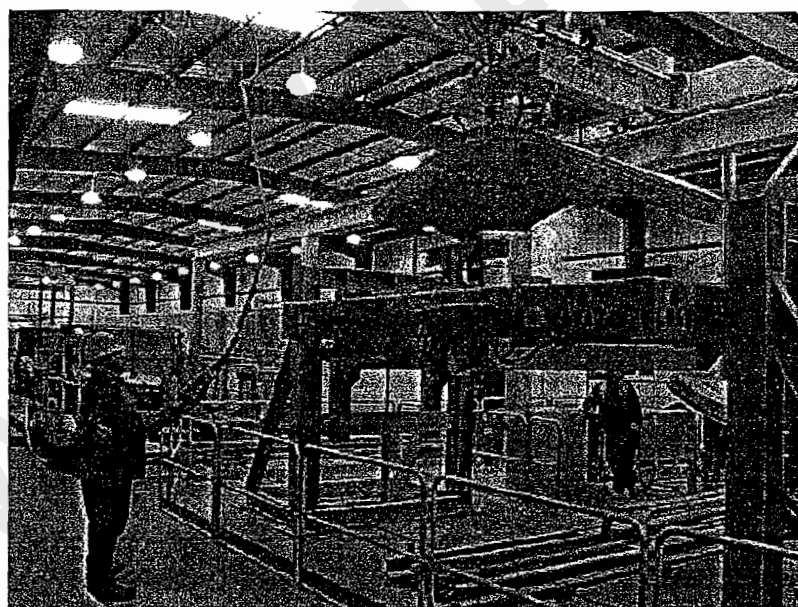
در شکل ۵-۲۵ و ۵-۲۶ دو تصویر مرتبط به سگمنت بتنی نشان داده شده است.



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



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



شکل ۵-۲۶- جابجایی 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 راکبوت، شاکریت و قاب فولادی را تعیین کرد. باید توجه نمود که پیشنهادات بعمل آمده در این جدول بر اساس شرایط و فرضیات زیر استوار می‌باشد:

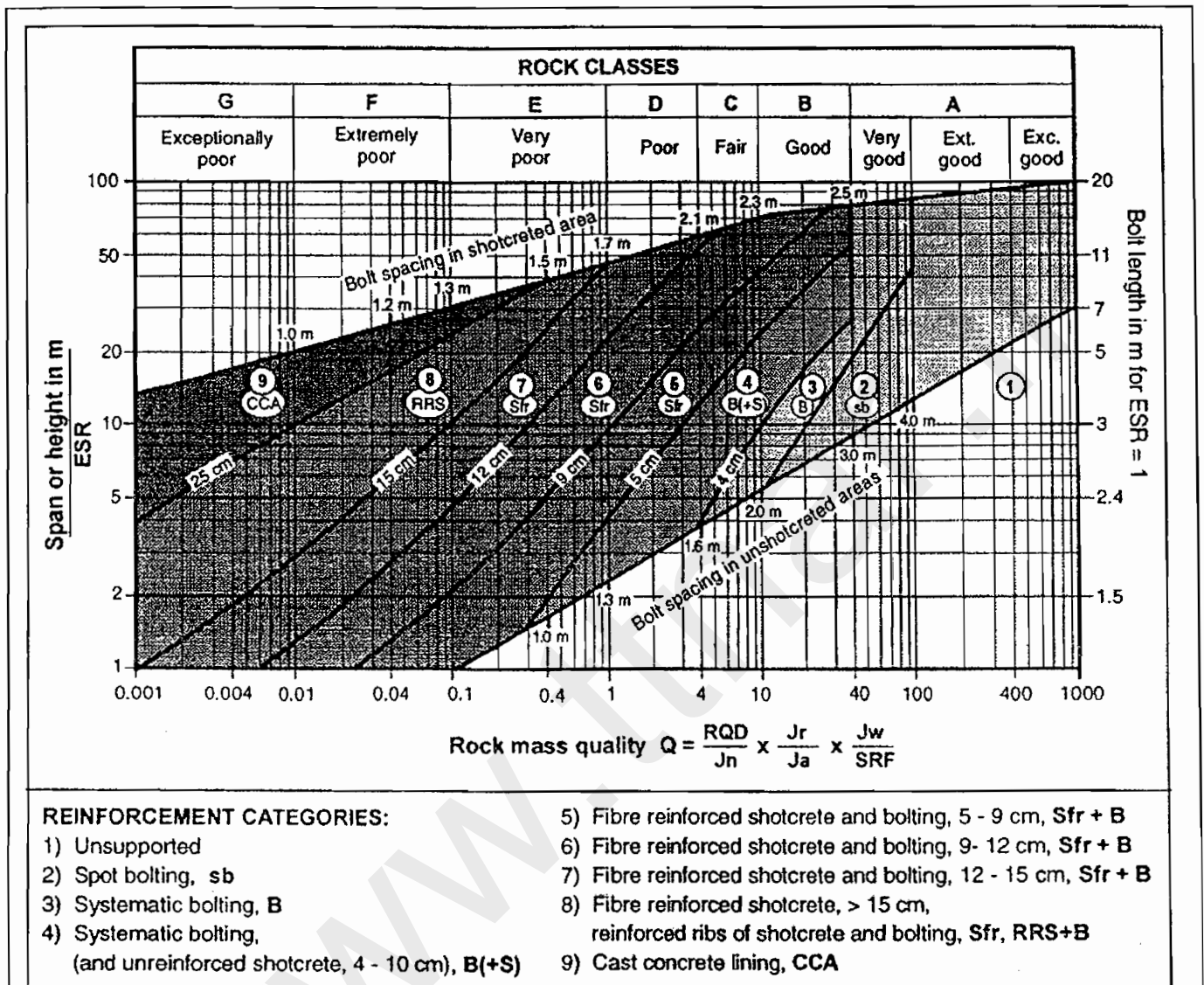
- روش مورد استفاده برای حفاری تونل، روش چالزنی و انفجار می‌باشد.
- شکل مقطع تونل نعل اسبی و دهنه آن ۱۰ متر می‌باشد.
- تنش بر جای قائم (insitu vertical stress) توده سنگ محل حفاری تونل کمتر از ۲۵ مگاپاسکال می‌باشد (معادل عمق حدود ۹۰۰ متری از سطح زمین).

در صورت استفاده از روش حفاری مکانیزه برای حفاری تونل، استفاده از توصیه‌های روش RMR برای حائل بندی 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 ESR (Excavation Support Ratio) می‌توان حائل مورد نیاز برای سقف و دیواره‌های تونل را از این منحنی بدست آورد. مقدار ESR با 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 تونل ها

طبقه توده سنگ	مراحل حفاری	سیستم حائل		
		شاکریت	راکبوت (به قطر ۲۰ میلی متر که بطور کامل تزریق می شود)	قاب های فولادی (steel sets)
سنگ خیلی خوب I RMR: 81-100	حفاری مقطع در یک مرحله - ۳ متر پیشروی	معمولا حائل مورد نیاز نیست، ولی بعضا راکبوت 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	در صورت لزوم ۵۰ میلی متر در تاج	راکبوت در مناطقی از تاج به طول ۳ متر و با فواصل ۲/۵ متر و بعضا همراه با توری سیمی	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.	۵۰-۱۰۰ میلی متر در تاج، ۳۰ میلی متر در دیواره ها	استفاده از راکبوت بصورت منظم با طول ۴ متر و با فاصله بندی ۲ تا ۱/۵ متر در تاج و دیواره ها و توری سیمی در تاج.	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.	۱۰۰-۱۵۰ میلی متر در تاج، ۱۰۰ میلی متر در دیواره ها	استفاده از راکبوت 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	قاب های 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)، ۱/۵-۵/۵ متر پیشروی در راس، حائل را همزمان با حفاری نصب کنید. بتن پاشی به محض انجام آتشکاری انجام شود.	۱۵۰-۲۰۰ میلی متر در تاج، ۱۵۰ میلی متر در دیواره ها و ۵۰ میلی متر در سینه کار	راکبوت 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 راکبوت در کف (invert).	قاب های فولادی متوسط تا سنگین با فاصله بندی ۰/۷۵ متر با میان قاب های فولادی (steel lagging) و در صورت لزوم پیش مهار (forepoling)، کف تونل بسته و مهار شود.



شکل ۵-۲۷- راهنمای حائل‌بندی تونل‌ها 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 اندازه‌گیری بکار می‌رفت در سالهای اخیر با پیشرفت تکنولوژی و افزایش نقش و حساسیت اندازه‌گیریهای 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 برنامه‌های ابزاربندی در دست افرادی است که آشنایی کافی با هدف و منظورهای این اندازه‌گیریها ندارند و در نتیجه، این ابزاربندیها و اندازه‌گیریها در مقایسه با سالهای آغازین، بعضاً مفید 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 شاهی 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 مبنا قبل از بهره‌برداری 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 راه های پیشگیری و کاهش زیانها به مرحله اجرا درمی‌آید.

د- اهداف تحقیقاتی و بهبود روشهای طراحی: از جمله 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 بیشینه 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 تونل ها قلمداد می‌شود.

طراحی یک سازه ژئوتکنیکی مانند تونل براساس بررسی ها 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 سازه های ژئوتکنیکی یک جزء مکمل روند طراحی بوده و ابزار گذاری ژئوتکنیکی، وسیله ای برای کمک به این مشاهدات می‌باشد.

۴-۶ تواناییهای فردی لازم در ابزاربندی

تکنسین 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.

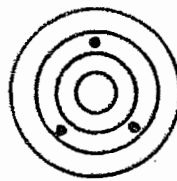
تطابق (conformance): وجود وسیله اندازه گیر نباید پارامتر مورد بررسی را تحت تاثیر قرار دهد و ابزاری که پارامتر مورد سنجش را تغییر دهد، تطابق کمتری خواهد داشت. بعنوان مثال، کشیدگی سنج گمانه و هر گونه تزریق اطراف آن باید به اندازه کافی شکل پذیر باشد تا کمتر بر تغییرشکلهای سنگ اطراف خود تاثیرگذار باشد و 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 پیرومترها نباید با ایجاد مسیرهای زهکشی باعث افت فشار آب حفره ای 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 ± 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.

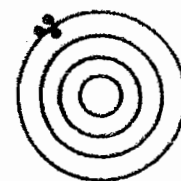
دقت (precision): دقت، فاصله هر یک از مقادیر اندازه گیری شده به میانگین آنها می باشد و همان تکرارپذیری (repeatability) می باشد. معمولاً دقت بصورت یک مقدار $\pm$ دار بیان می شود. تعداد ارقام معنی دار در هر اندازه گیری، دقت آنرا نشان می دهد؛ بعنوان مثال دقت $\pm 1/00$ بیشتر از دقت $\pm 1/0$ است و بالعکس 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 دواير 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 ورارسان در برابر مقدار ورودی به آن می باشد، بعنوان مثال حساسیت یک ورارسان 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 می گیرند، استفاده کرد. بطور کلی توصیه میشود شرایط محیطی به همراه داده های دیگر اندازه گیری و ثبت شوند.

۴. خطاهای مشاهده ای (observational errors): تکنسینهای مختلف، بروشهای مختلفی قرائت می کنند. این خطاها را میتوان با برگزاری کلاسها و دوره های 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 دستگاه های اندازه گیری

دستگاههای اندازه گیری، لازم است تا در سخت ترین شرایط محیطی، قادر به انجام وظیفه بوده و به طور 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 اندازه گیری باشد.
۲. محکم و قابل اعتماد باشد.
۳. پایائی لازم در مقابل شرایط محیطی و بهره برداری سخت را دارا باشد.
۴. از نظر قیمت اولیه و مخارج نگهداری و بهره برداری ارزان باشد.
۵. دقت و حساسیت لازم را داشته باشد.

۶-۷ طراحی سیستم های ابزار دقیق

منظور از طراحی سیستم های ابزار دقیق، ارائه برنامه کار، مشخصات فنی دستگاه ها و جزئیات نصب آنها به همراه توضیحات لازم در خصوص چگونگی بهره برداری 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 می گردد که شامل ارائه دقیق جزئیات، نقشه های اجرایی، تعیین دقیق کیفیت اجرا و حتی روش اجرا و تعیین مشخصات فنی دستگاه ها می باشد. طرح ریزی یک سیستم ابزار دقیق باید به گونه ای باشد تا این اطمینان حاصل شود که اطلاعات مورد نیاز هم درحین دوره ساختمان و هم در دوره طولانی تر بهره برداری، بدست خواهند آمد. نیازهای یک سیستم و روشهای مورد استفاده در تجزیه و تحلیل مشاهدات باید به طور دقیق، قاعده بندی شده و انتخاب نهائی ابزار اندازه گیری 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. شناسائی 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

۸-۶ چند نمونه از وسایل اندازه گیری در تونل ها

اندازه گیری هایی که در حین اجرای انجام می شود باید به گونه ای باشند که از اطلاعات بدست آمده برای ارزیابی اعتبار و صحت طراحی استفاده کرد یا توسط آنها مطالعات طراحی را تکمیل نمود. بعلاوه این اندازه گیری ها باید مسائل و مشکلات بالقوه در پروژه را هشدار دهند تا اقدامات ترمیمی قبل از اینکه مشکلات به مرحله ای 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 فعالیت های اجرایی به حداقل برسد.

۸-۶-۱ نقشه برداری نوری

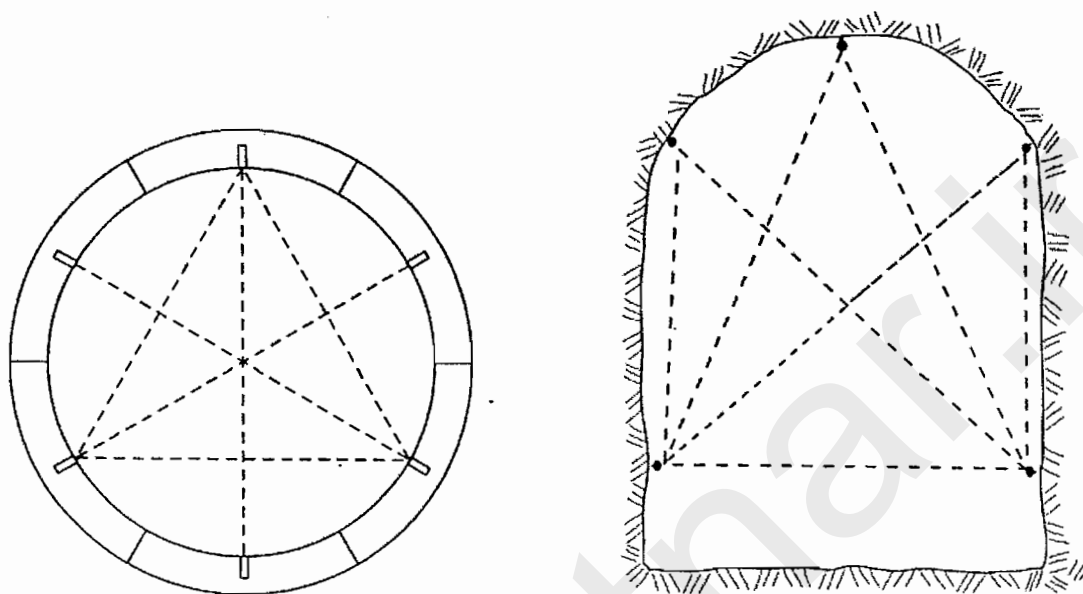
اندازه گیری جابجایی و تغییر مکان موثرترین وسیله کنترل و نظارت بر رفتار توده سنگ طی اجرای یک تونل است. روشهای متعددی برای کنترل و نظارت بر تغییر مکان ها و جابجایی توده سنگ موجود است که مهمترین آنها شامل نقشه برداری، استفاده از تقارب سنج ها برای اندازه گیری همگرایی تونل و بکارگیری انبساط سنج ها برای اندازه گیری تغییر مکان توده سنگ اطراف تونل می باشد.

وقتی که دسترسی مناسب فراهم باشد و وقتی که اندازه گیری ها را بتوان نسبت به پایه ثابت و استواری سنجید روشهای نقشه برداری معمولی و با کیفیت بالا از قبیل تراز یابی و مثلث بندی را می توان برای تعیین مقدار مطلق تغییر مکان های نقاط و هدف های 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 اندازه گیری های مورد نیاز هستند. عیب این روش این است که اندازه گیری ها و محاسبات بعدی وقت گیر است و با سایر کارها و وظایف نقشه بردار معمولاً تداخل می کند و بالاخره در تونل های بلند ممکن است از دقت کافی برای شناسایی جابجایی ها در توده سنگ سالم و سخت برخوردار نباشد.

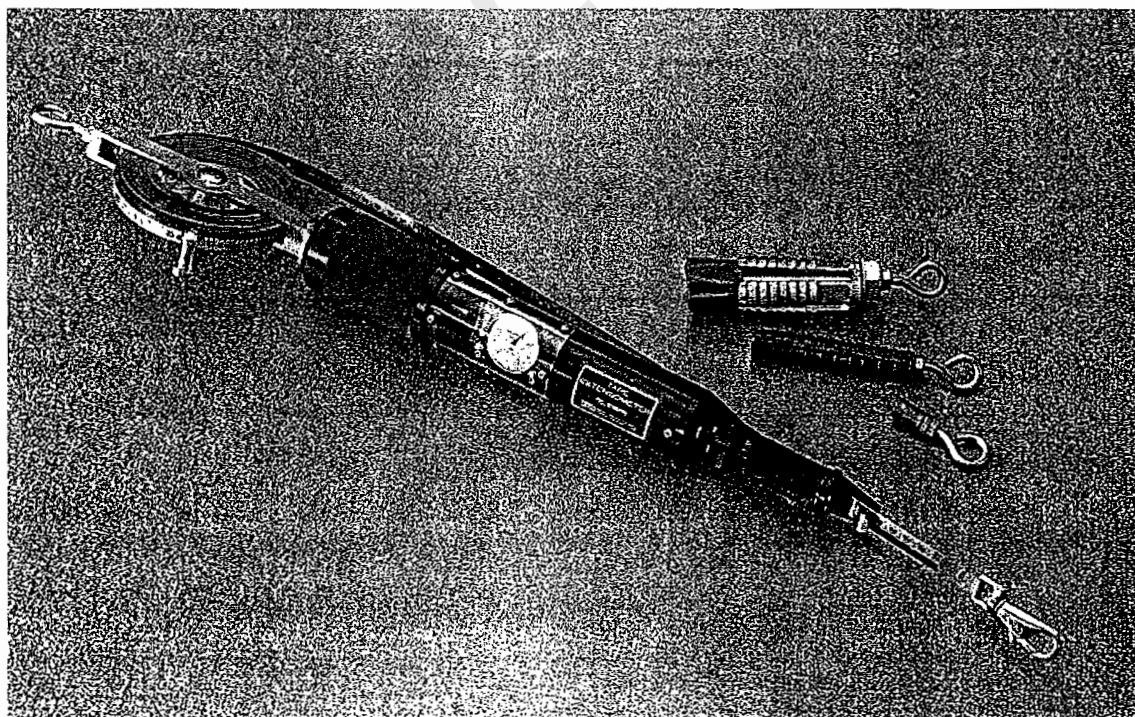
با ورود دستگاه های الکترونیکی - نوری برای اندازه گیری فاصله، کار نقشه برداران ساده تر شده است و می توان از محل ثابت دستگاه، فواصل آن تا تعدادی نشانه ها و علائم باز تابنده را که به طاق و دیواره های تونل وصل شده اندازه گیری کرد و از این طریق اطلاعات مفیدی بدست آورد.

۸-۶-۲ اندازه گیری همگرایی

بطور معمول، میزان همگرایی تونل با اندازه گیری فاصله نقاط نشانه (reference points) که معمولاً 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 اندازه گیری همگرایی دارد، نشان داده شده است.



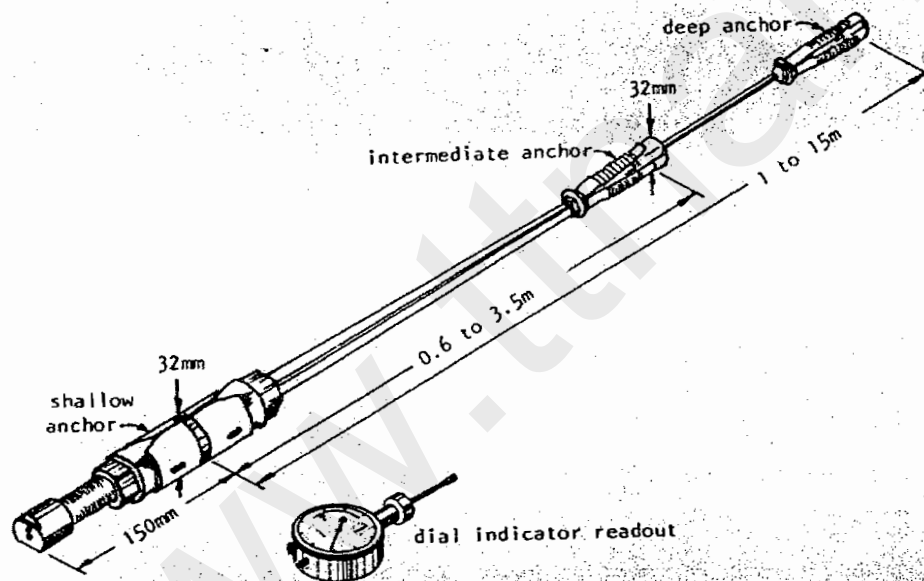
شکل ۶-۲- نمونه ای از اندازه گیری همگرایی در تونل‌ها- در شکل سمت راست نقاط نشانه در چالهای حفر شده در سنگ نصب شده و در شکل سمت چپ نقاط نشانه در سگمنت‌های بتنی تعبیه شده است.



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

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

این ابزار برای اندازه گیری جابجایی‌ها در توده سنگی که تونل را در بر گرفته استفاده می‌شود. این انبساط سنج ها مرکب از میله هایی است، که به نقاطی انتخابی در داخل چالی که به همین منظور حفر شده است متصل می‌شود. میله ها معمولا 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.

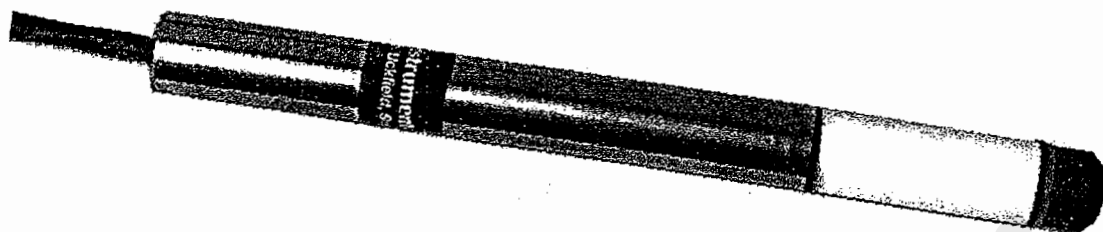


شکل ۴-۶- نمونه‌ای از انبساطسنج میله ای برای اندازه گیری جابجایی ها در توده سنگ اطراف تونل.

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 شده‌است. 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.



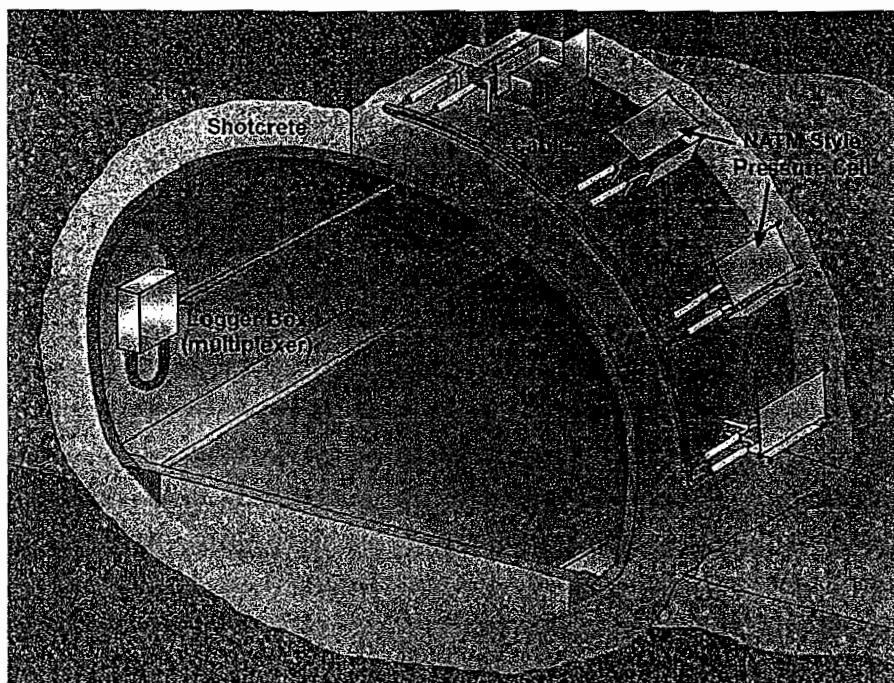
شکل ۵-۶- نمونه یک پیزومتر

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

با استفاده از سلول فشار کل، می توان میزان فشار کل وارده بر پوشش بتنی، شاتریت 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 تونل نشان داده شده است.



شکل ۶-۶- نمونه سلول فشار کل



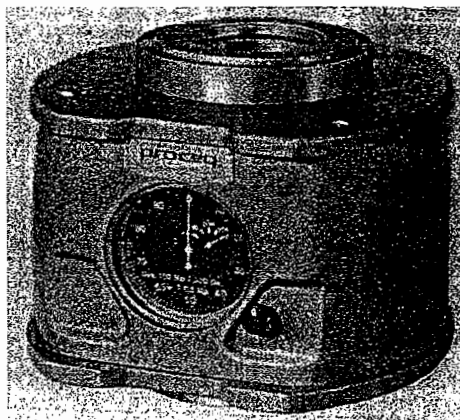
شکل ۶-۷- نمونه‌ای از نحوه نصب سلول‌های فشار کل در یک تونل

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. با 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 راکبوت‌ها 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.

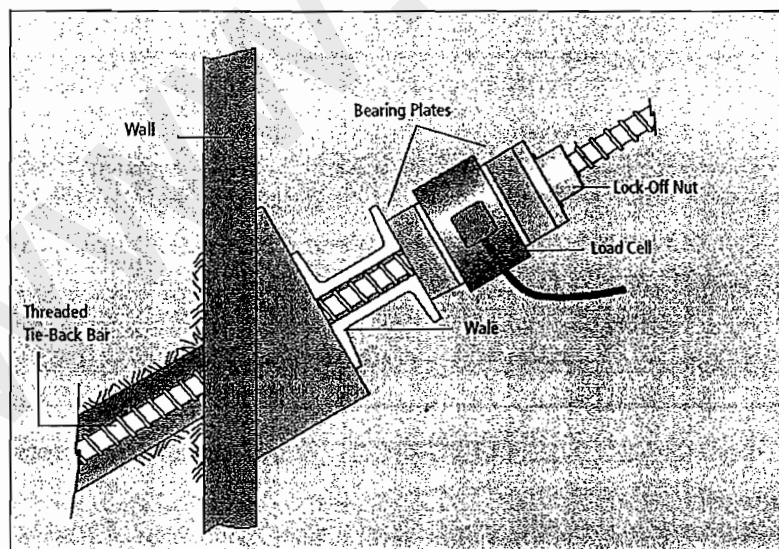
در شکل ۶-۱۰ نحوه نصب سلول بار نشان داده شده و در جداول ۲۲ و ۲۳، ظرفیت و مشخصات هندسی سلول‌های بار ساخت دو شرکت مختلف ارائه شده است.



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 ²
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

