بسمه تعالی

نام جزوه: تونل سازی

نام استاد: دکتر پلاسی

دانشگاه: تهران

بنام خدا

فهرست مطالب

۱- طبقه‌بندی زمین مسیر از نظر زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی ۱
۱-۱ طبقه بندی ترزاقی (Terzaghi) ۱
۱-۲ طبقه بندی توده سنگ به روش RMR ۲
۱-۳ طبقه بندی توده سنگ به روش Q ۹
۲- مشخصات هندسی تونل‌های راه و راه‌آهن ۱۴
۲-۱ شیب تونل‌های راه ۱۴
۲-۲ نیم رخ عرضی تونل‌های راه ۱۵
۲-۳ مسیر تونل‌های راه در پلان ۱۷
۲-۴ شیب تونل‌های راه‌آهن ۱۷
۲-۵ نیم رخ عرضی تونل‌های راه‌آهن ۱۸
۲-۶ مسیر تونل‌های راه‌آهن در پلان ۱۹
۳- روش‌های 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 برش‌های زاویه‌دار 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 TBMهای باز ۳۲
۳-۲-۲-۲ TBMهای تک سپری ۳۴

www.ttnar.ir

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

www.itnar.ir

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

www.ttnar.ir

۵-۸-۷ توصیه‌های انجام شده در مورد استفاده از شاتکریت ۱۳۰
۵-۹ 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 انتخاب حائل مناسب برای شرایط مختلف زمین ۱۳۷
۶- استفاده از ابزاربندی برای رفتارنگاری تونل‌ها ۱۴۰
۶-۱ تاریخچهٔ ابزاربندی ۱۴۰
۶-۲ هدف از ابزاربندی ۱۴۰
۶-۳ لزوم ابزاربندی ۱۴۱
۶-۴ تواناییهای فردی لازم در ابزاربندی ۱۴۱
۶-۵ خطا و عدم اطمینان در اندازه گیری ۱۴۱
۶-۶ مشخصات عمومی دستگاه های اندازه گیری ۱۴۴
۶-۷ طراحی سیستم های ابزار دقیق ۱۴۴
۶-۸ چند نمونه از وسایل اندازه‌گیری 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

www.tunar.ir

۱- طبقه‌بندی زمین مسیر از نظر زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی

اکثر تونل‌ها بویژه تونل‌های راه و راه آهن عمدتا 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 بعضا سنگ را بر اساس مقاومت تک محوری آن دسته‌بندی می‌کنند. در روشهای کاملتر که امروزه بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند خصوصیات درزه و شکاف ها 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 تونل ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. ترزاقی انواع مختلف زمین ها را توصیف کرده و بر اساس تجربیاتی که در طراحی و نصب سیستم های حائل فولادی تونل های 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 دیواره ها 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 لایه ها است. طبقات و لایه ها ممکن است با حضور درزهای عرضی ضعیف گردند. در چنین سنگی شرایط پوسته پوسته شدن کاملا معمول است.

www.tunar.ir

سنگ نسبتا درزه‌دار (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 نیازبه 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 رگه‌دار (blocky and seamy rock): شامل قطعات و خرده‌های سنگ هستند که از نظر شیمیایی بکر و یا تقریبا 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 کاملا خرد ولی بکر از نظر شیمیایی (completely crushed but chemically intact): از نظر شیمیایی دست نخورده و بکربوده و کاملا 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 می‌کند بدون اینکه افزایش حجم محسوسی داشته باشد. شرط لازم برای فشارندگی وجود درصد بالایی از کانی های میکایی میکروسکپی و کانی های رسی با ظرفیت تورمی کم می‌باشد.

سنگ تورمی (swelling rock): این نوع سنگ عمدتا بعلت انبساط و متورم شدن به داخل تونل پیشروی می‌کند. خاصیت تورمی سنگ ها به نظر می‌رسد 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 می‌پذیرد:

- مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر (uniaxial compressive strength of intact rock)
- شاخص کیفی سنگ (RQD)
- فاصله درزه‌ها (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 راکبولت، 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.

www.ttnar.ir

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

الف- پارامترهای طبقه‌بندی و امتیاز آنها

پارامتر			محدوده مقادیر					
۱	مقاومت سنگ بکر	اندیس مقاومت بار نقطه ای	>۱۰MPa	۴-۱۰MPa	۲-۴ MPa	۱-۲ MPa	برای این محدوده مقاومت فشاری تک محوره ترجیح دارد.	
		مقاومت فشاری تک محوره	>۲۵۰MPa	۱۰۰-۲۵۰ MPa	۵۰-۱۰۰ MPa	۲۵-۵۰ MPa	۵-۲۵ MPa	۱-۵ MPa	<۱ MPa
	امتیاز		۱۵	۱۲	۷	۴	۲	۱	۰
۲	شاخص کیفیت سنگ RQD		۹۰٪-۱۰۰٪	۷۵٪-۹۰٪	۵۰٪-۷۵٪	۲۵٪-۵۰٪	< ۲۵ %		
	امتیاز		۲۰	۱۷	۱۳	۸	۳		
۳	فاصله درزه ها		> ۲ m	۰.۶ – ۲m	۲۰۰-۶۰۰mm	۶۰-۲۰۰mm	< ۶۰mm		
	امتیاز		۲۰	۱۵	۱۰	۸	۵		
۴	شرایط درزه‌ها (به قسمت و مراجعه شود)		سطوح خیلی زبر، غیرممتد ، جدا نشده ، دیواره درزه‌ها هوا نزده	سطوح کمی زبر، جدایی دیواره درزه‌ها کمتر از 1mm ، کمی هوازده	سطوح کمی زبر، جدایی دیواره درزه‌ها کمتر از 1mm ، بسیار هوازده	سطوح آینه‌ای یا ضخامت کمتر از 5mm مواد پرکننده یا ۱تا ۵ mm بازشدگی، درزهای ممتد	ضخامت مواد پرکننده نرم بیش از 5mm ، یا بازشدگی بیش از5mm ، درزه‌ها ممتد		
	امتیاز		۳۰	۲۵	۲۰	۱۰	۰		
۵	آب زیر زمینی	جریان آب در هر ۱۰ متر طول تونل (l/min)	بدون آب	<۱۰	۱۰-۲۵	۲۵-۱۲۵	> ۱۲۵		
		نسبت فشار آب در درز به تنش اصلی بزرگتر	0	<۰.۱	۰.۱-۰.۲	۰.۲-۰.۵	>۰.۵		
		شرایط عمومی	کاملا خشک	نم	خیس	آب قطره‌قطره می‌ریزد.	آب جاری است.		
	امتیاز		۱۵	۱۰	۷	۴	۰		

www.tunnel.ir

ادامه جدول ۱-۱- سیستم طبقه‌بندی RMR

ب- تعدیل امتیاز برای جهت درزه‌ها

راستا و جهت میل درزه ها		خیلی مساعد	مساعد	متوسط	نامساعد	خیلی نامساعد
امتیاز	تونل 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 می‌شود

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 دهنه 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 توده‌سنگ (درجه)	>۴۵	۳۵-۴۵	۲۵-۳۵	۱۵-۲۵	< ۱۵

www.itnar.ir

ادامه جدول ۱-۱ سیستم طبقه‌بندی RMR

و- راهنمای طبقه‌بندی وضعیت درزه‌ها

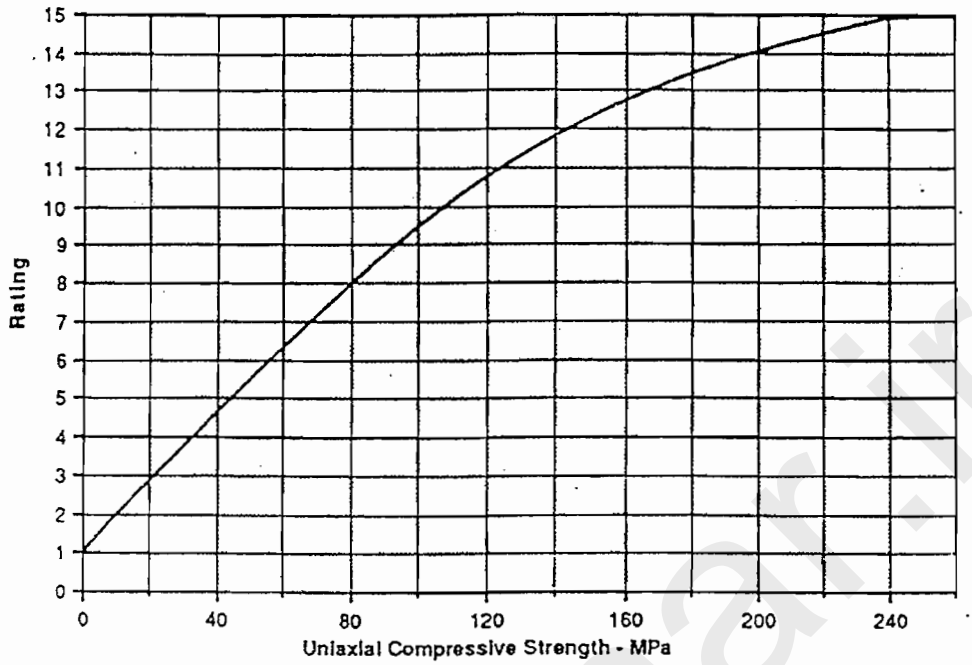
طول ناپیوستگی‌ها	< 1 m	۱-۳ متر	۳-۱۰ متر	۱۰-۲۰ متر	> ۲۰m
امتیاز	۶	۴	۲	۱	۰
جدا شدگی	بدون جداشدگی	< ۰.۱mm	۰.۱-۱	۱-۵	> ۵mm
امتیاز	۶	۵	۴	۱	۰
زبری	خیلی زبر	زبر	کمی زبر	صاف	آینه‌ای
امتیاز	۶	۵	۳	۱	۰
مواد پر کننده	بدون مواد پرکننده	5 mm>مواد سخت	5 mm<مواد سخت	5 mm>مواد نرم	5 mm<مواد نرم
امتیاز	۶	۴	۲	۲	۰
هوا زدگی	بدون هوازدگی	کمی هوازده	هوازدگی متوسط	هوازدگی شدید	متلاشی شده
امتیاز	۶	۵	۳	۱	۰

ی- اثر راستا و شیب درزه‌ها در تونل‌سازی

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

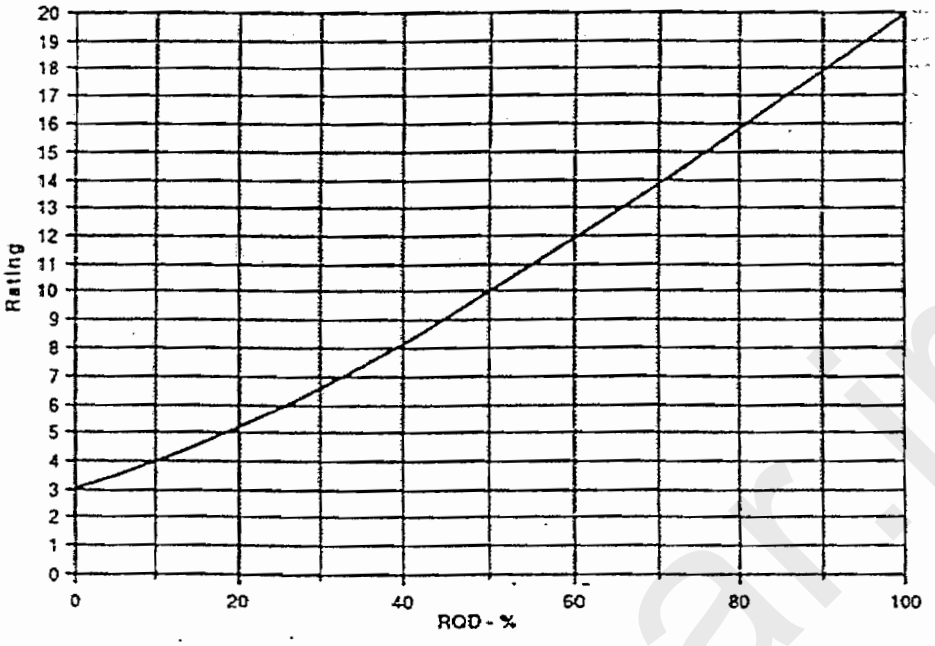
بدلیل ابهاماتی که در مورد استفاده از جدول ۱-۱ برای تعیین امتیاز مربوط به مقاومت فشاری، میزان RQD و فاصله درزه‌ها وجود داشت منحنی‌های شکل‌های ۱-۱ الی ۱-۳ برای دادن امتیاز به این پارامترها ارائه گردید.

www.tnar.ir

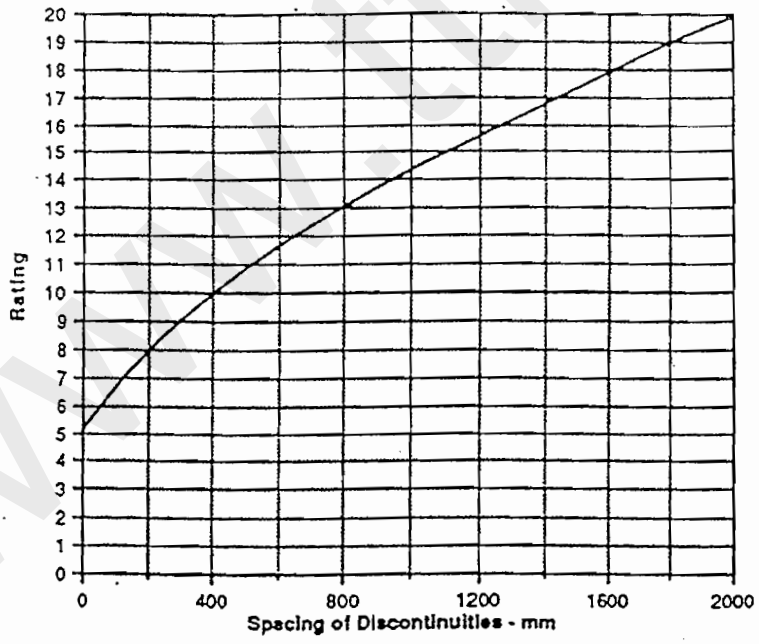


شکل ۱-۱- امتیاز مقاومت فشاری تک محوره

www.tunar.ir



شکل ۱-۲- امتیاز شاخص کیفیت سنگ



شکل ۱-۳- امتیاز فاصله درزه‌ها

www.itrnair

۱-۳ 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 می‌شود ارائه نمودند. این شاخص بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times (\frac{Jr}{Ja}) \times \frac{J_w}{SRF}$$

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 ۱-۲ 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 می‌آید.

ESR تقریبا مشابه عکس ضریب اطمینان می‌باشد. با داشتن مقدار Q و De با استفاده از منحنی یا جداول ارائه شده توسط Barton و همکارانش می‌توان عدم نیاز و یا نیاز به نگهداری و میزان آنرا برای پایدارسازی 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.

www.tfnar.ir

جدول ۱-۲- امتیاز بندی پارامترها در سیستم Q

شرح	مقدار	ملاحظات
۱- شاخص کیفی سنگ	**RQD**	۱- وقتیکه مقدار RQD بین ۱۰-۰ باشد برای ارزیابی Q مقدار RQD برابر با ۱۰ فرض می شود.
A. خیلی ضعیف	۰-۲۵	
B. ضعیف	۲۵-۵۰	
C مناسب	۵۰-۷۵	۲- مقادیر RQD با فواصل ۵ یعنی ۱۰۰,۹۵,۹۰ و غیره به اندازه کافی دقیق هستند.
D. خوب	۷۵-۹۰	
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 درز به‌اضافه درزه‌های اتفاقی	۳	۱- برای تقاطع دو تونل J_n را در ۳ ضرب کنید: ($J_n \times ۳$)
D. دو دسته درزه	۴	
E. دو دسته درزه به‌اضافه درزه‌های اتفاقی	۶	۲- برای ورودی تونل J_n را در ۲ ضرب کنید: ($J_n \times ۲$)
F. سه دسته درزه	۹	
G. سه دسته درزه به‌اضافه درزه‌های اتفاقی	۱۲	
H. چهار دسته درزه و درزه‌های اتفاقی، شدیدا درزه‌دار، مانند حبه‌قند، وغیره	۱۵	
J سنگ خردشده, خاک مانند	۲۰	
۳-عدد زبری درزه	**J_r**	
a دیواره درزه‌ها در تماس با یگدیگر و	۰	
b دیواره درزهادرتماس بایکدیگرقبل از۱۰cm برش	۰	
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. آیینه ای، موجدار	۱/۵	۲- J_r=۰/۵-۲ را می توان برای درزهای مسطح و آیینه 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. آیینه ای, مسطح	۰/۵	
c. دیواره درزه‌ها وقتی برش اتفاق می افتد درتماس با هم قرار نمی‌گیرند.		
H. مناطق حاوی کانی‌های رسی با ضخامت کافی که از تماس دیواره ها جلوگیری کند.	۱	
J. بخش ماسه ای, شنی یاسنگ خردشده با ضخامت کافی که ازتماس دیواره ها جلوگیری کند.	۱	

www.tnar.ir

ادامه جدول۱-۲- امتیاز بندی پارامترها در سیستم Q

شرح	مقدار	ملاحظات
۴-عدد دگرسانی درزه	J_a	Φ_r (درجه)
a. دیواره درزه‌ها در تماس با هم هستند	..	
A. شدیدا جوش خورده، سخت، نرم نشونده, مواد پرکننده غیر قابل نفوذ	/۷۵	
B. دیواره های درزه دگرگون نشده سطوح درزها فقط زنگ زده است.	۱/۰	(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	۲/۰	(۲۵-۳۵)
D. مواد پوشش درزه‌ها از لای, یا رس ماسه‌ای, بخشهای کوچک رسی (نرم نشونده)	۳/۰	(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 تورمی (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	۴/۰	(۲۵-۳۰)
G. شدیدا پیش تحکیم شده، مواد پرکننده رسی نرم نشونده، (ممتد، ضخامت ۵ mm >)	۶/۰	(۱۶-۲۴)
H. پیش تحکیم شده متوسط یا کم, مواد پرکننده رسی نرم شونده، (ممتد ضخامت ۵ mm >)	۸	(۱۲-۱۶)
J. مواد پرکننده متورم شونده مانند مونت موری لونیت، (ممتد ضخامت ۵ mm >) مقدار J_a بستگی به درصد اندازه ذرات رس و میزان دسترسی به آب دارد)	۸/۰-۱۲/.	(۶-۱۲)
c. دیواره درزه‌ها پس از برش در تماس باهم قرار نمی‌گیرند.		
K. نواحی یا نوارهای متلاشی‌شده یا خرد شده	۶/۰	(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 لای‌دار، مقدار کم رس، نرم نشونده	۵/۰	
O. نواحی یا نوارهای ضخیم وممتد رس	۱۰/۰-۱۳/۰	(۶-۲۴)
P و R (برای شرایط رس به J,H,G مراجعه شود)	۱۳/۰-۲۰/۰	

www.tnari.ir

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 5lit /min < بصورت موضعی	۱/۰	<۱/۰
B. آب با مقدار یا فشار متوسط, بعضا آب‌شستگی 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 آتشکاری، کاهش آب در طول زمان	۰/۲-۰/۱	>۱۰
F. جریان فوق العاده زیاد آب با فشار بطور مداوم و بدون کاهش در طول زمان	۰/۱-۰/۰۵	>۱۰
۶- ضریب کاهش تنش	**SRF**	۱- این مقادیر SRF را چنانچه مناطق برشی تونل راقطع نمیکند بلکه فقط تحت تاثیر قرارمی دهد به میزان ٪ ۵۰-۲۵ کاهش دهید ۲- برای تنش در جای شدیدا غیرایزوتروپ (اگراندازه گیری شده است): اگر $5>\frac{\sigma_1}{\sigma_3}>10$، مقدار σ_c را به ۰/۸ σ_c و σ_t را به ۰/۸ σ_t کاهش دهید. وقتی $\frac{\sigma_1}{\sigma_3}>10$، مقدار σ_c و σ_t را به ۰/۶ σ_c و ۰/۶ σ_t کاهش دهید σ_c مقاومت فشاری تک محوری و σ_t مقاومت کششی است (بارنقطه ای). σ_1 و σ_3 تنش‌های اصلی بزرگتروکوچکترهستند.
a. مناطق ضعیفی تونل را قطع می کند که ممکن است موجب سستی توده سنگ هنگام حفاری تونل شود.		
A. وقوع متعدد مناطق ضعیف که حاوی رس یا سنگ خرد شده و تجزیه شده است, سنگ خیلی سست در اطراف تونل (درهر عمق)	۱۰	
B. مناطق ضعیف منفرد حاوی رس, یا سنگ تجزیه شده و هوازده (۵۰m> عمق حفاری)	۵/۰	
C. مناطق ضعیف منفرد حاوی رس, یا سنگ تجزیه شده و هوازده (۵۰m< عمق حفاری)	۲/۵	
D. مناطق برشی متعدد در سنگ سالم و خوب (بدون رس), سنگ سست در اطراف تونل (هرعمقی)	۷/۵	
E. مناطق برشی منفرد در سنگ سالم و خوب (عاری از رس), (۵۰m> عمق حفاری)	۵/۰	
F. مناطق برشی مجرد در سنگ سالم و خوب (عاری از رس), (۵۰m< عمق حفاری)	۲/۵	
G. درزه‌های باز سست, شدیدا درزه‌دار یا حبه قند مانند (هرعمقی)	۵	

www.ttnar.ir

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

شرح	مقدار	ملاحظات
b. سنگ سالم و خوب، مسائل تنش درسنگ		
H. تنش کم نزدیک سطح زمین	۲/۵	۳- مواردمعدودی وجوددارد که عمق ازتاج تونل تا سطح زمین کمتر از عرض دهانه تونل است. در این مواردSRF را از ۲/۵ به ۵ افزایش دهید (H را ببینید).
σ_t/σ_1 σ_c/σ_1		
> ۱۳ > ۲۰۰		
J. تنش متوسط ۱۰-۲۰۰ ۱۳-۰/۶۶	۱	
K. تنش زیاد, ساختار خیلی محکم (tight) (معمولا از نظر پایداری مساعد است ممکن است برای پایداری دیواره ها نامساعد باشد). ۵-۱۰ ۰/۳۳-۰/۶۶	۰/۵-۲	
L. انفجار ملایم سنگ rock-burst (سنگ توده‌ای)	۵-۱۰	
۲/۵-۵ ۰/۱۶-۰/۳۳	۱۰-۲۰	
M. انفجار شدید سنگ (سنگ توپر) <۲/۵ <۰/۱۶		
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 بعلت فعل انفعالات شیمیایی ناشی از حضور آب		
P. فشار سنگ ملایم ناشی از تورم	۵-۱۰	
R. فشار سنگ شدید ناشی از تورم	۱۰-۱۵	

www.ttnar.ir

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 تونل های با طول بیشتر از ۵۰۰ متر نباید از ۲ در صد تجاوز نماید.مقدار توصیه شده برابر ۱.۵ در صد می باشد. حداکثر شیب در تونل های کوتاه تر از ۵۰۰ متر بهتر است از ۴ درصد تجاوز نکند.

دلایل انتخاب شیب کم در تونل ها:

۱-ممانعت از کاهش سرعت وسایل نقلیه سنگین برای جلوگیری از تراکم ترافیک در داخل تونل.
۲-تاثیر سربالایی های واقع در ارتفاعات در تعداد وسائط نقلیه ای که دچار خرابی می شوند.
۳-تاثیر سر بالایی ها در افزایش مقدار الودگی هوا
۴- تاثیر سرپایینی‌ها درافزایش 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 تونل‌های راه

با توجه به اینکه توسعه تونل در مقایسه با راه‌های واقع در هوای آزاد بسیار مشکل و نزدیک به غیرممکن است بهتر است سه نکته اساسی زیر را از قبل مد نظر قرار داد (آیین‌نامه 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 می‌توان ضمن استفاده از تونل موجود، تونل دیگری نیز احداث نمود.

۲- در راه‌های 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 معمولا 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 تونل‌ها.

که علاوه بر در نظر گرفتن مزایای ذکر شده برای دو تونل با مجرای کوچک بجای یک تونل با مجرای بزرگ، باید هزینه‌های 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.

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

www.tiran.ir

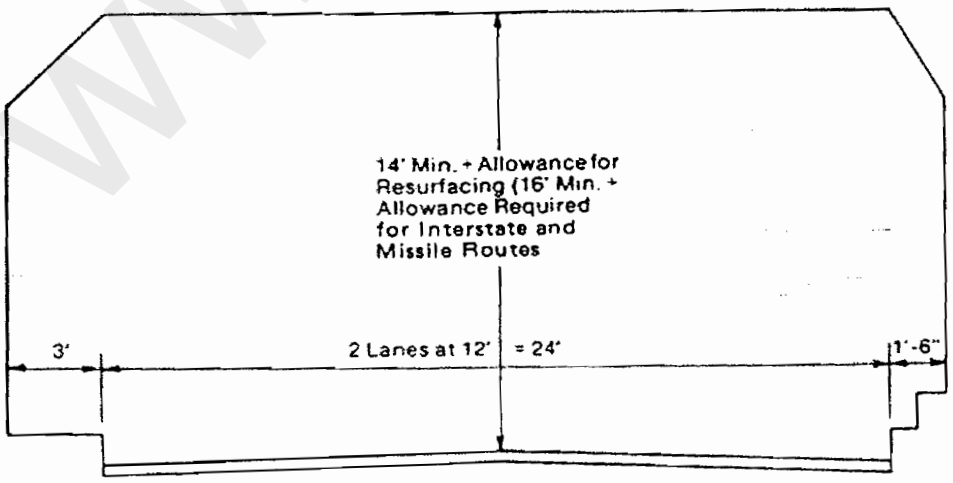
۱- در تونل با مقطع منحنی حداقل عرض پیاده رو ۶۰ سانتی متر باشد.
۲- در تونل با دیواره قائم حداقل عرض پیاده رو ۷۵ سانتی متر باشد.
۳- حداقل ارتفاع پیاده رو از لبه راه ۲۰ سانتی متر و حداکثر آن ۴۰ سانتی متر باشد.

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



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

۲-۳ 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 می گردد.

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 جدول۲-۲ انتخاب می‌شود:

جدول۲-۲- فواصل دید توقف طبق AASHTO

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

۲-۴ شیب تونل‌های راه‌آهن

در صورت امکان شیب تونل‌های مستقیم (بدون پیچ) راه‌آهن نباید از ۷۵ درصد شیب حداکثر در خارج تونل زیادتر در نظر گرفته‌شود. 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 .

www.tunar.ir

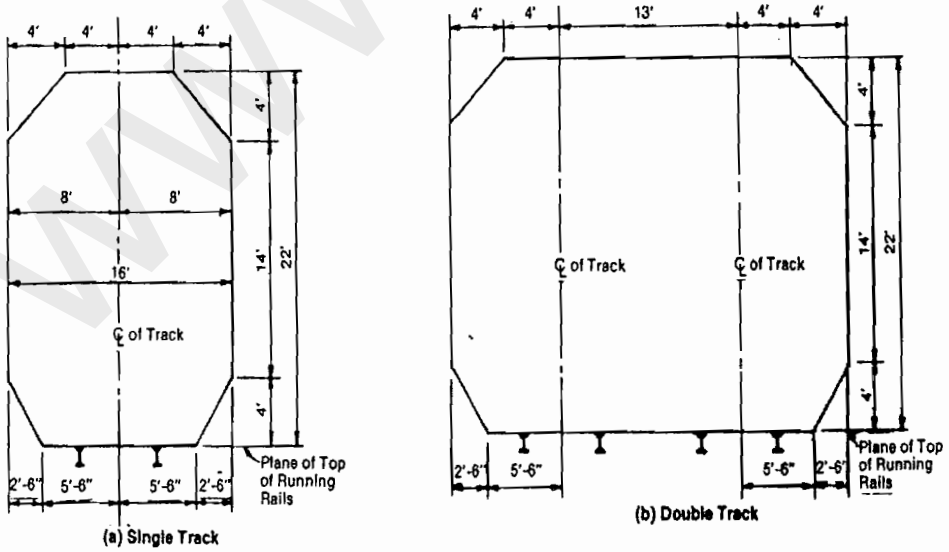
۲-۵ نیم رخ عرضی تونل‌های راه‌آهن

در جدول ۲-۳، ابعاد تیپ (typical dimensions) تونل‌های راه‌آهن در چند کشور داده شده است

جدول ۲-۳- ابعاد تونل‌های راه‌آهن در چند کشور

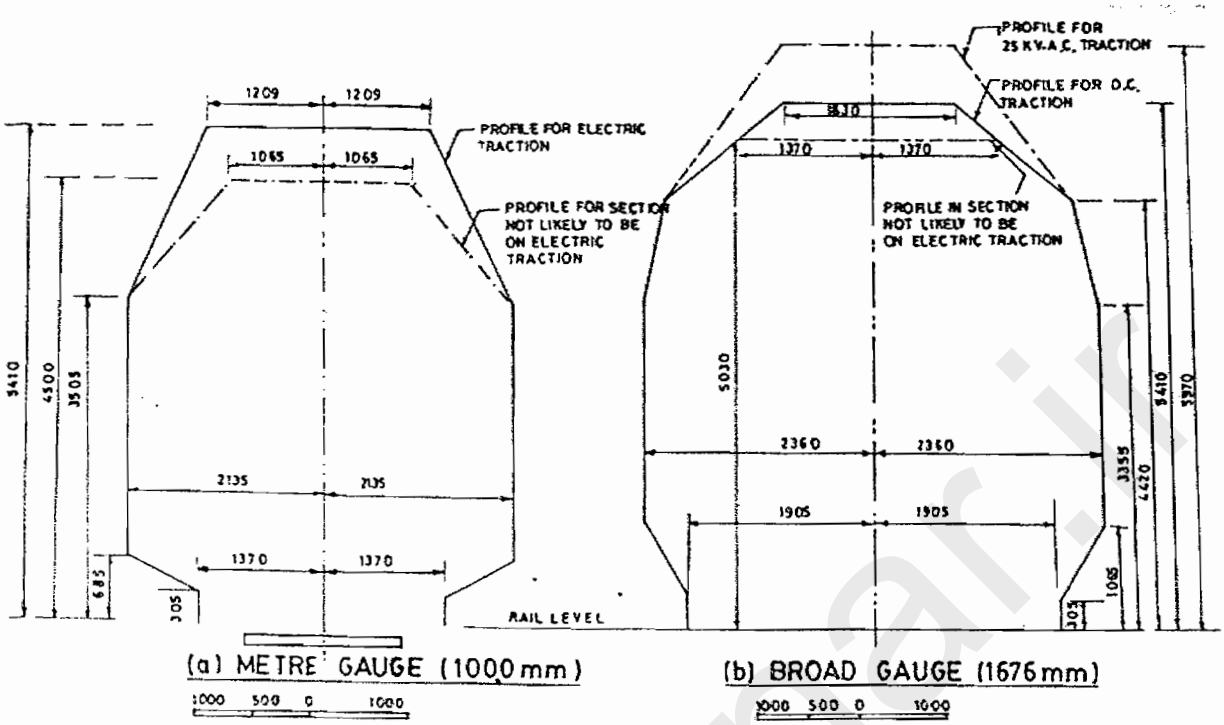
	نام کشور	عرض تونل (m)	ارتفاع طاق تونل تا بالای ریل(m)
تونل‌های دو خطه (double track)	ایتالیا	۸.۰۰	۶.۰۰
	فرانسه	۸.۰۰	۵.۸۰
	آلمان	۸.۲۰	۶.۲۰
	استرالیا	۸.۲	۶.۴۰
تونل‌های تک خطه (single track)	ایتالیا	۴.۶۰	۵.۰۰
	استرالیا	۵.۵۰	۵.۰۰
	سویس	۵.۲۰	۵.۸۰
	هند	۴.۷۲	۶.۰۰

در اشکال ۲-۲ و ۲-۳ نیز چند نمونه از حداقل ابعاد لازم.(clearance). برای تونل‌های راه‌آهن نشان داده شده‌است.



شکل ۲-۲- حداقل ابعاد لازم (clearance) برای تونل‌های راه‌آهن تک‌خطه و دوخطه طبق توصیه انجمن مهندسین راه‌آهن آمریکا

www.tunar.ir



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 درنظر گرفته شود. البته تونل‌های دارای پیچ هم در بسیاری موارد بویژه در مناطق کوهستانی مورد استفاده واقع شده‌اند. پیچ تونل‌های راه‌آهن غالبا دارای قوس اتصال تدریجی حلزونی (spiral) در دو انتهای پیچ می‌باشند .

۳- روش‌های حفاری تونل

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

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

روشهای حفاری تونل را می‌توان به صورت کلی در دو دسته قرار داد:

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

روش‌های حفاری مکانیزه عمدتا شامل موارد زیر است:

- حفاری تمام‌مقطع توسط دستگاه TBM
- حفاری موضعی توسط کله‌گاوی (roadheader)

در بعضی موارد از انواع چکش‌های هیدرولیکی قوی (rammer) نیز می‌توان برای حفاری تونل‌ها در بعضی شرایط استفاده کرد.

۳-۱ روش چالزنی و انفجار

این روش شامل مراحل زیر است :

- چالزنی
- خرجگذاری
- انفجار
- تخلیه دود
- لق گیری
- تخلیه مواد حفاری شده
- پایدارسازی (از قبیل نصب راکبولت، تور سیمی، شاتکریت) در صورت لزوم
- کارهای متفرقه دیگر مانند اضافه نمودن طول لوله‌های آب، داکتهای تهویه، سیم برق

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

www.tinar.ir

بعدا فضای خالی را باید با بتن پرکرد. ثانیا باید توجه کرد توده سنگ در حین انفجارآسیب نبیند تا فشار اضافی بر پوشش تونل وارد نکند.

در ۲۵ سال اخیر تکنیکهای چالزنی پیشرفت زیادی کرده است و استفاده ازجامبوهای 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 فعالیت های 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. امولسیون های 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 نتیجتا 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 .

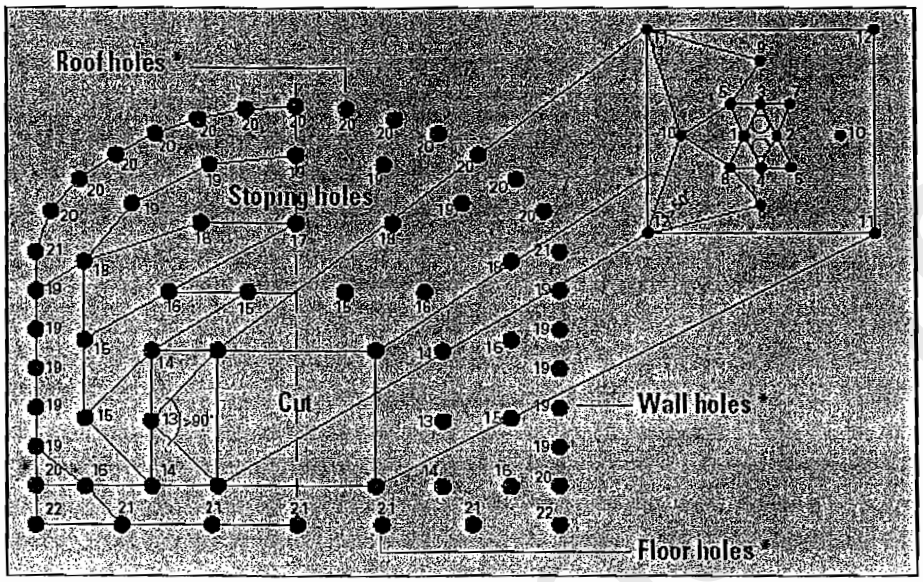
۳-۱-۱ الگوی چالزنی

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

www.tunar.ir

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

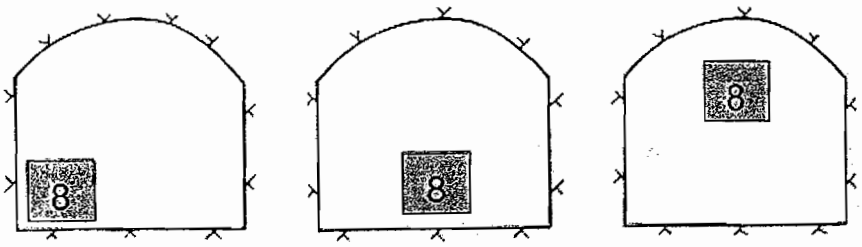


شکل ۳-۱- یک نمونه الگوی چالزنی و ترتیب انفجار چالها

۳-۱-۲ سطح آزاد

تفاوت بین انفجار شیروانی ها و انفجارتونل 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 جبهۀ 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 $0.9kg/m^3$ در اکثر سنگ‌ها برسد.

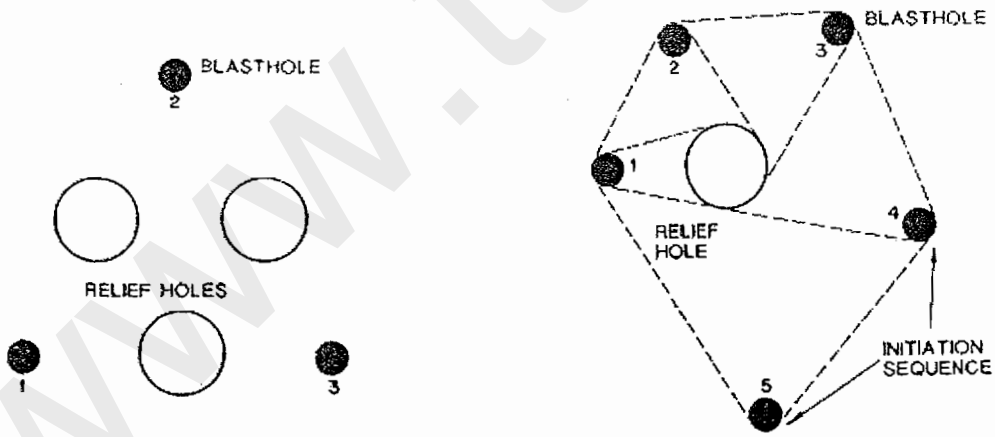


شکل ۳-۲- محل‌های مختلف برای ایجاد برش

۳-۱-۳ برش موازی

امروزه متداولترین برش مورد استفاده درتونل سازی برش موازی است. در برش موازی تمامی‌چالها به موازات هم ایجاد می‌شوند و چند چال بزرگ برای ایجاد سطح آزاد استفاده می‌گردند. معمولا چالهای اطراف خرجگذاری شده و چال یا چال‌های وسط خالی گذاشته می‌شود. 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.



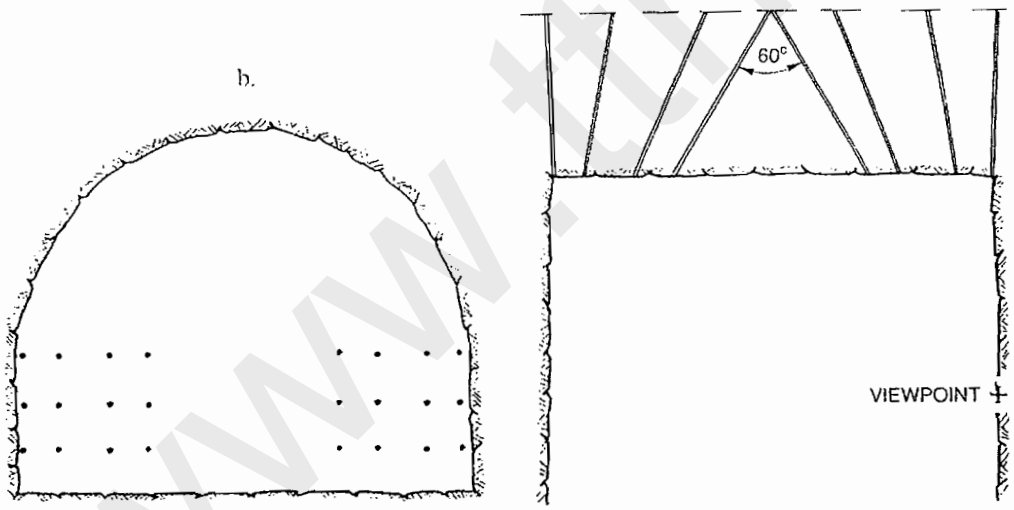
شکل ۳-۳- دو نوع برش موازی

www.tnari.ir

۳-۱-۴ برش‌های زاویه‌دار

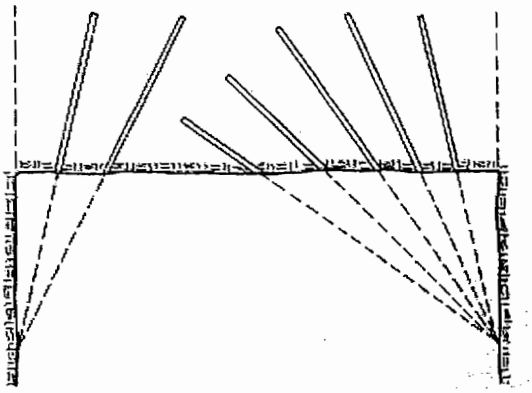
از جمله برش‌های زاویه‌دار برش گوه‌ای (برش V شکل) و برش بادبزنی می‌باشد. از برش گوه‌ای تنها در صورتی می‌توان استفاده کرد که عرض تونل به اندازه کافی بزرگ باشد تابتوان وسایل چالزنی را در آن جا داد. بطور معمول، مقدار پیشروی در هرمرحله ۴۰ تا ۴۵ درصد عرض تونل است (Hoek & Brown, 1994). .میزان پیشروی به دقت 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 شده‌است

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



شکل ۳-۴- نمونه‌ای از برش گوه‌ای

www.tnar.ir



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.

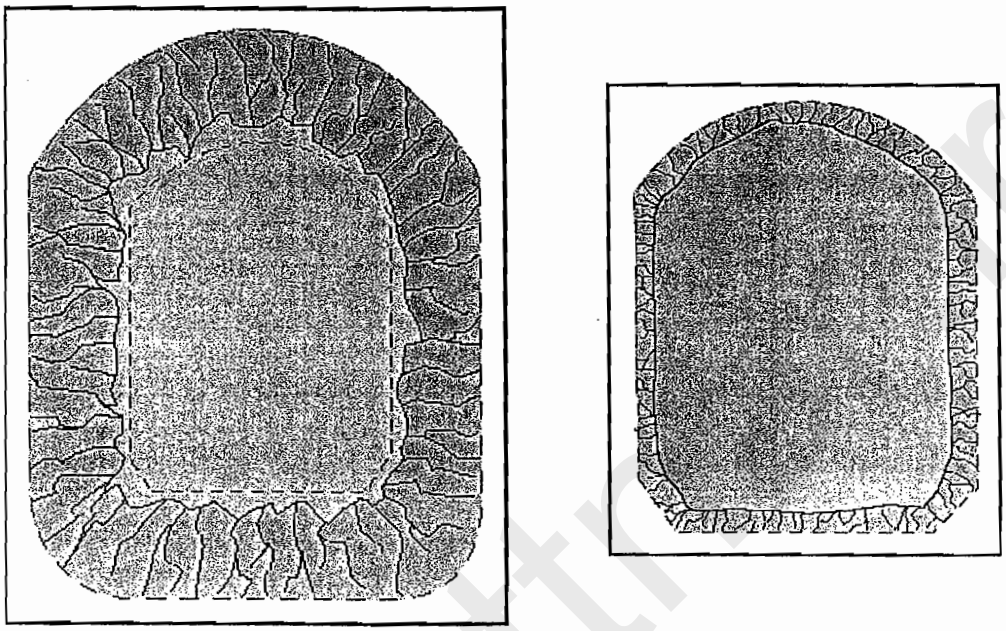
۳-۱-۶ انفجار کنترل شده

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 انفجارصاف (smooth blasting)
- روش پیش برش (presplitting)

www.tfnar.ir

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 شکل۳-۶ 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.

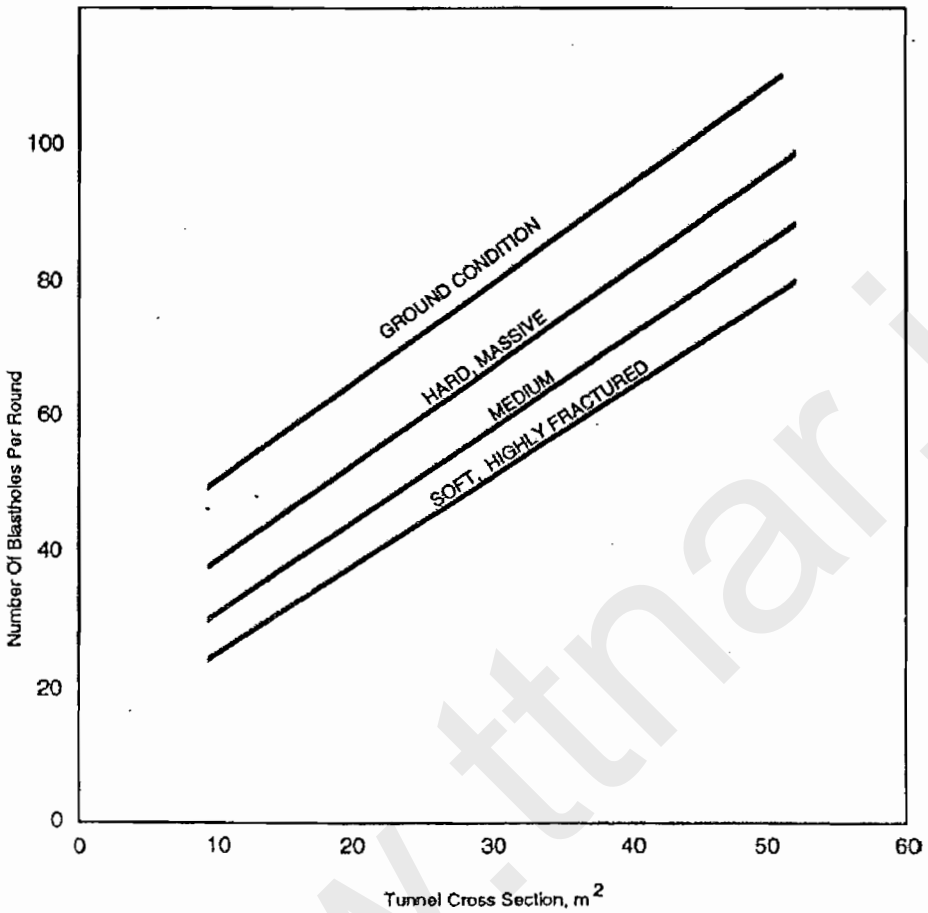


شکل ۳-۶- ناحیه ترک‌خورده در انفجار معمولی و انفجار صاف -
شکل سمت چپ انفجار معمولی- شکل سمت راست انفجار صاف

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

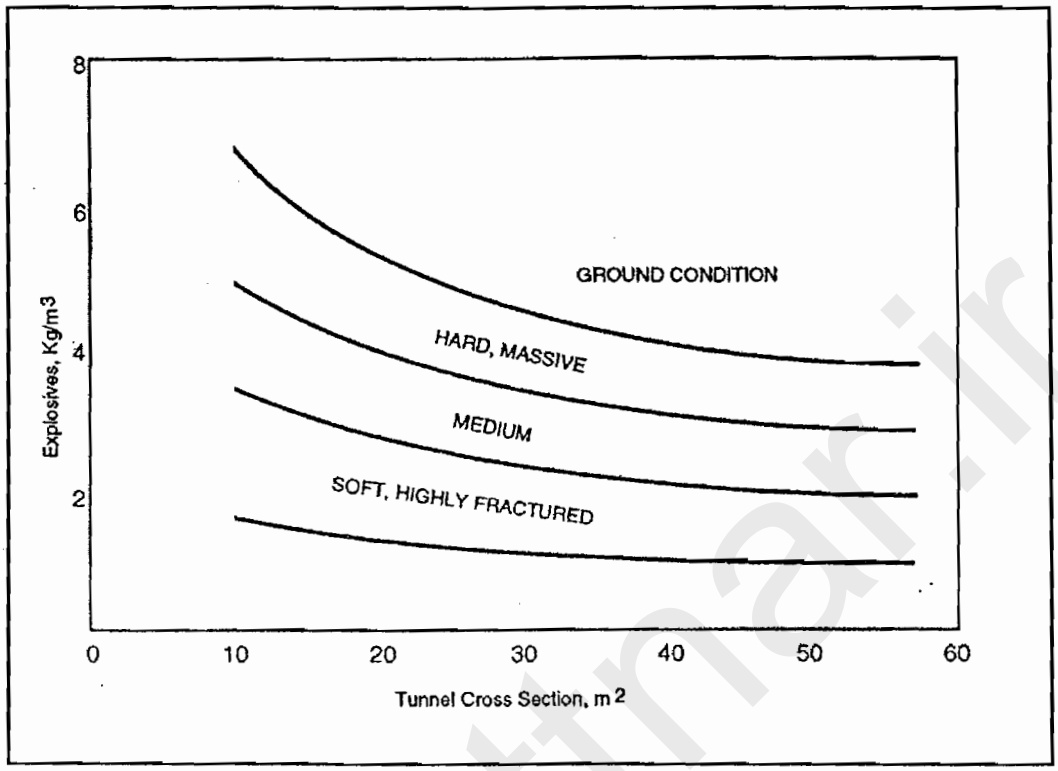
تعداد چال مورد نیاز برای حفاری یک تونل به عوامل متعددی از جمله شرایط زمین از نظر زمین شناسی، شکل و اندازه مقطع تونل و قطر چالهای مورد استفاده بستگی دارد. بدیهی است با افزایش سطح مقطع به چالهای بیشتری نیاز است. شکل ۳-۷ تعداد چالهای مورد نیاز را به ازاء تغییرات سطح مقطع تونل در سنگهای مختلف نشان می‌دهد.

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 به‌ذکر 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

www.ttnar.ir



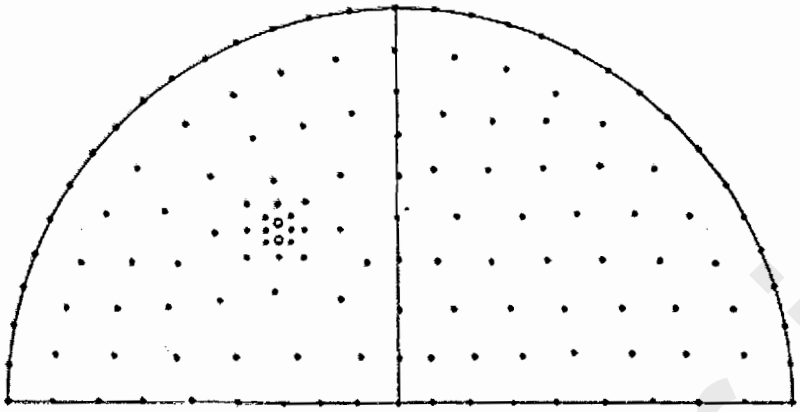
شکل ۳-۸- مقدار مواد منفجره مورد نیاز

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	۲۲	۲۶۵	۱۳۰	عالی	> ۳۰۰۰	۱/۴۵
	۳۰	۳۰	۱۹۵	۱۶۵	عالی	> ۳۰۰۰	۱/۴۵
	۵۰	۵۰	۳۰۰	۸۰۰	عالی	> ۳۰۰۰	۱/۴۵
آنفو	-				ضعیف	۳۲۰۰	۰/۸۵-۱

www.tnar.ir



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 میلی‌متر	ارتفاع ۸/۵ متر	قطر چال ۴۵ میلی‌متر	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 میلی‌متر	طول تونل ۵۰۰ متر
	حجم کل ۲۸۵۰۰ متر مکعب	تعداد چال برش ۲ عدد	حجم کل ۲۸۵۰۰ متر مکعب
طول چال ۳/۳ متر	متراژ حفاری ۱۸۱/۳ متر	طول چال ۳/۳ متر	متراژ حفاری ۲۶۰/۷ متر
حفاری ویژه ۱/۰۷ متر بر مترمکعب		حفاری ویژه ۱/۵۲ متر بر مترمکعب	

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

www.tunnel.ir

۳-۲ حفاری با TBM

۳-۲-۱ تاریخچه ساخت و استفاده از TBM

تاریخچه استفاده از TBM به زمانی برمی‌گردد که اولین تونلهای بلند در دنیا طراحی و اجرا شدند. اولین تونلهای بلند همراه با توسعه صنعتی شدن که منجربه گسترش حمل و نقل زمینی کالا و مردم با راه آهن می‌شد احداث شدند. در اروپا اولین مانع بر سرراه 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 عملا برای حفاری این تونل به کاربرده نشد. ما بین سالهای ۱۸۴۶ تا ۱۹۳۰ نزدیک ۱۰۰ دستگاه حفاری تونل طراحی و ثبت شد. اما تقریبا 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 شده‌است 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 .

www.tmar.ir

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

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

۳-۲-۲ انواع TBM

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

TBMها را بطور کلی می‌توان به سه دسته تقسیم کرد:

www.ittnar.ir

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

۳-۲-۲-۱ TBMهای باز

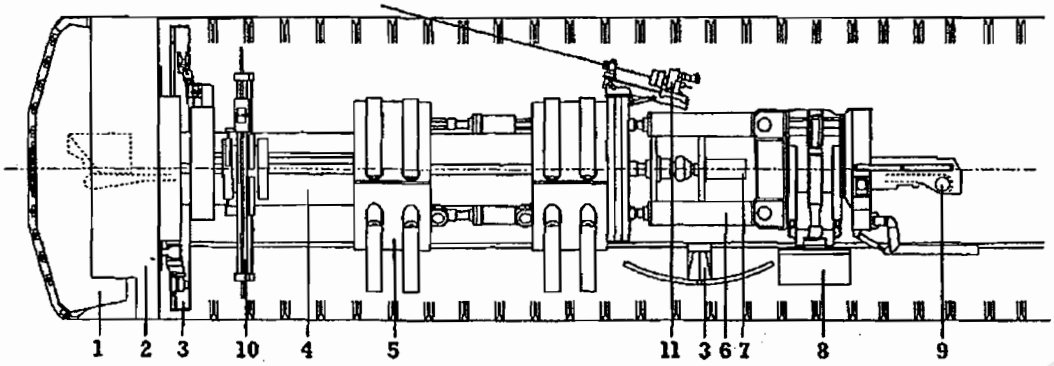
بر خلاف TBMهای سپردار که در آنها دستگاه در داخل یک سپر فولادی استوانه‌ای شکل قرار می‌گیرد، TBMهای باز بدون سپر محافظ می‌باشند. در این TBMها، نیروی عکس‌العمل برای رانش صفحه حفاری به جلو توسط چنگزن‌هایی (gripper) که به دیواه تونل تکیه می‌زنند تامین می‌شود.

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 .

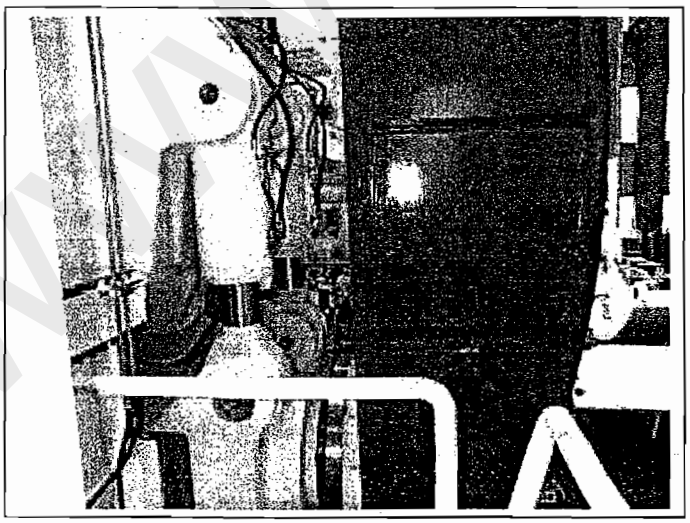
برخلاف TBMهای سپردار که در آنها نصب پوشش سگمنتی (segment lining) مستقل از کیفیت سنگ است، میزان عملکرد TBM باز به وسعتی از سنگ که نیاز به پایدارسازی دارد و زمان مورد نیاز برای پایدارسازی بستگی دارد.



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

شکل ۳-۱۰- نمایی از یک TBM باز

تفاوت اساسی بین TBMهای دارای تک چنگزن و TBMهای با چنگزن دوبله این است که در TBMهای دارای تک چنگزن، امکان اصلاح مسیر در حین عملیات حفاری وجود دارد. در مورد TBMهای 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

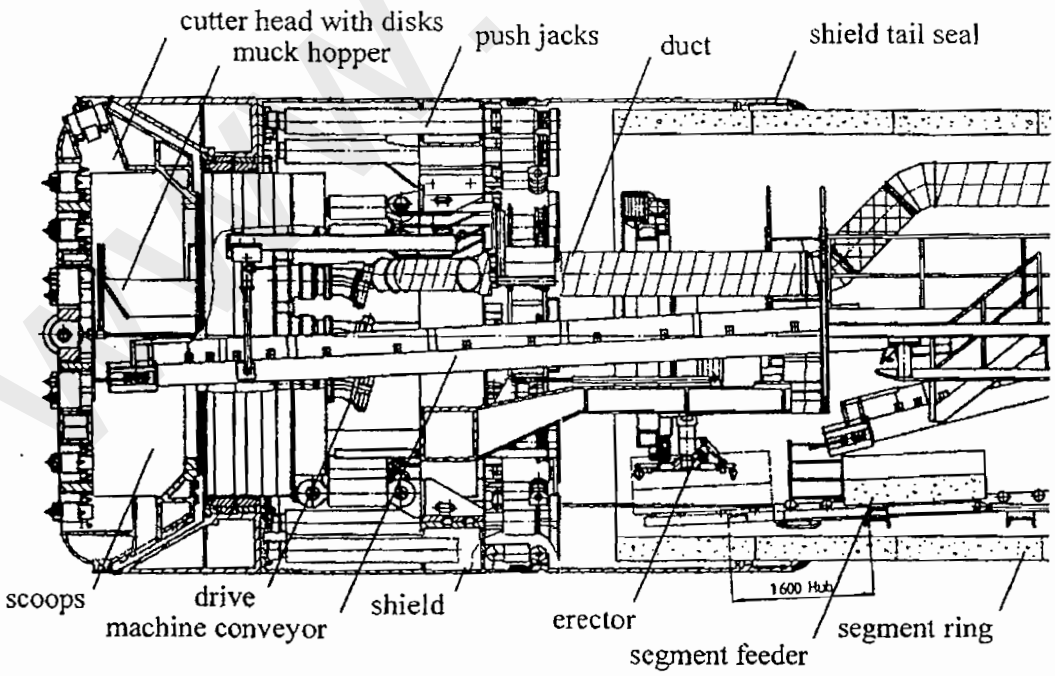
www.tnar.ir

کفشک‌های چنگزن‌ها می‌توانند بطور هیدرولیکی حرکت کرده و خود را با سطح حفاری شدهٔ 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 TBMهای تک سپری

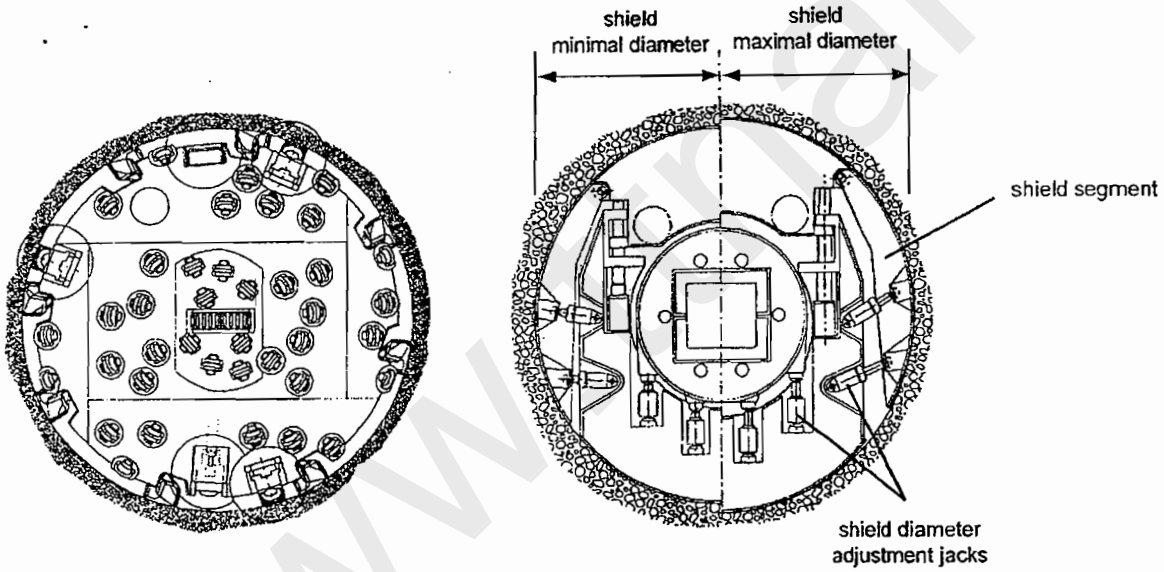
TBM های سپردار در شرایطی که سنگ ناپایدار است و احتمال ریزش زمین وجود دارد، کاربرد دارند. سپر برای محافظت و مهار سنگ و محافظت پرسنل و تجهیزات عمل می‌کند. پوشش از سگمنت‌های پیش ساخته بتنی ساخته می‌شود که توسط وسیله مخصوص در محل خود قرار داده شده و معمولا به همدیگر پیچ می‌شوند.

در TBMهای تک سپری، نیروی رانش ماشین توسط سگمنت‌ها تحمل می‌شود. فضای خالی بین سگمنت‌های کارگذاشته شده و دیواره تونل توسط شن پر شده و توسط ملات بصورت پیوسته تزریق میشود. هندسه سگمنت‌ها برسرعت اجرا تأثیر می‌گذارد. در این TBMها، در حین عملیات سگمنت‌گذاری، عمل حفاری متوقف می‌شود.



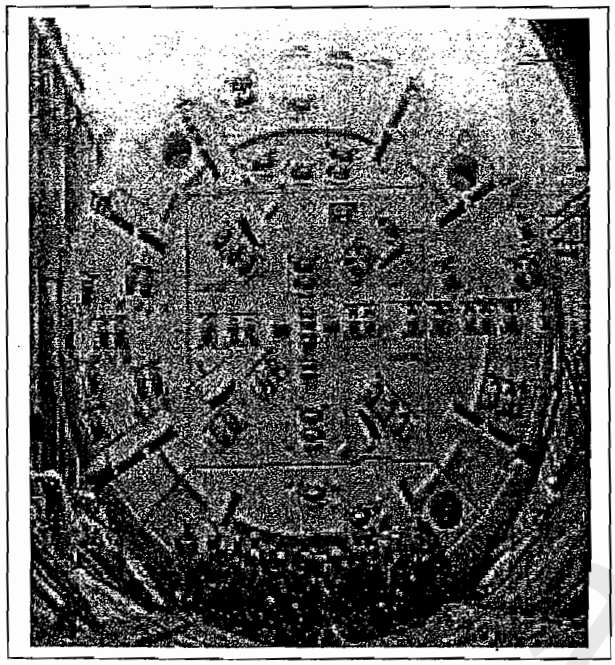
شکل ۳-۱۲- نمایی از یک TBM تک سپری

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 کله‌گاوی) 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 نتیجتا از میزان فشار وارده بر سپر کاست. با پیشرفت های موجود در صنعت TBM، بیش حفاری تا ۲۵۰ میلی‌متر امکان‌پذیر است. افزایش قطر، باعث کاهش پیشروی حفاری به میزان حدودا 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 قبلا 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.



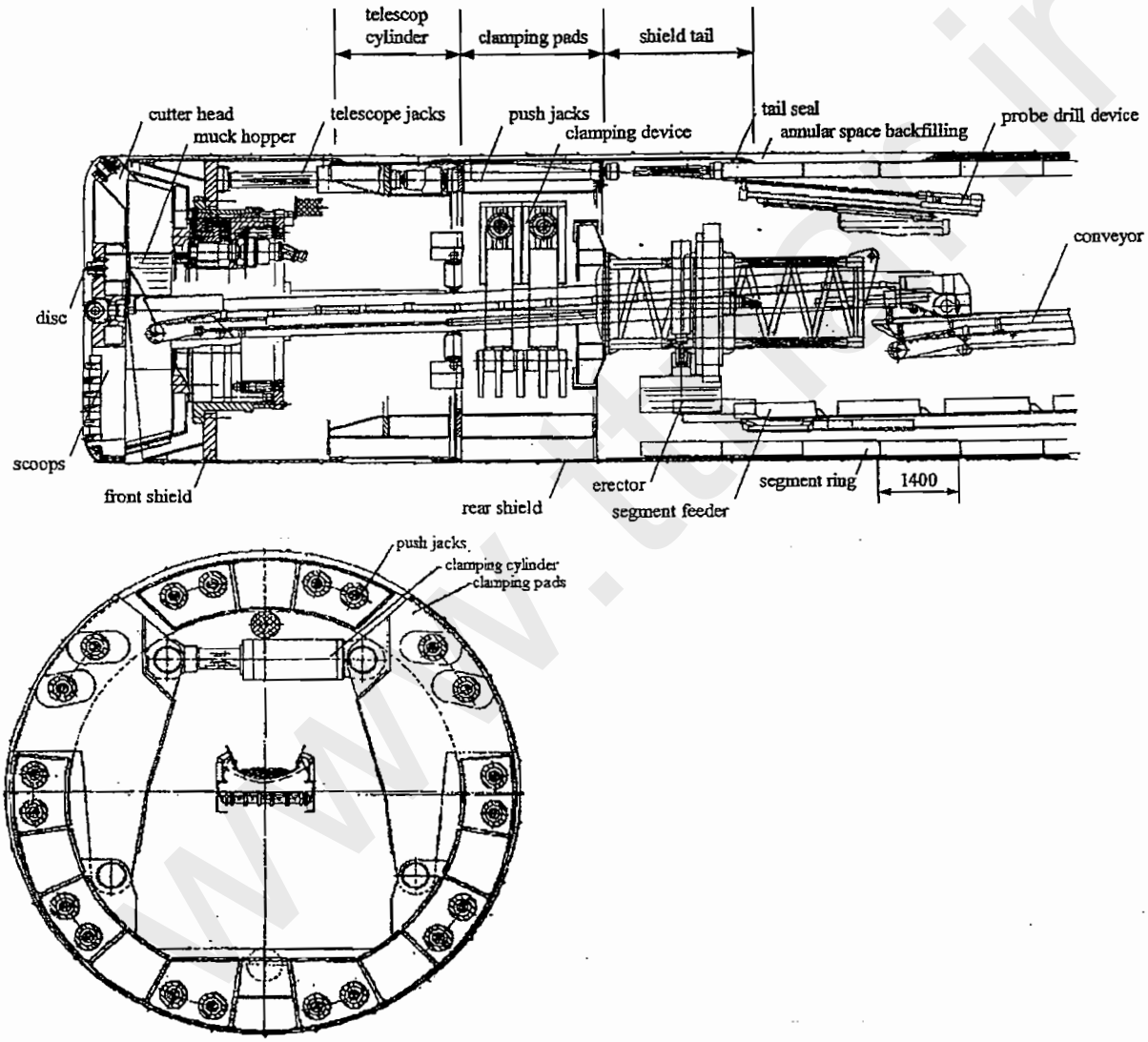
شکل ۳-۱۴- نمای یک TBM تک سپری مورد استفاده در یک تونل راه
و نیز یک تونل راه‌آهن به قطر ۱۱/۹ متر

۳-۲-۲-۳ TBMهای 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 بطورهمزمان است. صفحه حفاری و سپرجلوئی (front shield) توسط جک‌های تلسکوپی به جلو هل داده می‌شوند. جک‌های کمکی رانش (auxiliary thrust cylinders) که در سپرعقبی (tail shield) قرار دارند فقط برای نگهداری سگمنت‌های کار گذاشته شده مورد استفاده قرار میگیرند. زمانی که جک‌های تلسکوپی کاملا باز می‌شود، چنگزن‌ها 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 کارگذاشته شده باز می‌شوند. نگهداری در طول عمل چنگزنی مجدد (re-grip) توسط کفشک‌های تکیه‌گاهی قائم و سپر جلوئی و جک‌های کمکی رانش انجام می‌شود

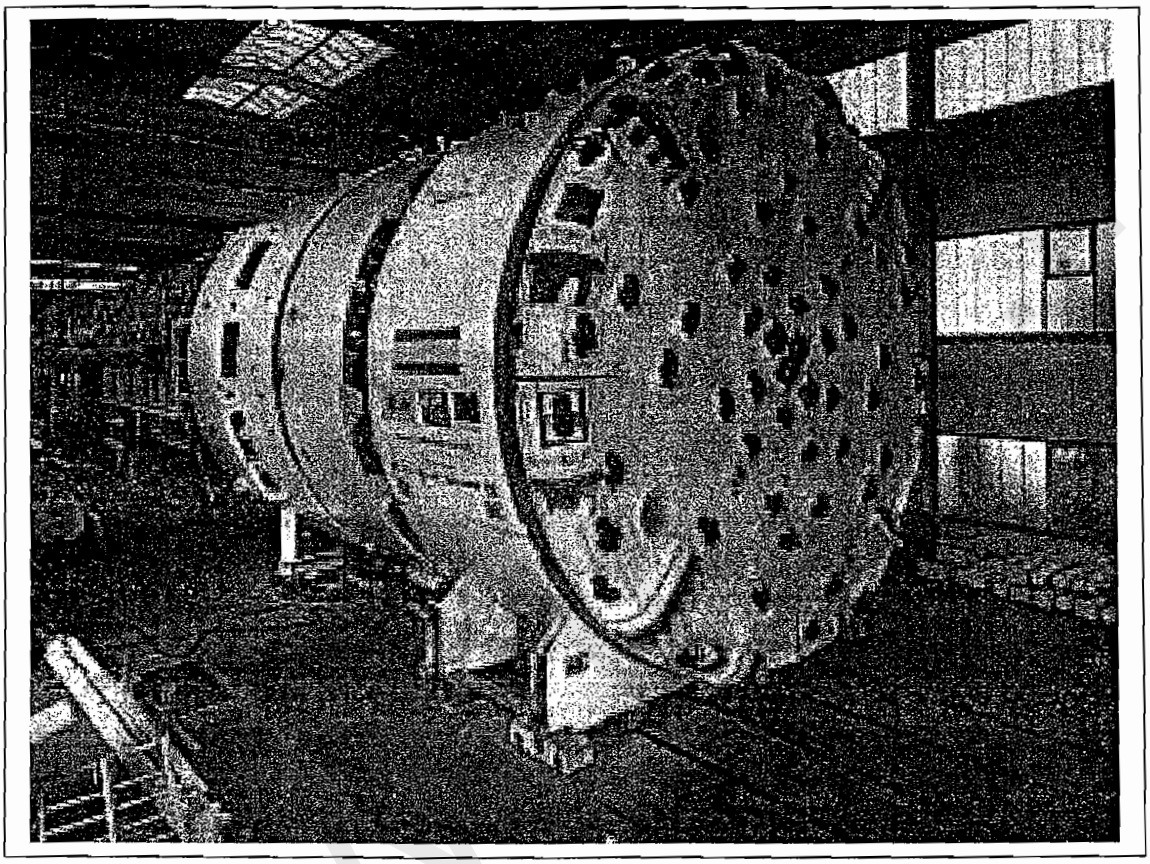
TBMهای دوسپری قادرند همزمان با حفاری، عمل نصب سگمنت‌ها را نیز انجام دهند و عمل حفاری در اینگونه TBMها فقط برای مدت زمان کوتاهی جهت جلو رفتن سپر عقبی بعد از هر کورس حفاری (boring stroke) متوقف می‌شود. در TBMهای تک سپری، در حین نصب سگمنت‌ها، دستگاه قادر به حفاری نمی‌باشد. بنابراین، سرعت حفاری با یک TBM دوسپری تقریبا دو برابر سرعت حفاری با TBM تک سپری می‌باشد. .



شکل ۳-۱۵- نمایی از یک TBM دوسپری

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

قرار گرفت. کل طول تونل ۲۹ کیلومتر بوده و مسیر تونل از گنایس و گرانیت هوازده عبور می‌کند. نیروی کل رانش این دستگاه ۱۰۵۰۰۰ کیلو نیوتن با حداکثر گشتاور (torque) ۲۰۰ مگانیوتن- متر می‌باشد. حفاری این تونل در نوامبر 2002 آغاز شده است .



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

۳-۲-۳ انواع ابزار برش و کاربرد آنها

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

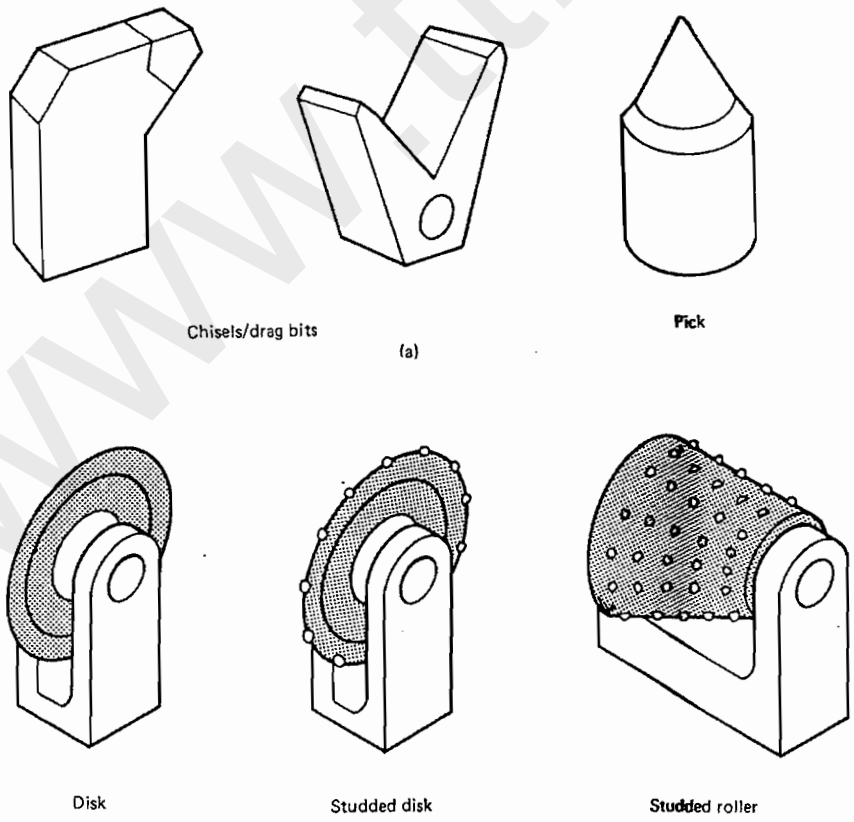
۱- ابزار برش کلنگی (pick) یا اسکنه‌ای (drag bit)
۲- ابزار برش دیسکی (disc)
۳- ابزار برش غلتکی (roller)

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 می‌باشند. ابزار برش کلنگی یا اسکنه‌ای در شکلها و اندازه های مختلف ساخته می‌شود. این ابزاربرش زمین را به صورت تکه های نسبتاً بزرگ (در مقایسه با انواع ابزاربرش دیسکی) می‌کند و این امر کار آیی و سهولت حفاری در سنگهای ضعیف و دارای خاصیت پلاستیک، که موجب بروز مشکلات اجرائی در ابزاربرش دیسکی می‌شوند، را افزایش می‌دهد.

ابزاربرش دیسکی:

این ابزاربرش دیسک ساده‌ای با یک لبه برشی تیغه‌ای است که این تیغه قابل تعویض می‌باشد. این ابزاربرش به صورت دو یا سه دیسکه نیز ساخته می‌شوند. مکانیزم حفاری توسط دیسک ایجاد شیار در سنگ و همزمان با آن اعمال نیروی برشی برای شکستن برآمدگیهای حاصل از ایجاد شیار می‌باشد. سنگهائی که مقاومت فشاری تک محوره در حدود ۱۷۵ مگاپاسکال دارند را می‌توان با موفقیت توسط این ابزاربرش حفاری کرد. سنگهای دارای ساینده‌گی زیاد، مشکلاتی در حفاری با این ابزاربرش ایجاد می‌کنند. با استفاده از کاربید تنگستن (tungsten carbide) بر روی لبه دیسک، دامنهٔ کار برد چنین ابزاربرشی 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 می‌گردد. به اینصورت که نفوذ دندانه‌ها موجب بوجود آمدن تراشه‌های سنگ تحت تأثیر تنش‌های کششی و برشی می‌شود.

ابزاربرش غلتکی نوع کاربید تنگستنی در جاهائی مورد استفاده قرار می‌گیرند که ویژگیهای ساینده‌گی سنگ، استفاده از ابزاربرش نوع دندانه‌ای را اجازه نمی‌دهد. حفاری سنگ با این نوع ابزار برش ناشی از عمل خرد شدن (pulverization) است تا اینکه بر اثر تشکیل تراشه‌های سنگ باشد. اگر چه سرعت نفوذ با این نوع ابزاربرش کند است و مقدار زیادی نرمه تولید می‌کند و مصرف و هزینهٔ ابزاربرش بالا می‌باشد، ولی این ابزار برش برای سنگهای با مقاومت زیاد، نوع مناسب‌تر و کارآتری هستند.

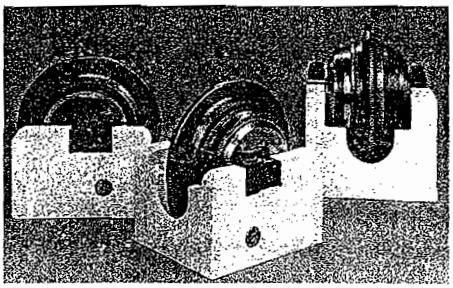
ابزار برش از نظر موقعیت قرارگیری بر روی صفحه حفاری به سه دسته تقسیم می‌شوند:
ابزاربرش مرکزی (center cutters): در قسمت مرکزی صفحه حفاری، لازم است که برای دستیابی به حفاری سریع و مؤثرتحت شرایط سرعت برشی نسبتا آهسته، دسته‌ای از ابزاربرش خاص نصب گردد که در بعضی از موارد ابزاربرش به منظور تسهیل خرد شدن سنگ به شکل سه مخروطه (tricone) قرار می‌گیرند.
ابزاربرش میانی (face cutters) : قسمت اصلی سینه کار معمولا با ابزاربرش دیسکی یا غلتشی حفر می‌شود که بکارگیری این ابزاربرش به سختی سنگ بستگی دارد. برخی مواقع نظیر حفاری در سنگهای ضعیفتر ممکن است استفاده از ابزاربرش اسکنه‌ای را ایجاب نماید.

ابزاربرش لبه‌ای (gauge cutters): این ابزاربرش در لبه خارجی صفحه حفاری و معمولا بصورت مایل نصب می‌شوند تا بتوانند خلاصی لازم برای عبور TBM را فراهم کنند. ابزاربرش لبه‌ای 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 می‌شود، مقاومت کنند.

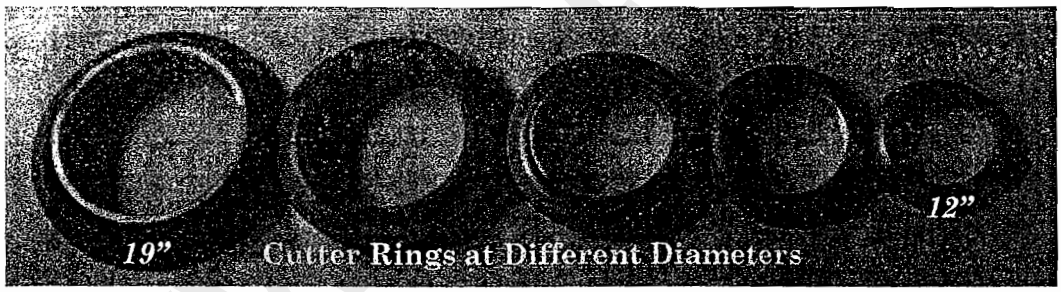
اصل اساسی که بازدهی خردکردن سنگ بوسیله دستگاه را افزایش می‌دهد افزایش اندازه قطعات خرد شده است. یعنی ابزار برش باید طوری چیده شوند که بزرگترین اندازه قطعات خرد شده بدست آید. در یک TBM مخصوص سنگ سخت اگر بار هر کاتر افزایش داده‌شود، کاتر بیشتر در سنگ فرو می‌رود و با

نفوذ بیشتر می‌توان فاصله بین کاتر ها 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٪۹۰-۸۵ 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 TBMبیشتر 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 کنندهٔ اصلی در حفاری توسط دستگاه است. ابداع TBM هایی که با ابزاربرش دیسکی (disc cutter) مناسبی تجهیز شده، شاید تنها پیشرفت عمدهٔ صورت گرفته در روند مکانیزه کردن تونلسازی بوده است. این دستگاهها به میزان زیادی حوزهٔ کاربرد تونلسازی برای دستیابی به نرخهای بالای پیشروی و همچنین‌درشرایط‌سنگی‌سخت‌تر، که قبلا خارج از حیطهٔ 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 می‌گیرد، مهمترین عوامل اقتصادی نرخ نفوذ (penetration rate) و هزینه های ابزار برش می‌باشند. ابزاربرش معمولاً در جریان حفر سائیده می‌شوند، ولی در شرایط سنگ بلوکی سخت، برخی از ابزاربرش متحمل خسارت می‌شوند یا حتی تحت تأثیر بارهای ضربه ای بالا که در جریان حفر با آن روبرو می‌شوند، بطور کامل درهم می‌شکنند. 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 ساینده‌گی 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 جنبهٔ 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 بررسیهائی که برای بالا بردن قدرت ابزاربرش جهت غلبه بر سنگهای سخت‌تر به عمل آمد، این بود که عوامل محدود کننده عبارتند از ظرفیت تحمل بار ابزاربرش و مصالح لبهٔ ابزاربرش یا بخشی از ساختار ابزاربرش که در تماس با سنگ قرار می‌گیرد. در اوائل دهه ۱۹۷۰ دستگاههائی که طراحی شده بودند قادر به اعمال حداکثر حدود ۱۰ تن بار پیوسته بر روی هر ابزاربرش بودند. در ضمن بارهای ضربه‌ای حدود ۲/۵ تا ۳ برابر بار پیوسته غالبا بر هر ابزاربرش اعمال میشد. بهرحال، در دههٔ ۱۹۷۰ ابزاربرش از جنبهٔ طراحی تا جائی توسعه یافتند که قادر به تحمل ۱۵ تا ۲۰ تن بارگذاری پیوسته باشند ونتیجه این پیشرفتها 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 کنندهٔ باقیمانده، مواد لبهٔ 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 عمده‌ای 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 مادهٔ بدنه ابزاربرش نشانده می‌شد. هر چند این تکه های کاربیدی مقاومت بسیار بالائی در برابر سایش از خود نشان می‌دادند، ولی از جنبه تحمل بارهای بسیار زیادی که ابزاربرش جدید باید تحمل می‌کردند، دچار محدودیت بودند. بهرحال، برای رفع این نقیصه و به منظور توزیع بهتر بارهای وارده، فاصلهٔ 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 جنبهٔ 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.

PR = زمان حفاری / طول حفاری شده

ب- بهره‌وری دستگاه (utilization)

درصدی از زمان شیفت که صرف حفاری می‌شود.

U = زمان‌شیفت / زمان‌حفاری دستگاه x ۱۰۰

ج- سرعت پیشروی (advance rate)

AR = زمان شیفت / طول حفاری شده

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 شده‌است.

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 بهره وری (٪)	38	5 - 69

www.tunar.ir

جدول ۳-۶- روش‌های 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 برحسب 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)	$P=\frac{3940F_n}{UCS}$	ــــــــــــ
P نرخ نفوذ بر حسب $mm/\mathrm{Re}v$، F_n نیروی متوسط روی هر ابزار برش بر حسب kN، UCS مقاومت فشاری سنگ بر حسب kPa		
Farmer & Glossop (1980)	$P=\frac{624F_n}{\sigma_{tf}}$	بر مبنای ۶ پروژه حاصل شده‌است
P نرخ نفوذ بر حسب $mm/\mathrm{Re}v$، F_n نیروی متوسط روی هر ابزار برش بر حسب kN، σ_{tf} مقاومت کششی سنگ بر حسب kPa		
Cassinelli (1982)	$P=-0.0059RSR+1.59$	ــــــــــــ
P نرخ نفوذ بر حسب متر بر ساعت، RSR رده بندی Rock Structure Rating		
Bamford (1984)	$P=0.535.S-8.49-0.00344.T-0.000823N+0.0137\phi$	لای‌سنگ با لایه‌بندی ۳۰ تا ۵۰ سانتی‌متر (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		

www.tunar.ir

ادامه جدول ۳-۶- روش‌های مختلف تعیین سرعت نفوذ

روش	رابطه	ملاحظات
Sanio (1985)	$\frac{P_0}{P_{90}} = \frac{I_{s,50,90}}{I_{s50,0}}$	تاثیر لایه بندی بر نرخ نفوذ
P_0 نرخ نفوذ موازی لایه بندی، P_{90} نرخ نفوذ عمود بر لایه بندی، $I_{s50,90}$ شاخص بارگذاری نقطه‌ای عمود بر لایه بندی ،$I_{s50,0}$ شاخص بارگذاری نقطه‌ای موازی لایه‌بندی		
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 آمده‌اند .
$\beta 2, \beta 1$ تردی ، σ_c مقاومت فشاری تک محوره، σ_t مقاومت کششی، P نرخ نفوذ بر حسب سانتی‌متر بر دقیقه		
Lislerud (1988)	$P = ib \times K_s \times K_d$	بر مبنای حفاری های انجام شده در سنگ‌های 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 درزه‌ها 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 نقطه‌ای 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 حفار بر حسب Rev/min		

www.tunar.ir

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 معمولا سیستم پشتیبانی برای عبور نیاز به شعاع قوس ۱۵۰ الی ۴۵۰ متر دارد.

لزوما برای یک پروژه احتیاج به سفارش TBM جدید نیست و بعضا 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.

برمبنای 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 ۱.۸۳متر در ساعت بود.

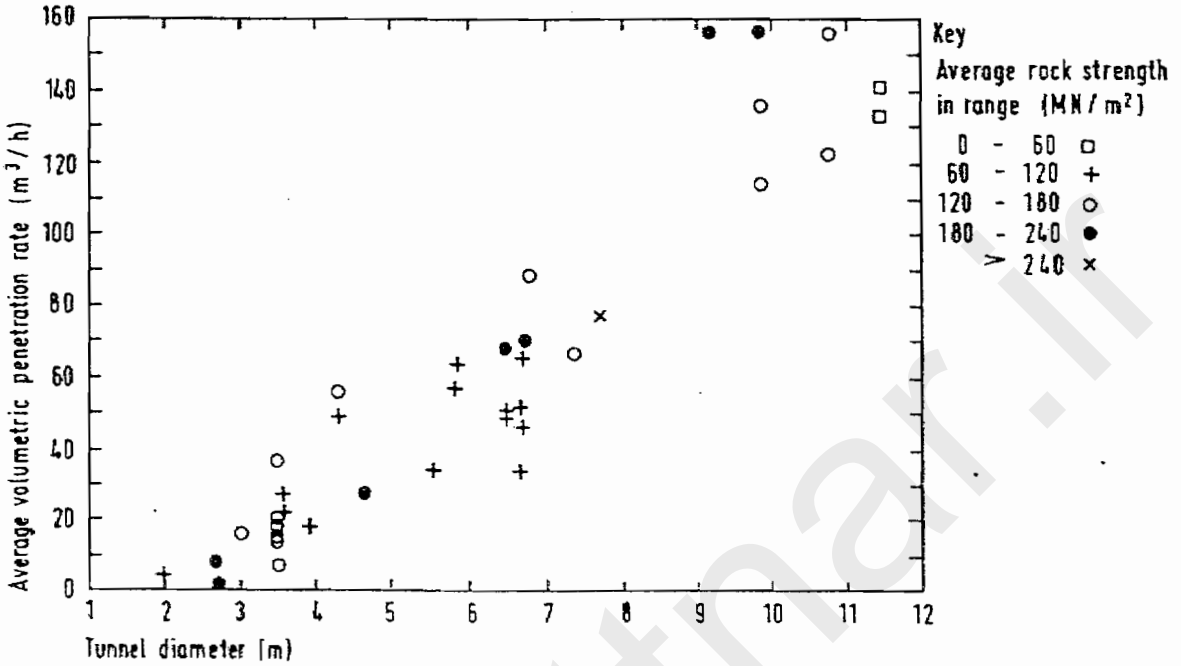
در شکل ۳-۱۹، تغییرات سرعت نفوذ متوسط حجمی (average volumetric penetration rate) برای قطرهای مختلف تونل برای محدوده‌های گوناگون مقاومت سنگ نشان داده شده‌است.
سرعت پیشروی حداکثر (maximum advance rate) با زیادتر شدن بازه زمانی در نظر گرفته شده، کاهش پیدا می‌کند. در تحقیقات CIRIA حداکثر سرعت پیشروی در مدت زمان یک روز، یک هفته و یک ماه برای یک تونل حفاری شده در ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک 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 آمده‌بود. بهترین سرعت پیشرفت در طول پروژه برابر ۱.۸۹ متر در ساعت و مربوط به سنگ آهک با مقاومت نسبتا بالا و

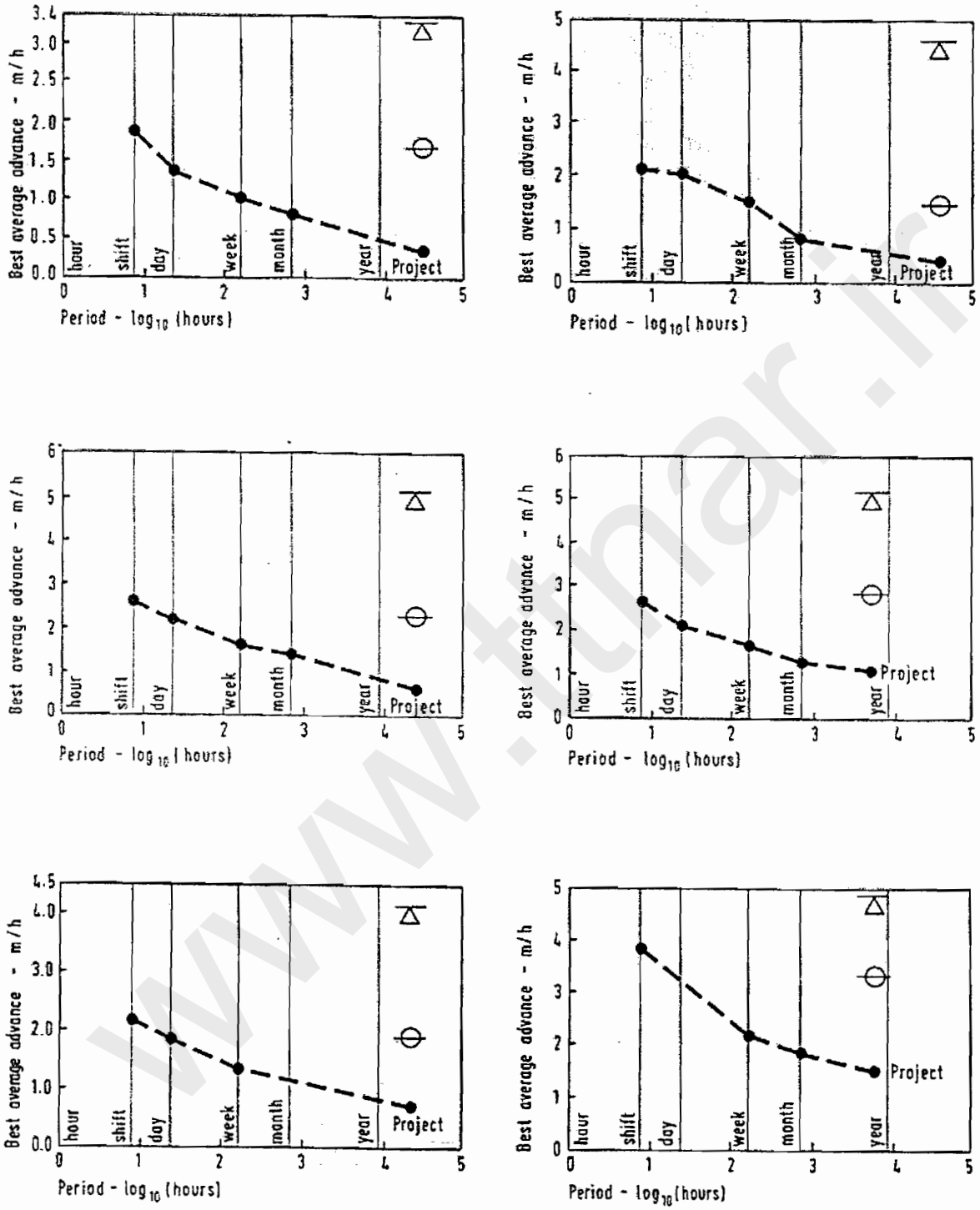
www.tinar.ir

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



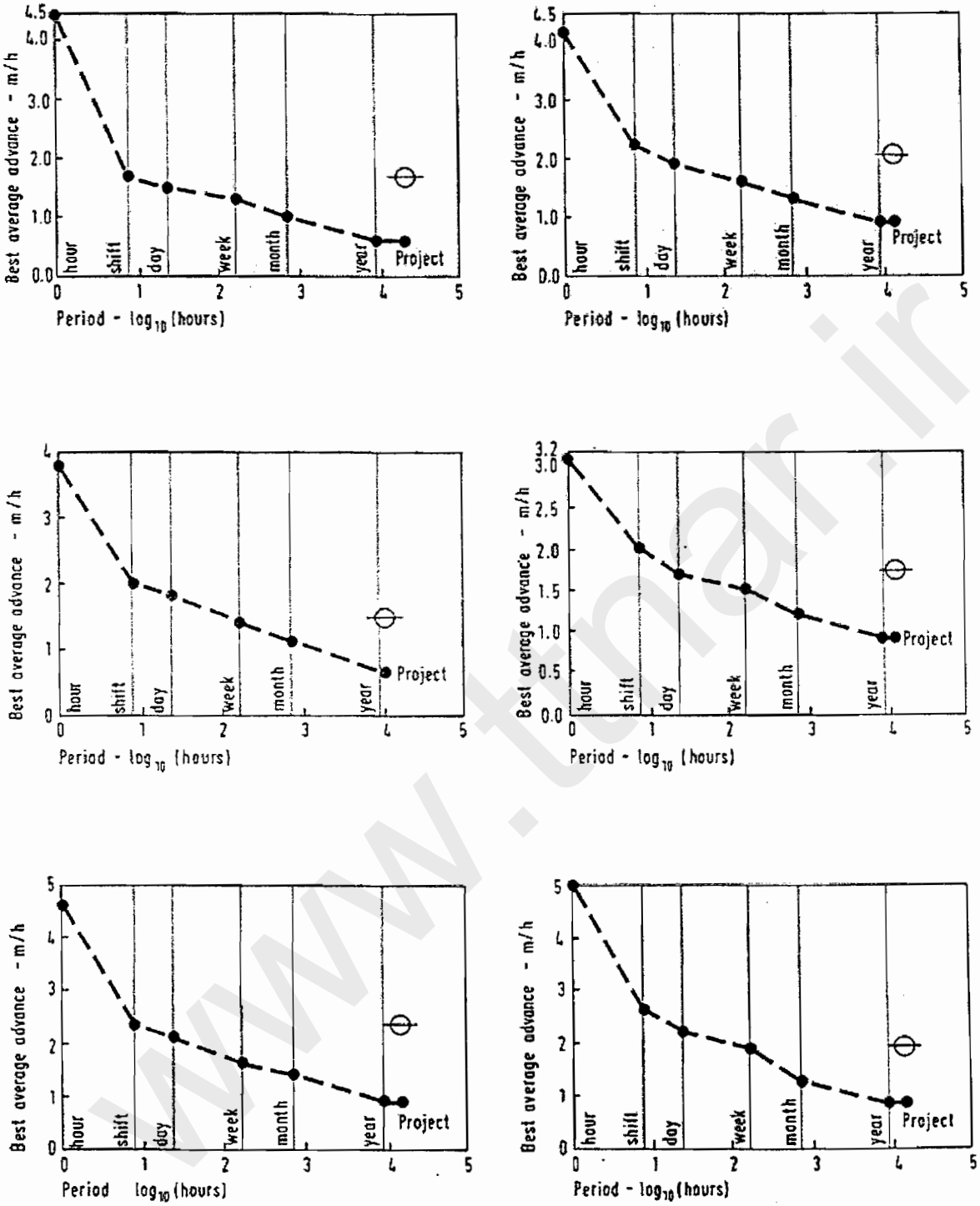
شکل ۳-۱۹- تغییرات سرعت نفوذ متوسط حجمی برای قطرهای مختلف تونل برای محدوده‌های گوناگون مقاومت سنگ

www.tunar.ir



شکل ۳-۲۰- بهترین سرعت پیشروی برای ۱۲ تونل از تونلهای مطالعه‌شده
توسط CIRIA

www.tunar.ir



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

www.tinar.ir

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

قبلا ملاحظه شد که شاخص Q بصورت زیر تعریف میشود:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times (\frac{Jr}{Ja}) \times \frac{J_w}{SRF}$$

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

$$Q_0 = \frac{RQD_0}{J_n} \times (\frac{Jr}{Ja})_c \times \frac{J_w}{SRF}$$

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 تقریبا ۱۰۰ متر نرمال شده است.

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

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

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

m از رابطه زیر حساب می شود:

www.tnar.ir

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

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 می‌گردد:

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

مثال عملی:

در این قسمت، اطلاعات ورودی (صفحه I) و محاسبات مربوط به پیش‌بینی عملکرد (صفحه II) برای حالتی فرضی مربوط به تونلی به طول ۱۶ کیلومتر دارای طول‌های مساوی (۴ کیلومتر) ازماسه سنگ (توده‌ای، ساینده)، فیلیت (با درزه‌داری ایده‌آل)، میکاشیست (با درزه‌داری ایده‌آل) و گرانیت (توده‌ای و خیلی محکم) ارائه شده‌است. روش Q_{TBM} سرعت های پیشروی بسیار مناسب را برای فیلیت و شیست و سرعت های پیشروی ضعیفی رابرای ماسه سنگ و گرانیت برآورد می‌کند.

صفحه I- اطلاعات ورودی

الف- پایداری (و گرادیان اولیه m_1)

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times (\frac{Jr}{Ja})_s \times (\frac{J_w}{SRF})$$ (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)

$$Q_0 = (\frac{RQD}{J_n}) \times (\frac{Jr}{Ja})_c \times (\frac{J_w}{SRF})$$ (موثرترین ابزار برش)

www.tinar.ir

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)

$$SIGMA_{cm} = 5\gamma Q_c^{\frac{1}{3}} \rightarrow Q_c = Q_0 \times \frac{\sigma_c}{100} \qquad SIGMA_{tm} = 5\gamma Q_t^{\frac{1}{3}} \rightarrow Q_t = Q_0 \times \frac{I_{50}}{4}$$

ناحیه	γ	σ_c	Q_c	$SIGMA_{cm}$ (MPa)	I_{50}	Q_t	$SIGMA_{tm}$ (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 ⊥				⊥ یا ∥		

د- Q_{TBM}

$$Q_{TBM} = Q_0 \times \frac{SIGMA}{F^{10}/20^9} \times \frac{20}{CLI} \times \frac{q}{20} \times \frac{\sigma_\theta}{5} \qquad (\times 20^9 / F^{10} = 0.0054 \text{ با ۲۰ tnf/(برش دهنده})$$

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)

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

www.tunar.ir

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

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

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

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

ناحیه	$L(m)$	m	$(\frac{1}{1+m})$	$T(hr)$	$T \times AR = L^*$	حداکثر ۸۷۳۶ ساعت در سال فرض میشود
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
	$\sum L = ۱۶۰۰۰$m				$\sum T = ۵۲۳۹۳$ ساعت	۶ سال

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

www.ttnar.ir

و- عملکرد کلی

PR (متوسط وزنی), ΣL, ΣT

$$\overline{PR} = (\frac{PR_1L_1 + PR_2L_{2+...}}{L_1 + L_2 + ...})$$

$$\overline{AR} = (\frac{PR_1L_1 + PR_2L_{2+...}}{L_1 + L_2 + ...})$$

نواحی	$\sum L(m)$	$\sum T(hr)$	$\overline{PR}$	$\overline{AR}$
۴و۱،۲،۳	۱۶۰۰۰	۵۲۳۹۳	۶۳۶۰۰/۱۶۰۰۰=۳.۹۸	۷۲۸۰/۱۶۰۰۰=۰.۴۶

ی- سرعت پیشروی در انتهای پروژه

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

نواحی	$\overline{m}$	$\overline{PR}$	$\overline{AR}$	AR (انتها)
۴و۳،۲،۱	۰.۲۴۵	۳.۹۸	۰.۴۶	۰.۲۸

حفاری ایده آلی که برای فیلیت و شیست پیش بینی شده است به وضوح امتیاز بزرگ حفاری با TBM را نشان می‌دهد. در این مثال، با ماسه سنگ و گرانیت، 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 قبلا ذکر شد هر کدام از این TBMها 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:

www.tunar.ir

الف – وضعیت زمین‌شناسی و ژئومکانیکی مسیر تونل:

- وضعیت توده سنگ از نظر میزان درزه و شکاف، و زمان خود پایداری تونل
- وضعیت آب‌های زیرزمینی
- وضعیت تنش‌های برجا و امکان وجود شرایط فشارندگی (squeezing conditions)
- مقاومت فشاری تک محور سنگ (UCS)
- قدرت ساینده‌گی 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 جنبه‌های 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 پیش‌گمانه‌زنی (probe drilling)

۳-۲-۷ مزایا و معایب TBM

مزایای استفاده از TBM را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

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

www.ttnar.ir

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.

۳-۲-۸ 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

www.ttnar.ir

۳-۳ حفاری با کله‌گاوی (roadheader)

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

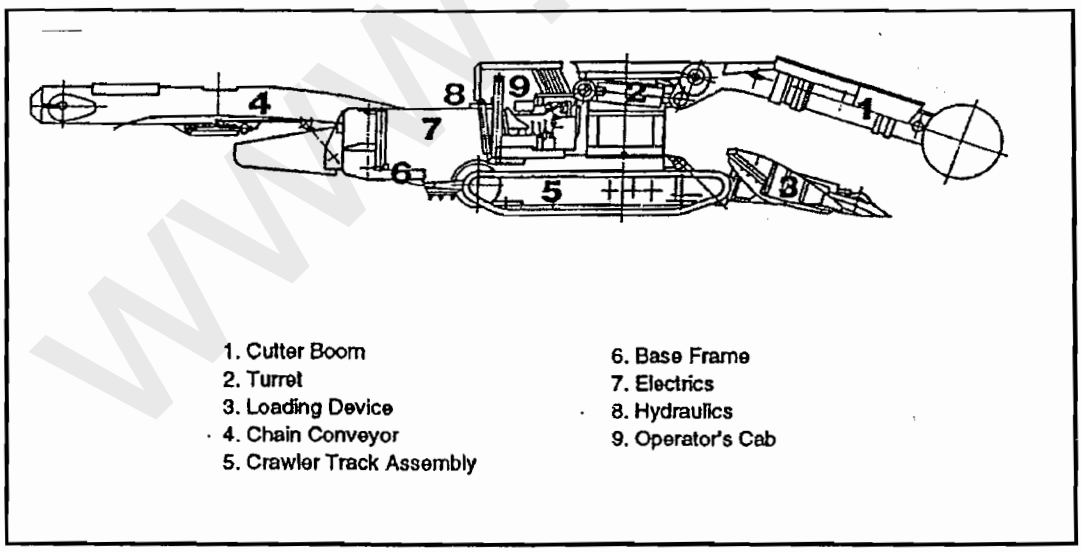
- تاج حفار
- بازوی هیدرولیکی که تاج حفار را به محل مورد نظر می‌رساند (۱)
- بخشی برای ایجاد امکان حرکت افقی کلگی (۲)
- بخش بارگیری (۳)
- تسمه نقاله برای انتقال مواد حفاری شده (۴)
- اتاقک اصلی که دارای کنترل های الکتریکی و هیدرولیکی و کابین اپراتور است (۶)
- وسیله حرکت روی آن که اغلب چرخ زنجیری است(۵)

بطور کلی دو نوع کله‌گاوی وجود دارد:

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

۲-کله‌گاوی از نوع تاج طبلکی (drum type cutting head)

در کله گاوی تاج‌مخروطی، تاج حفار حول محوری موازی با بازوی حفاری (boom) می‌چرخد و در کله‌گاوی تاج طبلکی، تاج حفارحول محوری عمود بر بازو دوران می‌کند (شکل ۳-۲۲ و ۳-۲۳).



شکل ۳-۲۱- اجزای یک دستگاه کله‌گاوی

۳-۳-۱ تاریخچه دستگاه‌های کله‌گاوی

ابداع دستگاههای کله‌گاوی به طور مشخص در دهه ۱۹۴۰ در اروپا صورت گرفت. تا دهه ۱۹۵۰ انواع قابل توجهی از دستگاههای کله‌گاوی 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 کله‌گاوی مدل PK3 روسی در سال ۱۹۶۱ در انگلستان شد.

در سالهای اخیر، توجه قابل ملاحظه ای بر افزایش ظرفیت انواع دستگاههای کله‌گاوی 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 دستگاههائی گردیده است.
دستگاههای کله‌گاوی به عنوان یک دستگاه تونلسازی، انعطاف پذیری و قابلیت جابجائی خوبی در شرایط مناسب را دارا می‌باشند.

با ابداع دستگاههای کله‌گاوی سنگین‌تر، 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 کله‌گاوی در انگلستان که دارای وزنی بین ۲۱/۵ تا ۸۰ تن می‌باشند، برای حفر سنگهائی 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

۳-۳-۲ قدرت و وزن دستگاههای کله‌گاوی

انعطاف پذیری عملیاتی، قابلیت حفر مقاطع تونل باشکلهای مختلف و قابلیت مانور آن برای ایجاد تقاطعها از جمله خصوصیات اصلی دستگاههای کله‌گاوی 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 سرمته‌ها و اغلب خود دستگاه می‌شد. در انواع دستگاههای سنگین کله‌گاوی (۹۰ تن به بالا) تمام قسمتها از ساختار پیشرفته‌تر 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 سخت‌تر توسط این دستگاهها از جنبهٔ اقتصادی توجیه یافته است.

یک دستگاه کله‌گاوی در انگلستان برای حفر سنگهائی با مقاومت بالای ۱۰۰ مگاپاسکال که در بعضی شرایط به ۲۰۰ مگاپاسکال می‌رسید، بکار گرفته شد که دارای وزن ۱۵۰ تن، توان تاج حفاری ۲۲۵ کیلووات و گشتاور خروجی ۳۱۲ کیلونیوتن- متر بوده‌است.

۳-۳-۳ مبانی برش دستگاه های کله‌گاوی طبلکی و مخروطی

دستگاههای کله‌گاوی طبلکی عمل حفاری را بصورت شخم زدن (ripping) و کله‌گاوی مخروطی حفاری را بصورت سایشی (milling) انجام می‌دهد. در انگلستان تقریباًکلیه دستگاههای کله‌گاوی مورد استفاده از نوع مخروطی می‌باشند. در آلمان ۶۵٪ از نوع مخروطی و ۳۵٪ از نوع طبلکی و در آمریکا، کانادا و مکزیک ۷۵٪ از نوع طبلکی هستند.

سیستم برش نوع مخروطی:

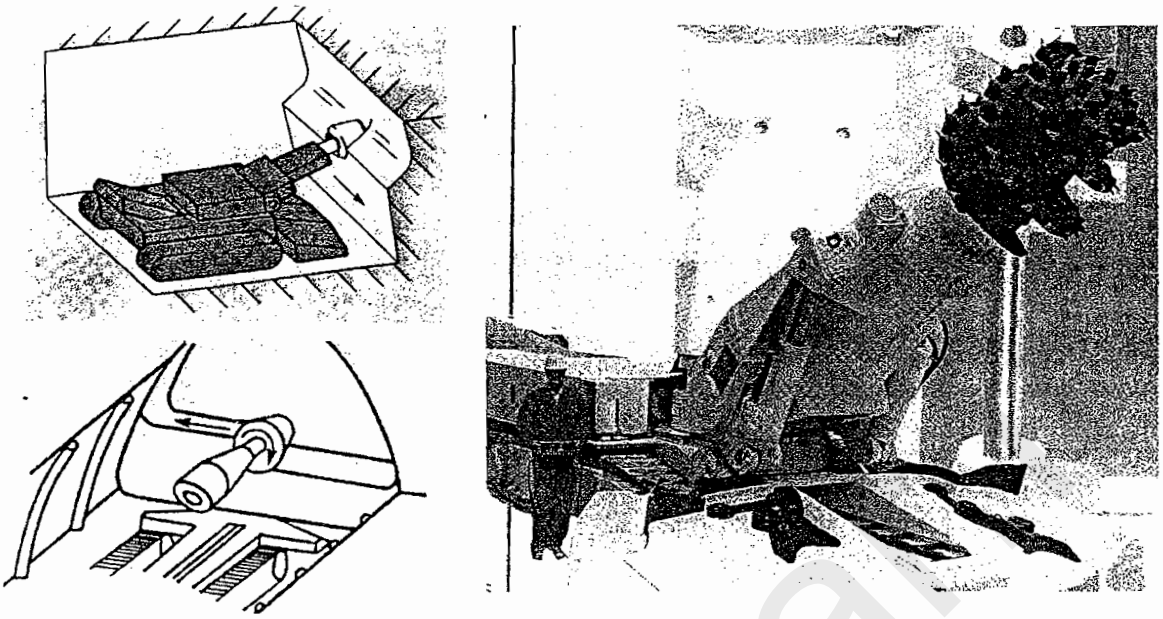
معمولترین شکل تاج حفاری در دستگاههای کله‌گاوی، مخروطی است که حول محوری در امتداد محور بازوی دستگاه دوران می‌کند. طرح تاج برشی مخروطی و موقعیت و جهت نصب آن برروی بازو بگونه‌ای است که در موقعیت بهینه جهت اعمال حداکثر نیروی برشی بر جبهه کار تونل قرار گیرد. به همین دلیل این نوع دستگاههای کله‌گاوی توانسته اند قابلیت اجرائی پذیرفته شده‌ای 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 طبلکی، 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 می‌شود.

سیستم برش نوع طبلکی:

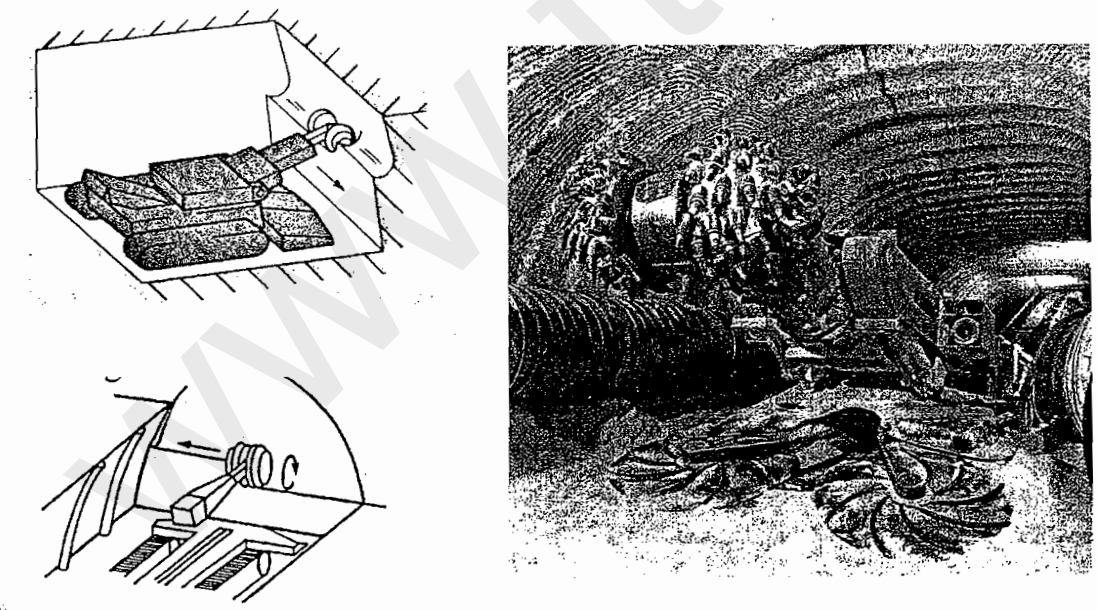
مکانیزم برش شخم زدن یا برش نوع طبلکی به طور گسترده ای در دستگاههای استخراج پیوسته (continuous mining machine) برای برش شرایط سنگی نسبتاً ضعیف همچون جبهه کارهای ذغالسنگی یا انواع مختلفی از سنگهای رسوبی پذیرفته شده است. بطور کلی برای شرایط‌سنگی سست، این مکانیزم برش سرعت برش خوبی به دست می‌دهد. دستگاههای حفار طبلکی ۲۰ تا ۳۰ در صد 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 می‌باشد و سیستم برش نوع مخروطی در این گونه موارد موثرتر و کاراتر از سیستم برش نوع طبلکی می‌باشد.

ویژگیهای اصلی سیستم برش نوع طبلکی عبارت است از توانائی 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.

www.ttnar.ir



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



شکل ۳-۲۳- نمونه یک دستگاه کله‌گاوی با تاج حفارطبلکی و نحوه حفاری آن

۳-۳-۴ ابزار برش

با توسعه و پیشرفت ابزار برش به منظور بر آوردن نیازها و همپائی با پیشرفت دستگاههای کله‌گاوی 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 می‌باشد. این امر باعث افزایش عمر و کارایی سرمته‌ها و در نتیجه افزایش زمان بین تعویض سر مته‌ها می‌شود.

سر مته های شعاعی بزرگ:

مهمترین ویژگی این سر مته‌ها دسترسی به راندمانهای بالای برش همراه با کاهش میزان گرد و غبار می‌باشد اندازه بزرگ این سرمته‌ها، کاربرد آنها را در شرایط سنگی سست تا متوسط، مطلوب می‌سازد. کاربرد سر مته‌های شعاعی بزرگ در سنگهای سخت، می‌تواند موجب وارد آمدن سریع خسارت به سرمته و کاهش راندمان برش و بروز لرزشهای شدید در دستگاه شود.

سر مته های جلوبر:

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

۳-۳-۵ توانایی برش دستگاه کله‌گاوی

تجارب حاصل در انگلستان نشان می‌دهد که دستگاههای کله‌گاوی قادر به حفر سنگها بادامنهٔ مقاومتی متفاوت هستند، لیکن ضعفهای ساختاری در سنگ نظیر درزه ها و صفحات لایه‌بندی می‌توانند محدودیتهائی در جریان حفر به وجود آورند. مطالب کلی در مورد توانائی برش دستگاه کله‌گاوی در جدول۳-۷ آورده شده است.

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

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

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

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

۳-۳-۶ کنترل دستگاه‌های کله‌گاوی

تجارب حاصل از کار با دستگاههای کله‌گاوی در معادن ذغالسنگ انگلستان نشان داده است که محدودیت عمده ناشی از مشکل تطبیق قابلیتهای دستگاه با شرایط متغیر لایه ها بوده است (بعنوان مثال کنترل میزان نیروی وارد بر سطح سینه کار با توجه به تغییر مقاومت لایه ها). عملکرد دستگاه در این گونه موارد، بستگی زیادی به مهارت اپراتور دستگاه دارد. برشهای کم عمق همراه با نفوذ محدود و نرخ بالای سایش سرمته 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 سرمته‌ها و تاج حفار و همچنین لرزش دستگاه شود.

طراحی به وسیله کامپیوتر (CAD) کمک مهمی برای کله‌گاوی بویژه از جنبه طراحی تاج حفار و جانمائی، فاصله داری و نحوه قرارگیری (positioning) بهینه سرمته‌ها بوده است. پیشرفتهای حاصله در زمینه هیدرولیک و میکروالکترونیک محدودهٔ 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 شدهٔ 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 عمومی‌شده 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 (AlpineMiner Tunneller) برای روش NATM طراحی و ساخته شده است. ویژگی مهم این دستگاه قابلیت حفر تونلهائی باسطح 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 شدهٔ 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، راکبولت، و بتن پاشی) انجام می‌گرفت.

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

توسعه و پیشرفت دستگاهها 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 نتیجتا، سرعت پیشروی با این دستگاهها بالا می‌رود. این نوع دستگاه برای حفر تونلهائی با سطح چهارگوش مناسب‌تر می‌باشد.

تونل روزنبرگ (Rosenberg) در سویس، 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

www.tiran.ir

دستگاههای تونلسازی از جنبهٔ قابلیتهای اجرائی حفر در شرایط زمین شناسی مختلف مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. یکی از ویژگیهای مهمی‌که 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 کله‌گاوی متمرکز بوده است.

آزمایشهای لازم برای تعیین ویژگیهای حفر سنگ:

آزمایشهای لازم برای تعیین شاخصها و ویژگیهای رفتاری سنگ در برابر برش مبتنی برتستهای 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 اندازه گیری توان مصرفی در حالتهای مختلف برش به وسیلهٔیک دستگاه کله‌گاوی شرکت Dosco صورت گرفت، توان جذب شده توسط دستگاه و سرعت حفر برای هریک از حالتهای مختلف برش و برای انواع مختلف سنگها اندازه گیری شد. عوامل و پارامترهای زیر پس از این مطالعات بری ارزیابی عملکرد برش ارائه گردید:

شاخص شکست (break index):

این شاخص تعیین کنندهٔ تعداد متوسط صفحات ناپیوستگی (درزه ها، صفحات لایه بندی،ترکها و غیره) در هر متر از هر لایهٔ 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:

ضریب تغییر شکل = (Rc –Ri) /Rc

Rc = مقدار ثابت جهش بعد از ۲۰ آزمایش

Ri= 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 مادهٔ سنگ، مشخصات دستگاه، مشخصات تونل و شرایط عملیاتی قراردارد.

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.

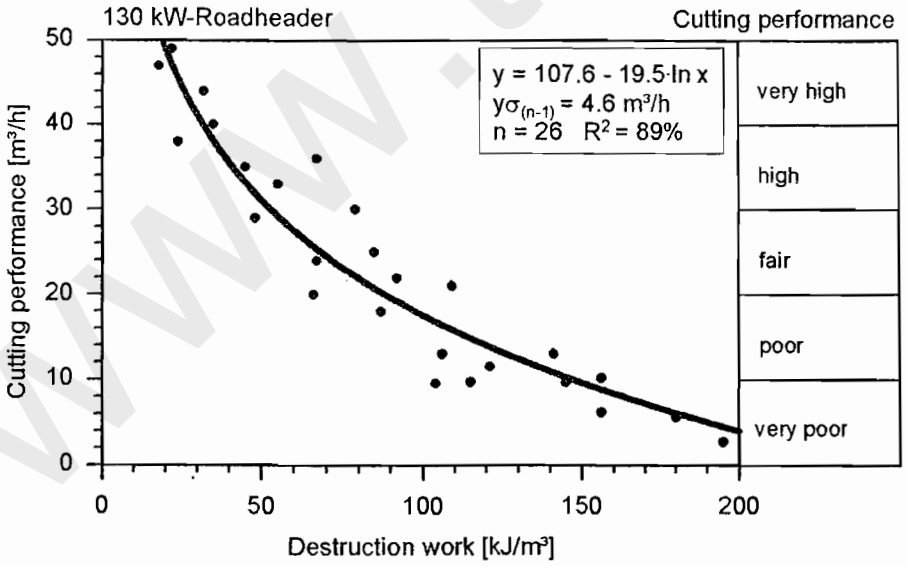
۳- ترکهای باز یا دیگر ضعفهای طبیعی در ساختار سنگ به میزان زیادی بر عملکرد برش تاثیر می‌گذارد.

www.tunar.ir

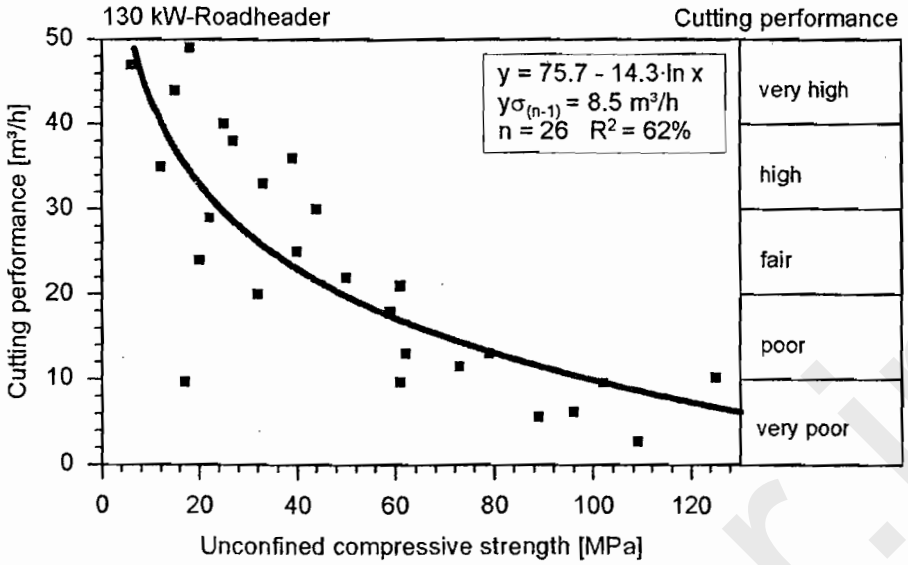
۴ـ با افزایش نرخ حفر، انرژی ویژه کاهش می‌یابد.
۵- مطالعات نشان داده‌است که با برنامه ریزی درست حرکات بازو می‌توان افزایش راندمان را انتظار داشت. تفاوتهای راندمان برش در هر یک از حرکات چهارگانه بازو شامل فرو روی (sumping)،حرکت عرضی (traversing)،زیربری (undercutting)،روبری (overcutting) نشان می‌دهد که با برنامه ریزی و اجرای دقیق مراحل برش می‌توان به بهره‌وری بسیارخوبی از عملکرد برش‌دست یافت. شرایط لایه بندی و نوع سنگها نیز در دامنهٔ 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-تغییرشکل (stress-strain) نشان دهنده انرژی یا کار لازم برای گسیختگی نمونه سنگ می‌باشد. کار تخریبی ویژه (یا به اختصار کار تخریبی) بعضا 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 کله‌گاوی 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

۳-۳-۱۰ حفر تونل با چکشهای ضربه ای هیدرولیک

چکشهای دستی هوای فشرده بنحو گسترده ای در عملیات احداث تونل به کار گرفته شده اند وحتی 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 دهۀ ۱۹۶۰برمی‌گردد که این تکنیک در تونلهای بزرگ متعددی به کار گرفته شد. چکشهای ضربه‌ای هیدرولیک ابتدا در راهسازی و خرد کردن بتن و سپس به عنوان روش حفر و خرد کردن سنگ در معادن کاربرد عمومی یافتند.

چکشهای هیدرولیکی۳ تنی با قدرت اعمال انرژی ضربه ای در حدود ۶۰۰۰ ژول کاربرد زیادی در حفر سنگ از جمله در تونلسازی پیدا کرده‌اند. چکش بر روی یک بازوی هیدرولیک مناسب و این مجموعه بر روی یک شاسی متحرک معمولاًریلی نصب می‌شود.

مزایای اصلی این نوع روش حفر تونل عبارتند از :

۱-در این روش نیازی به چالزنی و آتشباری جبهه کار تونل نیست.

۲-سنگ خرد شده را می‌توان 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 موادخرد شده با تقریبا 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. درسنگهای 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 محدودهٔ 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 ۲. ۱کیلومتر 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، ۸-۷ متر تونل حفر و نگهداری شد و بار بری 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 بار گیری 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 ارژیلیتی به‌شدت چین خورده وگسله حفر شد. عملیات در چهار سیکل و با نرخ پیشروی ۱۰ متر در ۲۴ ساعت انجام گرفت. عملیات حفر و بار گیری همزمان انجام می‌شد.

۳-۳-۱۱ ملاحظات دیگر

۱- دستگاههای کله‌گاوی دارای انعطاف پذیری خوب در عملیات و توانائی برش تونلها با شکلهای مختلف، علاوه بر قابلیت مانوردهی بالا درحفر 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 می‌توان در ابتدا اقدام به حفر این باندهای سست نمود. در نتیجه این عمل امکان آزاد شدن تنش و ضعیف شدن سایر لایه های تشکیل دهندهٔ جبهه کار را فراهم می‌آورد که پس از آن می‌توان آنها را بسرعت حفر کرد.

۳- استفاده از آبفشان یا جت آب با فشار بالای ۷۰۰ بار می‌تواند کاهش عمده ای در نیروهای برشی سرمته ایجاد کند.

۴ـ توسعه و به بازار آمدن دستگاههای کله‌گاوی سنگین در عین حالی که ویژگیهای اصلی برش و عملکرد مؤثر سرمته را از طریق طراحی خوب تاج حفار حفظ کرده است، توانائی برش انواع سنگهای سخت‌تر را افزایش داده است.

۵ـ دامنهٔ کاربرد دستگاههای حفاری بازوئی در شرایط سنگی سخت، بنحو فزاینده‌ای افزایش یافته است. این امر توسعهٔ انواع سنگین دستگاهها و در نتیجه افزایش قابل ملاحظهٔ بکارگیری چنین دستگاههای تونلسازی را موجب شده است.

۶ـ مزایای حاصل از کاربرد CAD در تاج حفار دستگاههای کله‌گاوی به طور عمده عبارتند از: توانائی طراحی برای عملکرد بهتر برش، توزیع بهتر بار بین سرمته‌ها، همراه با کاهش عمده میزان لرزش.

۷ـ 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 کاسته‌اند.

۸-ظهور دستگاههای کله‌گاوی سنگین بسرعت مشخص کرد که سرمته‌های برشی در زنجیرهٔ توسعه از رشدی همپای دستگاههای حفار برخوردار نبوده‌اند.

۹ـ هدایت اتوماتیک دستگاههای کله‌گاوی 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 می‌دهد تونل سطح مقطع کافی داشته باشد. این روش برای شرایط زمین شناسی که سنگها درزه‌دار باشند، روش مناسبی است.

www.tnar.ir

از مدتها پیش نیاز به دستگاهی ارزان، سبک و متحرک برای حفر و نگهداری فضاهائی با هر شکل مقطعی احساس می‌شده است. دستگاههای کله‌گاوی در ترکیب با سپرهای تونلسازی تا حد زیادی به این نیاز پاسخ داده‌اند.

۳-۳-۱۲ مقایسه کله‌گاوی‌های تاج حفار مخروطی و تاج حفار طبلکی

تحلیل بردارهای سرعت سرمته:

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

در تاجهای مخروطی دوران حول محور بازوی دستگاه انجام می‌شود، بنابراین صفحه گذرنده از دو بردار مذکور عمود بر محور بازوی دستگاه می‌باشد. در تاجهای طلبکی محور چرخش تاج عمود بر محور بازوی دستگاه بوده و بردار سرعت چرخشی و سرعت برشی، بردار سرعت منتجه‌ای را بوجود می‌آورند. 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 کله‌گاوی می‌باشد. به همین دلیل کله‌گاوی‌هایی که توان حفر بیشتری دارند، به منظور افزایش نیروی اصطکاک باید از وزن بالاتری نیز برخوردار باشند.

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

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

بطور کلی در فرایند حفر مقدار انرژی که از طریق هر یک از سرمته‌ها می‌توان منتقل نمود، به دو عامل عمده سختی سنگ و پایداری (stabillity) 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 لرزش های شدید)، در مواجهه با نیروهای قوی عکس العمل سنگ، سبب تخریب قطعات مختلف کله‌گاوی 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 قبلا ذکر شد کله‌گاوی‌های تاج طبلکی 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 ملاحظه ای افزایش داد.

مقایسه مشخصات فنی

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

جدول ۳-۸- مشخصات دو نوع کله‌گاوی تاج مخروطی و تاج طبلکی

مشخصات	کله‌گاوی تاج مخروطی	کله‌گاوی تاج طبلکی
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 پائین	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)

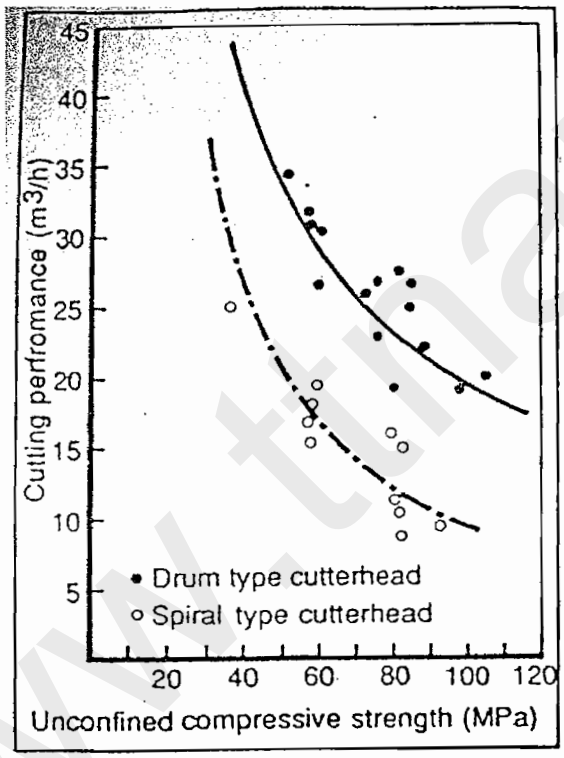
مقایسه عملکرد کارگاهی

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

www.tunar.ir

در شکل ۳-۲۶ عملکرد حفاری (cutting performance) کله‌گاوی تاج‌مخروطی و تاج‌طبلکی در سنگ‌های با مقاومت فشاری تک‌محوره مختلف نشان داده‌شده‌است. مشاهده می‌شود عملکرد حفاری کله‌گاوی تاج‌طبلکی بطور قابل ملاحظه ای بیشتر از کله‌گاوی تاج مخروطی می‌باشد، که با افزایش مقاومت فشاری سنگ این اختلاف زیادتر می‌شود.

بنابراین به طور مثال برای مقاومت فشاری تک محوری ۸۰ مگاپاسکال، توان حفر کله‌گاوی تاج طبلکی ۲۳ متر مکعب بر ساعت و توان حفر کله‌گاوی تاج مخروطی ۱۲ متر مکعب بر ساعت بدست خواهد آمد که نسبت به یکدیگر حدود ۱۰۰٪ اختلاف دارند.



شکل ۳-۲۶- عملکرد حفاری در سنگ‌های با مقاومت فشاری مختلف

استهلاک سرمته: مقدار استهلاک سرمته یا مصرف ویژه سرمته (specific pick consumption) برحسب تعداد سرمته بر مترمکعب حفاری در دو نوع دستگاه مذکور، در منحنی‌های شکل ۳-۲۷ نشان داده‌شده‌است. این منحنی‌ها از روابط زیر پیروی می‌کنند:

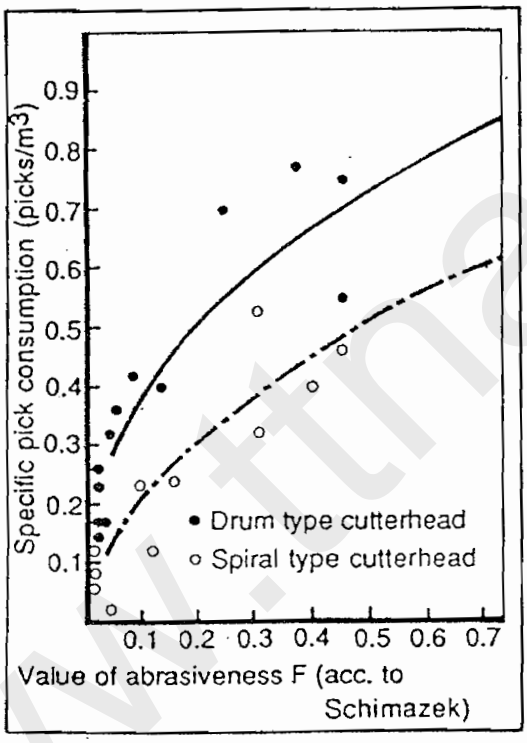
تاج حفار طبلکی $Cp = 0.76.\ F^{0.39}$

تاج حفار مخروطی $Cp = 0.96.\ F^{0.56}$

F= مقدار سختی سایشی در مقیاس شیمازک (Schimazek)

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

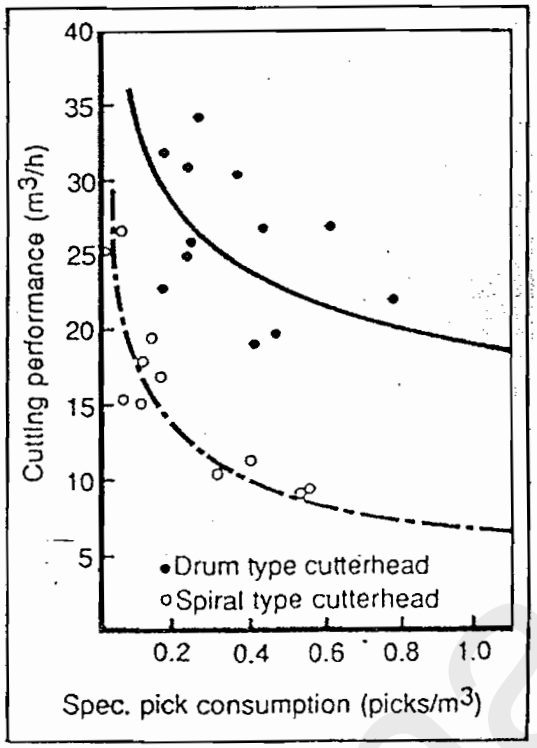
مصرف سرمته اصولا باید در ارتباط با عملکرد حفاری بررسی شود (شکل ۳-۲۸). همانطور که از این شکل ملاحظه می‌شود، برای یک مصرف ویژه معین، عملکرد کله‌گاوی تاج طبلکی بیش از دو برابر عملکرد کله‌گاوی تاج مخروطی می‌باشد.



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

در کله‌گاوی‌های دارای تاج طبلکی، 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.

www.ttnar.ir



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

شکل دهی مقطع طولی تونل:

صاف بودن جداره تونل عامل مهمی‌در 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 کله‌گاوی های 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

www.tunar.ir

ـ کارآیی سیستم آب پاش

از آنجا که تاج های طبلکی 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 می‌باشند. در چنین ساختارهایی لایه مختلف از نظر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی و ضخامت تنوع زیادی هستند. این لایه ها عموما 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 می‌تواند برای کله‌گاوی‌ها مشکل‌آفرین، و باعث کاهش سرعت حفر، شود.

به علت شکل مخروطی تاج، بازوی کله‌گاوی‌های تاج مخروطی در همه قسمتهای سینه کار با انعطاف پذیری بسیار خوبی کار می‌کند. بنابراین با استفاده از برش لایه های نرم‌تر، سطح اتکای لایه‌های مقاومتر را از بین برده، و باعث سهولت در حفر بخشهای مقاوم می‌شود. اما قابلیت انعطاف در کله‌گاوی‌های تاج طبلکی 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 کله‌گاوی‌های تاج مخروطی قابلیت بالاتری دارند.

شکل ۳-۲۹- نمونه آبفشان در کله‌گاوی‌ها

۳-۳-۱۳ ابداع و توسعه تکنولوژی آبفشان در کله‌گاوی‌ها

استفاده از آبفشان در افزایش توان حفر کله‌گاوی‌ها 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 کله‌گاوی، کاهش استهلاک ابزاربرش و کاهش خطرات احتمالی آتش سوزی می‌شود. آبفشانها را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم کرد :

نسل اول، آبفشان کم فشار:

برای مدت ده سال پس از ابداع آبفشان این نوع از آبفشان ها در کله‌گاوی‌های انگلیسی مورد استفاده قرار می‌گرفت. فشار آب در این نوع به حدود ۴۰ بار می‌رسید و بطور عمده سبب کاهش گرد و غبار و خنک کردن ابزاربرش و در نتیجه افزایش عمر آنها می‌شد

نسل اول آبفشانها تاثیر قابل توجهی در افزایش قدرت حفر کله‌گاوی‌ها نداشت. این آبفشانها آب را به جلوی ابزاربرش می‌پاشیدند و از این جهت در کنترل جرقه های پشت ابزاربرش و خطرات آتش سوزی (در سنگهای دارای گاز) ناتوان می‌نمود.

نسل دوم، آبفشان فشار متوسط:

در این نوع آبفشانها فشار آب بین ۲۰۰-۱۵۰ بار می‌باشد. شرکت‌های Voest-Alpine در اتریش و Gmbh در آلمان، سیستمی‌را ابداع کرده‌اند که در آن آبفشان دارای یک شیر قطع و وصل بر سر مسیر آب می‌باشد که بر روی پایه ابزاربرش سوار، و هر گاه نوک ابزاربرش با سنگها برخورد می‌کند این شیر باز شده، و عمل پاشش آغاز می‌شود. به این ترتیب از خروج آب اضافی غیر از زمان درگیری ابزار برش با سنگ جلوگیری به عمل می‌آید. مقدار مصرف آب در این سیستم به ازاء هر ابزاربرش حدود ۶۰-۴۰ لیتر بر دقیقه می‌باشد.

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 ضربه‌ای قیمتی معادل ۲۹۵ دلار داشت بنابراین قیمت تاج حفار یک کله‌گاوی(Alpine Miner) AM100 با ۱۹۸ قطعه ابزاربرش آبفشان دار، معادل ۱۱۴۰۰۰ دلار می‌شد، بدون اینکه افزایش قابل توجهی در قدرت حفر کله‌گاوی بدست آمده باشد.

نسل سوم، آبفشان فشار قوی:

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

۱ـ کاهش گرد و غبار و خطرات آتش سوزی (در توده های دارای گاز متان)

۲ـ کاهش استهلاک ابزاربرش

www.tunnel.ir

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

برای بررسی موارد فوق دو طرح مورد ارزیابی قرار گرفت، اولین طرح درآمریکا (Bruceton, Pennsylvania) با استفاده از یک کله‌گاوی تاج طبلکی 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 می‌شد. این آبفشان نرخ حفاری را تا ۲ برابر افزایش داده و باعث کاهش گرد و غبار تا ۷۰٪ و به میزان ۲ میلی‌گرم 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 می‌شود. همچنین این تحقیقات نشان‌می‌دهدکه با استفاده از جت آب در ابزاربرشی مخروطی می‌توان تا حدود ۶۰٪ از نیروی نرمال ابزاربرش کاست.

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

طرح دیگری که مورد بررسی قرار گرفت در سنگهای آهکی (Middleton, Derbyshire) در انگلیس توسط یک کله‌گاوی تاج مخروطی Dosco MK2A (در رده کله‌گاوی‌های سبک) با قدرت موتور ۴۸/۵ کیلو وات، مجهز به یک آبفشان با فشار ۷۰۰ بار بود. تاج حفار این کله‌گاوی با ۹ آبفشان با دبی ۴ لیتر بر دقیقه برای هر افشانه، تجهیز شده بود. در شرایط معمول کله‌گاوی Dosco MK2A برای کار در سنگهایی با مقاومت کمتر از ۷۰ مگاپاسکال مناسب می‌باشد، اما با نصب این آبفشان کله‌گاوی 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 می‌گذرد) نیز مشاهده می‌شد.

www.tunar.ir

با توجه به بررسی های انجام شده بر روی کله‌گاوی های آبفشان دار (تا فشار ۷۰۰ بار) مشاهده می‌شود 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 می‌یابد به طوری که در فشار ۹۰ بار تا حدود ۵۰٪ از گرد و غبار کاسته می‌شود. مقدار مصرف ابزار برش نیز بسیار کمتر می‌شود.

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 می‌گیرند.

در آزمایشگاههای تحقیقاتی وسایل و تجهیزات مختلفی برای شبیه سازی آبفشانها مورد استفاده قرار می‌گیرند. 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 می‌شود و در همان حین پارامترهای مورد نظر اندازه گیری و ثبت می‌شوند.

ذیلا نتایج حاصل از اینگونه آزمایشات مورد بررسی قرار می‌گیرد :
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 می‌یابد، بنابراین می‌توان با کم کردن سرعت خطی ابزار برش گامی‌در 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 می‌باشد. بنابراین با خنک نگه داشتن دمای ابزاربرش کمک موثری در تقلیل استهلاک ابزاربرش می‌شود.

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 می‌یابد. 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 می‌باشد. لازم به ذکر است که عامل اصلی ایجاد ترک و شکست در ابزاربرش نیز همان نیروهای قائم هستند. مشابه این آزمایش آزمایشهایی 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 می‌باشند. فشار آبی که توسط آبفشان به این قطعات وارد می‌شود سبب جابجایی آنها و در نتیجه سهولت در فرآیند حفر می‌شود. با در نظر گرفتن مکانیزم شکست می‌توان تاثیر آبفشان در تقلیل نیروهای وارد بر ابزاربرش و افزایش راندمان حفر را با دلایل زیر توصیف نمود :

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

۲ـ 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 می‌شود. 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 می‌شود سبب جابجایی آنها و در نتیجه سهولت در فرآیند حفاری می‌شود.

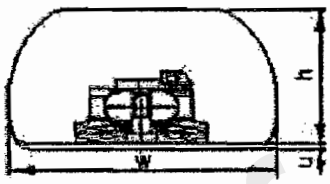
۳-۳-۱۵ شرکت‌های اصلی سازنده کله‌گاوی

از شرکت‌های متعددی که در ساخت دستگاه‌های کله‌گاوی فعالیت دارند شرکت‌های زیر را می‌توان نام برد:

- Voest Alpine
- Paurat
- Dosco
- Eickoff

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

جدول ۳-۹- مشخصات کله‌گاوی‌های تولیدی توسط شرکت Eickoff

type	performance	total performance instalated	weight	dimensions (approx. in mm)					
	kW	kW	tons	length	width	heigth	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

www.tinar.ir

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 اگزوز وسایل نقلیه هنگام بهره برداری عادی و کنترل دود و گازهای گرم در مواقع اظطراری 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 معمولا برای حفاری با TBM در سنگ ترجیح داده می‌شود زیرا گرد و غبار تولید شده که از طریق گردگیر (dust collector) گرفته نشده‌است 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 معمولا 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 می‌شود. در صورت استفاده از ماشین‌آلات دیزلی، به ازای هر اسب بخار (brake horse power)، ۲/۸ مترمکعب در دقیقه هوای تازه مورد نیاز می‌باشد. معمولا وقتی چند دستگاه با هم کار می‌کنند تمام آنها بطور همزمان از حداکثر توان خود استفاده نمی‌کنند، بنابر این می‌توان این موضوع را در برآورد هوای لازم بنحوی لحاظ کرد. بعضی آیین‌نامه‌ها بر اساس میزان مواد آلاینده موجود در تونل، هوای تازه مورد نیاز را تعیین می‌کنند. خصوصیات گازهای مختلف و تاثیر فیزیولوژیکی آنها بر روی افراد شاغل در تونل در جدول ۴-۱ ذکر شده‌است.

طبق آیین‌نامه‌های اخیر بهداشت و ایمنی مقدار گرد و غبار در تونل باید در سطح پایینی نگه‌داشته‌شود. چالزنی توام با استفاده از آب (wet drilling) و پاشیدن آب به مواد حفاری شده پس از آتشباری الزامی می‌باشد. در مورد TBM گرد و غبار تا حد زیادی توسط سپر گرد و غبار (dust shield) به سینه کاری محدود می‌شود که از آنجا به گردگیر (dust collector) منتقل می‌گردد.

www.ttnar.ir

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 معمولا ۲۰.۹۳ ٪ O_2 دارد	برای نگه داشتن سلامتی نرمال حداقل ۲۰ درصد لازم است .اگر تراکم اکسیژن به ۱۵ در صد 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(N2)	۰.۹۷	زرد	بی بو	هوا معمولا ۷۸.۱۰ ٪ N_2 دارد	نیتروژن جز رقیق کردن و کاهش O2 اثر دیگری ندارد .
دی اکسید کربن (CO_2)	۱.۵۰	بی رنگ	بی بو	هوا معمولا ۰.۰۳ ٪ CO_2 دارد. این گاز از فساد الوار، آتش و گازهای ناشی از احتراق دیزل ایجاد می‌شود.	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 . خطرآن 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، بعضا 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-قهوه‌ای	بینی را می‌سوزاند	در گاز خروجی از احتراق گازوئیل و گازهای حاصل از انفجار دیده می شود	NO بسیار سمی می باشد . تمام اکسید های 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 ریه‌ها به مرگ منجر گردد

*نسبت وزن واحد حجم گاز به وزن واحد حجم هوا

www.tunar.ir

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) .

www.tunar.ir

۴-۱-۳ 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 می‌شود. بدیهی است هرقدر قطر لوله بیشتر باشد، قیمت آن زیادتر است و فضای بیشتری را اشغال می‌کند. 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 می‌شود و هر قدر هم که در ساخت این لوله‌ها 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 می‌دهد. 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 می‌کنند 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 می‌آورند.

۴-۱-۵ 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 می‌کنند تا به کمک آن، بادبزن مناسب انتخاب شود. افت کلی از مجموع افت اصطکاک و افت در نقاط اتصالات تشکیل می‌شود که در هر مورد آنها را باید بطور جداگانه محاسبه کرد.

۴-۱-۶ 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 می‌کنند. اگر Q و P مقادیر نهایی شدت جریان و فشار باشد، با مراجعه به منحنی مشخصه بادبزنهای مختلف، بادبزنی انتخاب می‌شود 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 می‌توان بادبزن مناسب را انتخاب کرد. در این نمودارها، با **انتقال** مختصات P و Q مورد نظر، مدل ونوع بادبزن مناسب انتخاب می‌شود.

۴-۱-۷ محاسبه توان لازم

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

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

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 برحسب متر مکعب در ثانیه بیان شود، N برحسب وات به دست می‌آید.

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 لااقل شعله را منتقل نکند. مهمترین انواع لوله های تهویه به شرح زیر است:

لوله های تخته ای:

این لوله ها معمولاً با تخته سه لایی ساخته می‌شود. مقطع لوله ها ابتدا مربع بود ولی امروزه با مقطع دایره ای ساخته می‌شوند. از این لوله ها معمولاً در مواردی که لوله های فلزی زود خورده می‌شوند استفاده می‌کنند. 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 می‌برند 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 واشر و پیچ ومهره به یکدیگر وصل می‌کنند.

لوله های فلزی:

لوله های فلزی را از ورق‌های آهن سفید به ضخامت ۱ تا ۳ میلیمتر می‌سازند. انتخاب ضخامت ورق به قطر لوله تهویه بستگی دارد. برای تهیه لوله های فلزی، ابتدا ورق مورد نظر را انتخاب می‌کنند و سپس با استفاده از نوردهای دستی و یا به کمک چکش، آنها را به شکل لوله در می‌آورند. درز لوله به وسیله جوش و یا به کمک پرچ محکم می‌شود. لوله های فلزی به قطر ۲۰ تا ۸۰ سانتیمتر ساخته می‌شوند.

لوله های پارچه ای:

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

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، می‌توان از آنها در تهویه مکشی نیز استفاده کرد. در ایران غالباً از لوله های برزنتی برای این منظور استفاده می‌کنند. برای وصل قطعات لوله‌های پارچه‌ای، در انتهای هر قطعه یک حلقه فلزی نصب می‌کنند که حالت فنری دارد و به سهولت داخل حلقه لوله دیگر قرار می‌گیرد.

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 می‌سازند که به سهولت داخل یکدیگر قرار گیرند و بدین ترتیب اتصال آنها ساده است.

۴-۱-۹ نصب لوله های تهویه

با توجه به قطر نسبتا زیاد لوله های تهویه، نصب آنها در محلهای مناسب باعث صرفه جویی در فضای مفید تونل می‌شود.لوله های فلزی را معمولا به وسیله مفتولهای فلزی یا وسایل دیگر نگهداری نصب میکنند. لوله های پارچه ای معمولا به فاصله هر چند متر حلقه های مخصوصی دارند که به کمک آنها میتوان به سهولت لوله را به میخهایی که در تونل نصب می‌شود آویزان کرد. از آنجا که ضمن حرکت هوا در لوله های تهویه، به خصوص لوله های پارچه ای، مقداری الکتریسیته ساکن تولید می‌شود 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.

۴-۱-۱۰ بادبزنها

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

بادبزنهای با موتور هوای فشرده

این بادبزنها از جمله متداولترین بادبزنها در تونلهای معادن زغال سنگ هستند. گر چه موتور هوای فشرده سروصدای زیادی دارد و راندمان آن چندان بالانیست ولی به خاطر ایمنی بیشتر، از نوع برقی متداولتر است. بادبزن با موتور هوای فشرده را معمولاً از نوع محوری می‌سازند. نیروی محرکه این بادبزنها به وسیله یک توربین هوای فشرده تامین می‌شود.

بادبزنهای با موتور برقی

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

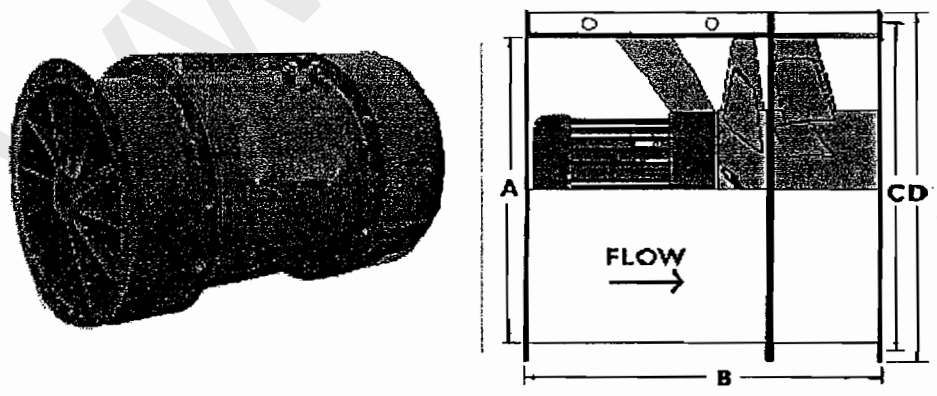
است می‌گیرد. بادبزنهای برقی را طوری می‌سازند که موتور و چرخ گردنده آن مشترکاً در پوشش واحدی قرار می‌گیرد و این امر باعث سهولت حمل و نقل آنها می‌شود (مدنی، ۱۳۷۸).

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

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

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

نوع بادبزن / مشخصات فنی	Ka-400	Ka-500	Ka-600	BM-200	BM-300	BMII 2-200	BMII 5-240
قطر استوانه گردنده (mm)	۴۰۰	۵۰۰	۶۰۰	۵۵۰	۶۰۰	۵۳۰	۶۷۰
حداکثر راندمان (%)	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۴	۰/۵	۰/۶	۰/۶
قدرت موتور (kW)	۳/۸	۱۱	۳۰	۶/۳	۲۴	۷/۶	۲۰/۴
وزن (kg)	۱۴۰	۲۶۵	۴۷۰	۲۰۰	۳۱۵	۱۹۰	۲۴۷



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

جدول ۴-۳- شماره وابعاد مربوط به بادبزن‌های محوری
نشان داده شده در شکل ۴-۱

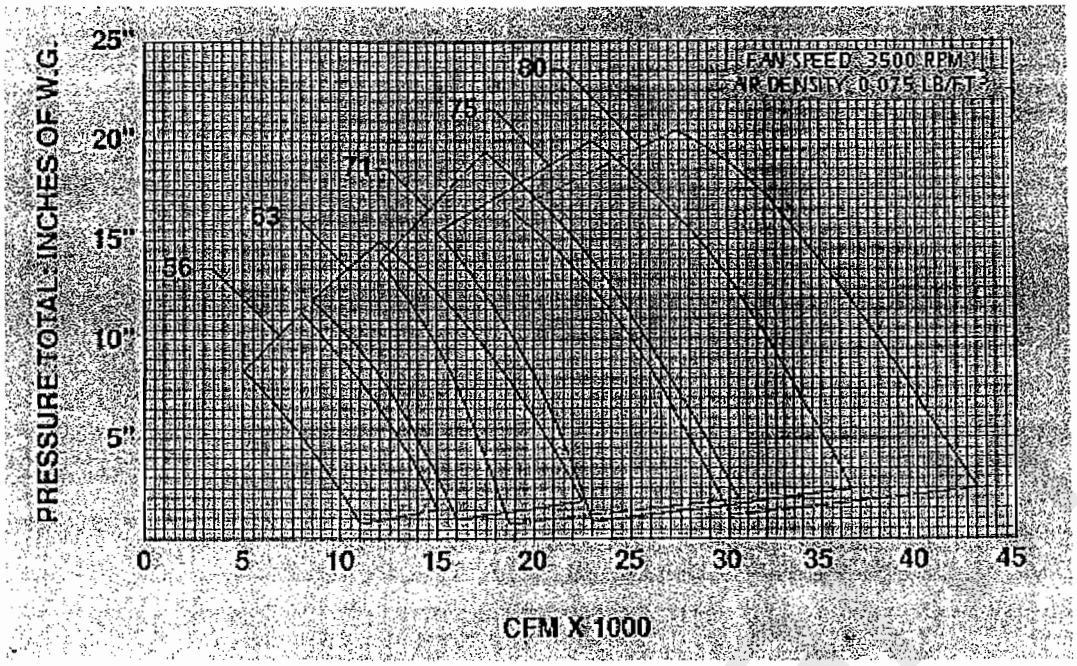
FAN SIZE	A	B	D	HP	RPM
56	22" (56cm)	44" (112cm)	27.5" (70cm)	25 - 40	3500
63	25" (63cm)	47" (119cm)	30.5" (77cm)	25 - 40	3500
71	28" (71cm)	50" (127cm)	33.5" (85cm)	40 - 75	3500
75	30" (75cm)	50" (127cm)	35.5" (90cm)	50 - 100	3500
80	31.5" (80cm)	50" (127cm)	37" (94cm)	50 - 100	3500

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 منحنی‌های 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 منحنی‌های مشخصه بادبزن‌های نشان داده شده در شکل ۴-۱ به عنوان نمونه نشان داده شده است.

www.tunar.ir



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 پره های 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 بادبزنهائی 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 طزیق نهری 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 معمولا از دیواره تونل آویزان می‌شود.

از آنجائیکه مقدار آب نشتی به تونل قابل پیش‌بینی دقیق نبوده و نظر به اینکه مقدار آب در طی زمان معمولا 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 وخارج تونل نیاز دارد. این سیستم معمولا جهت حمل مواد حفاری از سینه کار به بیرون از تونل نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

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

۴-۳-۱ خط آهن

از نقطه نظر مصرف انرژی، خط آهن کار آمدترین شیوه حمل مواد را درتونل تامین می‌کند.

مزایا:

۱- سهولت تعمیر و نگهداری
۲- حداقل نیاز به تهویه
۳- سازگاری با اکثر روش‌های حفاری و بارگیری
۴- قابلیت هماهنگی با تقریبا تمام تونل‌ها با ابعاد مختلف
۵- توانایی استفاده ازچندین منبع انرژی
۶- سیستم هدایت ثابت استفاده از حد آزاد (clearance) کوچکتری را امکان‌پذیر می‌سازد
۷- هیچ محدودیتی در ارتباط با طول تونل وجود ندارد.

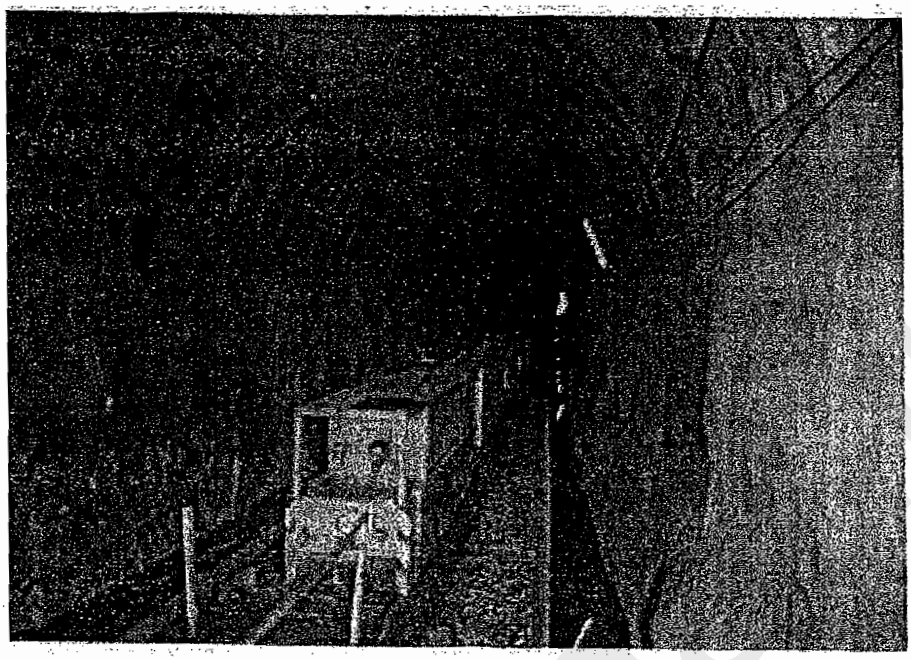
معایب:

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

محدودیت‌ها:

۱- شیب ۳٪ یک محدویت عملی برای ریل محسوب می‌شود، هر چند شیب تا ۶٪ هم در شرایط خاص مورد استفاده قرار گرفته‌اند. شیب‌های تندتر نیاز به استفاده از تجهیزات خاصی مثل کابل‌ها (cables) و بالابرها (hoists) دارد. تمهیدات ایمنی جهت جلوگیری از حوادث برای شیب‌های بیش از ۱٪ باید در نظر گرفته شوند.
۲- با استانداردهای فعلی اجرا و نگهداری، سرعت به حدود 15mph (24km/h) محدود می‌شود. با اعمال شرایط بهتر در ساخت ریل و زیرسازی، سرعت‌های بالاتر نیز امکان‌پذیر است.

www.tfnar.ir



شکل ۴-۳- 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 (wsaher) 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 قابلیت‌هائی 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 لوکوموتیو ها به باتری‌های یدکی و نیز تجهیزاتی جهت شارژ و تعمیر آنها احتیاج دارند.

به استثنای بدنه واگن‌های بزرگ، حداقل شعاع انحنا درتونل 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 هر۲/۵ 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 معمولا 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)	۳۵.۶	۴۰.۶	۴۵.۷	۵۰.۸	۵۵.۹	۶۱.۰	۶۶.۰	۷۱.۱	۷۶.۲	۸۳.۸	۹۱.۴
۹۱.۴	۳.۷	۳.۷	۳.۷	۴.۰	۴.۰	۴.۰	۴.۳				
۹۶.۵	۳.۷	۳.۷	۳.۷	۴.۳	۴.۳	۴.۳	۴.۶	۴.۶			
۱۰۱.۶	۴.۰	۴.۰	۴.۰	۴.۳	۴.۳	۴.۳	۴.۹	۴.۹	۴.۹		
۱۰۶.۷	۴.۳	۴.۳	۴.۳	۴.۶	۴.۶	۴.۶	۴.۹	۴.۹	۴.۹		
۱۱۱.۸	۴.۶	۴.۶	۴.۶	۴.۹	۴.۹	۴.۹	۵.۲	۵.۲	۵.۲	۶.۱	
۱۲۱.۹	۴.۹	۴.۹	۴.۹	۵.۲	۵.۲	۵.۲	۵.۸	۵.۸	۵.۸	۶.۷	۶.۷
۱۳۷.۲		۵.۵	۵.۵	۵.۸	۵.۸	۵.۸	۶.۴	۶.۴	۶.۴	۷.۶	۷.۶
۱۵۲.۴		۵.۵	۵.۵	۵.۸	۵.۸	۵.۸	۶.۴	۶.۴	۶.۴	۷.۶	۷.۶
۱۶۷.۶			۶.۷	۷.۰	۷.۰	۷.۰	۷.۹	۷.۹	۷.۹	۹.۴	۹.۴
۱۸۲.۹			۷.۶	۷.۹	۷.۹	۷.۹	۸.۵	۸.۵	۸.۵	۱۰.۴	۱۰.۴
۲۱۳.۴			۸.۸	۹.۱	۹.۱	۹.۱	۱۰.۱	۱۰.۱	۱۰.۱	۱۱.۹	۱۱.۹
۲۴۳.۸				۱۰.۴	۱۰.۴	۱۰.۴	۱۱.۳	۱۱.۳	۱۱.۳	۱۳.۷	۱۳.۷
۲۷۴.۳				۱۱.۹	۱۱.۹	۱۱.۹	۱۳.۱	۱۳.۱	۱۳.۱	۱۵.۵	۱۵.۵
۳۶۵.۸				۱۵.۸	۱۵.۸	۱۵.۸	۱۷.۱	۱۷.۱	۱۷.۱	۲۰.۷	۲۰.۷

مواد حفاری شده را با استفاده از وسایل نقلیه چرخ لاستیکی می‌توان مستقیما به یک یا چند محل دپوی مورد نظر حمل کرد. در صورت وجود چند سینه کار، وسایل نقلیه چرخ لاستیکی می‌توانند بسته به میزان حفاری در سینه‌های مختلف کار از یک سینه کار به سینه کار دیگر منتقل شوند.

مزایا:

۱- در یک تونل عریض، وسایل نقلیه به سهولت می‌توانند از کنار هم عبور کنند.
۲- امکان توقف کل کار بعلت بروز مشکل برای یک وسیله نقلیه به حداقل می‌رسد.
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:

www.tunnel.ir

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 تونل های 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- شیب های ۱۰٪ هیچ مشکلی ندارند. شیب‌های تا ۲۵٪ نیز امکان‌پذیر است.
۲- با یک زیرسازی خوب، سرعت های 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 شودکه حداکثر خروجی کوتاه مدت تونل را حمل کند.

مزایا:

۱- ظرفیت جابه‌جایی مواد جفاری 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

www.tmar.ir

معایب:

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

محدودیت‌ها:

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

www.tnar.ir

۵ – پایدارسازی تونل‌ها

۵-۱ مقدمه

در اغلب موارد، انواع راکبولت (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 حائل های 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 می رسد 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 پوشش ها 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 ویرگیهایی 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 می تواند 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 تقریبا دو برابر چدن خاکستری است اصولا باید در مواردی از آن استفاده شود که بهبود مشخصات کششی و دوام کاربرد آن را توجیه می‌کند.

با رواج پوشش های بتنی سگمنتی قبل از جنگ جهانی دوم در نتیجه کمبود چدن، کاربرد پوشش‌های چدنی بطور قابل‌توجهی کمتر شده است. قبل از آن، پوشش‌های چدنی بطور وسیعی در انواع تونل‌ها از جمله تونل‌های راه و راه‌آهن بکار گرفته می‌شدند.

محدوه وسیعی از پوشش های بتنی پیش‌ساخته برای تونل ها توسعه یافته‌اند و بطور کلی مشخص شده است که این پوشش‌ها اقتصادی‌تر از پوشش‌های 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 تونل‌های 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 راکبولت غیر قابل استفاده می باشد یا احتمال گسیختگی وسیع در اثر حفاری وجود دارد. شرایط تنش‌های درجای بالا نسبت به مقاومت سنگ نیز مستلزم روش‌های حائل‌بندی مناسب از قبیل استفاده از حائل‌های فولادی می‌باشد.

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.

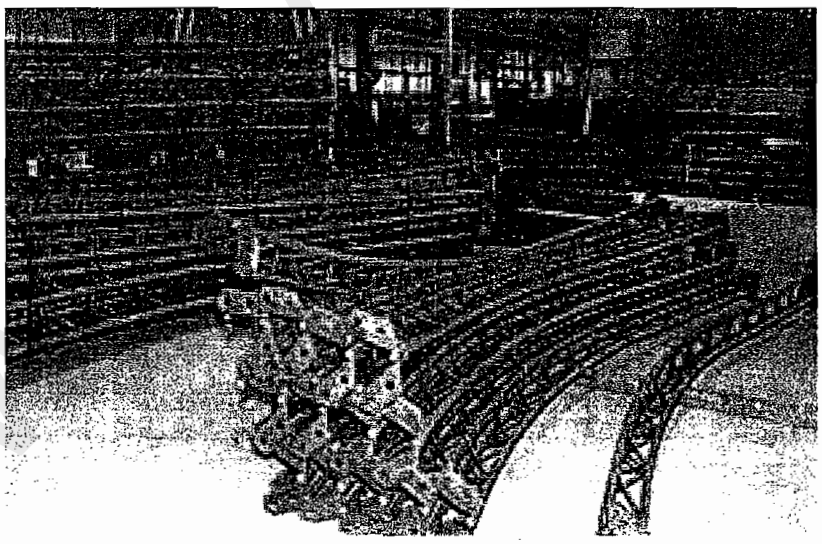
مشکل اصلی پوشش های فولادی مقاومت نسبتاً کم آنها در برابر خوردگی می باشد . این مشکل را می‌توان تاحدی با گالوانیزه کردن یا رنگ کردن پوشش برطرف کرد اما اینکار باعث افزایش هزینه می‌شود در مواردی که از بتن درجا بعنوان پوشش نهایی استفاده می‌شود پوشش فولادی عملا داخل بتن قرار می‌گیرد که بدین ترتیب از خوردگی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

۵-۴ تیر مشبک (lattice girder)

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

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

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



شکل ۵-۱- نمونه‌ای از قطعات تیر مشبک

شکل ۵-۲- نصب تیر مشبک – تونل گاوشان

www.tt

۵-۵ انواع راکبولت و میل مهار و کاربرد آنها

شکل ۵-۳ کاربرد معمول راکبولت‌ها و میل مهارهایی که برای کنترل خرابیهای مختلف در توده‌های سنگ در اطراف تونل‌ها نصب می‌شوند را نشان می‌دهد.

انواع مختلف سیستم راکبولت و میل‌مهار وجود دارد و بطور کلی می‌توان تقسیم‌بندی زیر را در مورد آنها بعمل آورد:

انواع راکبولت:

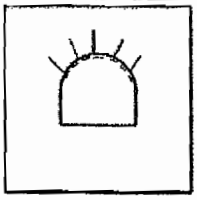
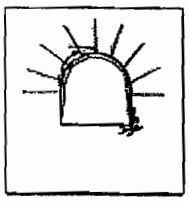
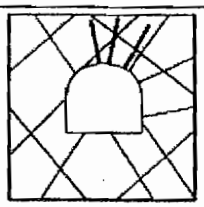
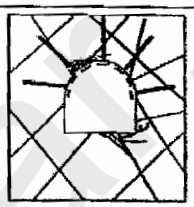
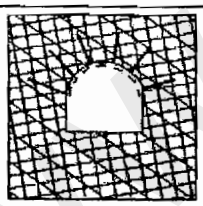
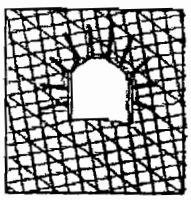
- راکبولت‌های گیردار شده بصورت مکانیکی (mechanically anchored rockbolts)
- راکبولت‌های گیردار شده با رزین (resin grouted rockbolts)

انواع میل مهار:

- میل مهارهای تزریق شده (grouted dowels)
- میل‌مهارهای اصطکاکی یا مجموعه شکافدار (split set)
- میل مهارهای از نوع Swellex

تفاوت راکبولت با میل‌مهار آن است که می‌توان در راکبولت پیش‌تنیدگی (کشش) ایجاد نمود. میل مهارها در مواردی بکار می‌روند که نصب خیلی سریع آنها امکانپذیر باشد. میل‌مهارها صرفا وقتی کشیده شده و تحت بار قرار می‌گیرند 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 میل‌مهار موثر نخواهدبود.در صورتی که پیمانکاری ماهر مسئول اجرا و نصب این راکبولت ها بوده و زمان نصب آنها حساب شده باشد، میل‌مهارها می‌توانند 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.

www.tunar.ir

	سطح تنش پایین	سطح تنش بالا
سنگ سالم	 توده سنگ سالم که در معرض تنشهای کمی قرار دارد . مهار بندی مختصر موجب ایمنی بیشتر می‌گردد.	 توده سنگ سالم که در معرض تنشهای زیادی قرار دارد.استفاده از راک بولت یا میل‌مهار همراه با توری سیمی یا شاتکریت مانع شکست سنگها و سقوط آنها می شود.
سنگ با درزه و ترکهای کم	 توده سنگ با درز وترکهای کم در معرض تنشهای کم. نصب راکبولت بطور موضعی برای جلوگیری از ریزش سنگهای منفرد بکار می رود . بولتها باید کشیده شوند .	 توده سنگ با درز وترکهای کم در معرض تنشهای زیاد. با بکاربردن راکبولت یا میل‌مهارهای قوی که ناپیوستگیها را بیکدیگر می دوزند همراه با توری سیمی و شاتکریت یا شاتکریت الیاف‌دار در سقف و دیواره‌ها می‌توان مهار مناسب را ایجاد کرد .
سنگ با درزه و ترکهای زیاد	 توده سنگ با درز و ترکهای زیاد که در معرض تنشهای کم قرار دارد. راک بولت گذاری مختصر بهمراه مش یا شاتکریت می تواند مانع افتادن تکه سنگهای سقف و دیواره‌ها شود.	 توده سنگ با درز وترکهای زیاد در معرض تنشهای زیاد. در این موارد راکبولت یا میل‌مهارهای 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.

شکل ۵-۳- نمونه ای از کاربرد راکبولت و میل‌مهار برای کنترل گسیختگی در شرایط مختلف توده‌سنگ

www.tunnel.ir

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 می‌توان 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 می‌گردد. 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 نمی‌شود.

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

در سنگ های سخت و باکیفیت خوب، مهاری های مکانیکی کارایی زیادی دارند و سریع و راحت می‌توان آنها را نصب نمود. در سنگ های ضعیف‌تر و نرم‌تر تاثیر گیردار کننده مکانیکی بعلت خرد شدگی محلی و موضعی سنگ در طول غلاف راکبولت، کاهش می‌یابد. در شیل‌های خیلی ضعیف، گل سنگ‌ها وماسه سنگ های‌ضعیف، استفاده از گیردار کننده‌های مکانیکی توصیه نمی‌شود.
انواع راکبولت با پوسته منبسط شونده از اصول مشابهی پیروی می‌کنند. گوه ای که به انتهای میله راکبولت متصل می‌شود به داخل غلاف گیردار کننده مخروطی شکل کشیده شده و در نتیجه بدنه راکبولت را با فشار بطرف دیواره های چال منبسط می‌سازد.

درپوش دوغاب‌بند لاستیکی (rubber grout seal) برای قرار دادن راکبولت در امتداد محور چال و برای آب‌بندی کردن دهانه چال در مقابل نشت دوغاب استفاده می‌شود. طریق دیگر آب بندی استفاده از خمیر زودگیری است که در دهانه چال مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل ۵-۴ طرق مختلف نصب لوله‌های ورود و خروج دوغاب نشان داده شده است که در همه آنها (بجز چال‌های سربالا) تزریق از دهانه چال صورت می‌گیرد و لوله برگشت تا انتهای چال امتداد می‌یابد. تزریق هنگامی متوقف می‌شود که هوای داخل چال کاملا 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، تقریبا آب بندی دهانه چال را غیر ممکن می‌سازد.

وقتی که امکان جاگذاری راکبولت 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. واردکردن آب تحت فشار به داخل چال قبل ازشروع تزریق موجب شسته و تمیز شدن چال شده و نیز می‌توان به این طریق چگونگی آب بندی دهانه چال را آزمایش نمود.

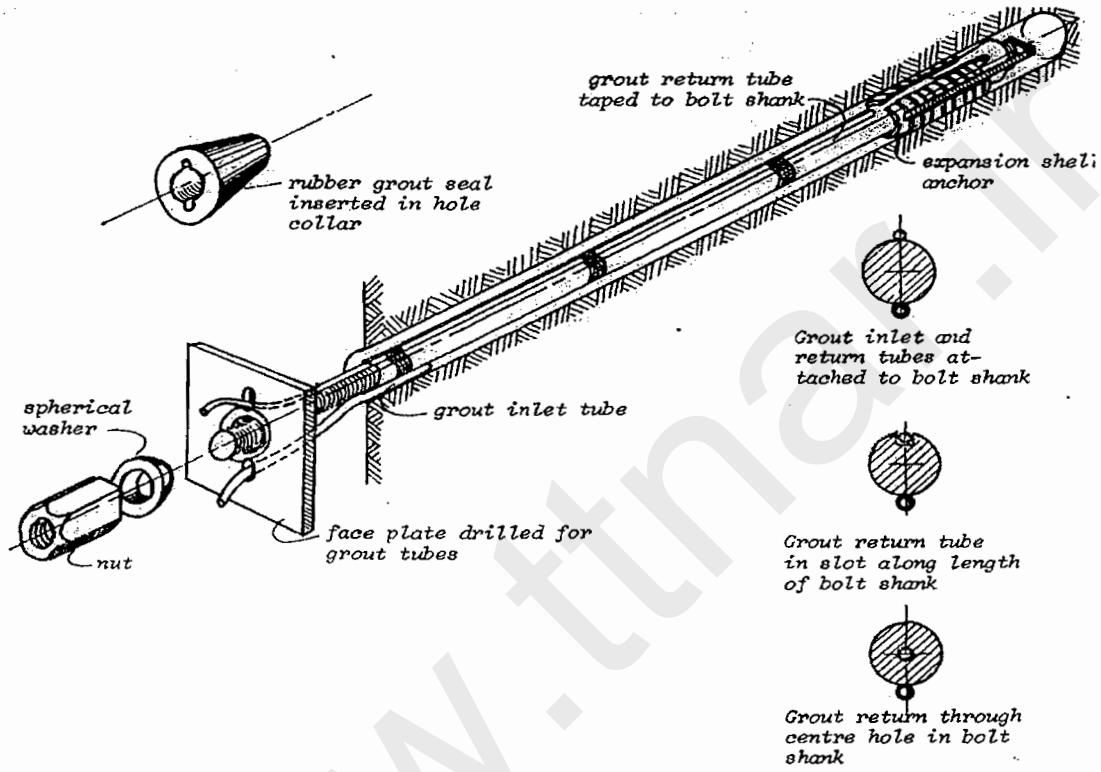
شکل ۵-۴ نمونه‌ای از لوله و وسایل تزریق را نمایش می‌دهدکه برای استفاده در چال هایی که بصورت سربالا هستند مفید است. یک لوله پلاستیکی کوتاه (به قطر داخلی حدود ۸ میلیمتر و قطر خارجی حدود ۱۱میلیمتر) برای تزریق دوغاب بکار می‌رود. برگشت دوغاب توسط لوله پلاستیکی دیگری به قطر داخلی ۶ میلیمتر و قطرخارجی ۸ میلیمترکه به سراسر راکبولت 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 سر پایینی 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 درقسمت خارجی بدنه راکبولت پیچیده می‌شود درطول جابجایی و نصب راکبولت 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 راکبولت از چال خارج شده و تعویض گردد. چنانچه میله راکبولت 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 ۵-۴ ملاحظه می‌شود، برای اینکه لوله برگشت در معرض آسیب کمتری قرار گیرد. می‌توان آن را در شکافی که روی میله راکبولت تعبیه شده جاسازی کرد یا از راکبولت 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 ($۲۵lb/in^2$) حفظ شود تا از آسیب رساندن (jacking) به توده سنگ اجتناب شود. تزریق باید آنقدر ادامه یابد تا جریان پیوسته ای از دوغاب در داخل لوله برگشت برقرار شود.

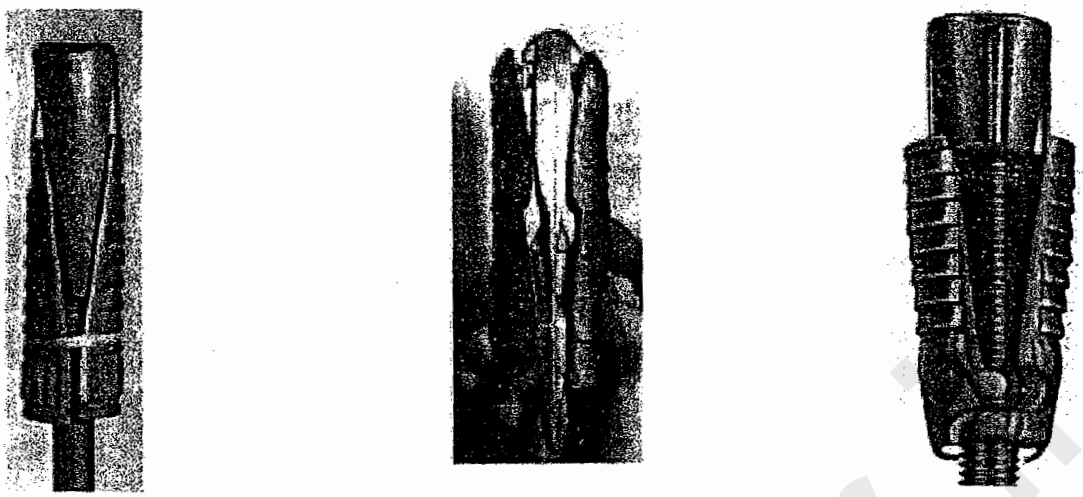
از مزایای این راکبولت آن است که آن را می‌توان بلافاصله پس از نصب کشید و در مرحله بعدی پس از متوقف شدن تغییر مکان کوتاه مدت تزریق نمود. گیرداری خیلی مطمئن در سنگ های خوب ایجاد می‌کند و توان باربری زیادی را می‌توان تامین نمود.

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



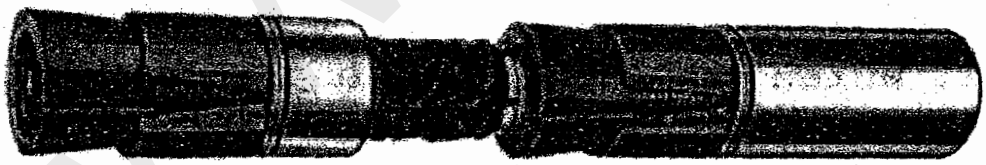
شکل ۵-۴- راکبولت با پوسته منبسط شونده

www.tnar.ir



Pattin bolt Goldenberg bolt Bail bolt

(a) Standard types



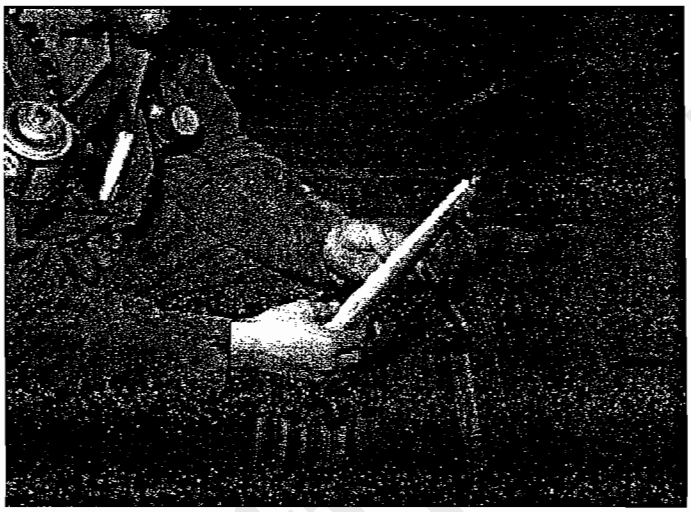
(b) Shells for large diameter drillholes or for use in soft rock

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

www.tnar.ir

۵-۵-۲ راکبولت‌های گیردار شده با رزین

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



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

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

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

قسمت عمده‌آی از هزینهٔ بالای رزینها توسط سرعت بالای نصب آنها جبران می‌شود. رویهٔ شرح داده شده منجر به نصب راکبولتی پس‌کشیده 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 درجهٔ حرارت انبار دارد. ممکن است حتی کمتر از ۶ ماه باشد. به همین‌دلیل 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 کارخانهٔ 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 می‌توا ن 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 زرین 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 استفادهٔ بلند مدت مد نظر است، بدلیل مشکلات اشاره شده استفاده از دوغاب سیمان پیشنهاد می‌شود.

مزایای راکبولت‌های گیردار شده با رزین:

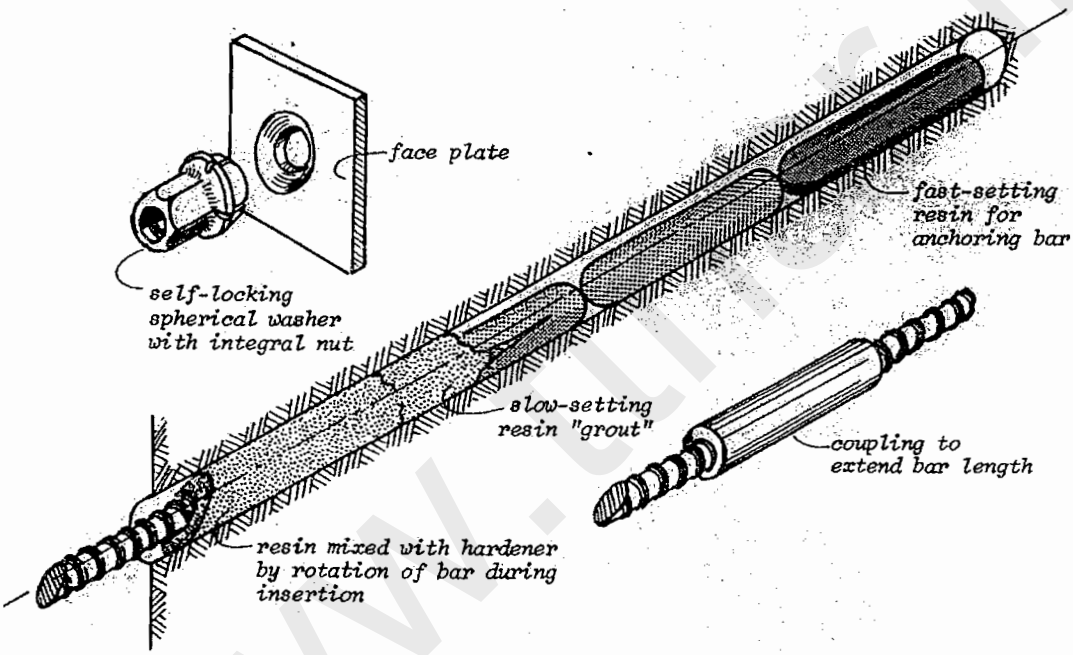
۱ -سرعت بالا: نصب سریع بولتها را ممکن می‌سازد. بولتها را می‌توان در عرض چند دقیقه نصب و پس کشیده کرد و به این ترتیب به سرعت برای تونلها حائل فراهم نمود.

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 نمی‌گیرند و به پس کشیدن مجدد پس از انفجار احتیاج ندارند.
۴ -مقاومت گیرداری نسبتا زیادی می‌توان 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. اصولا" بیشترین مصرف کپسول های محتوی رزین در کشورهایی است که خود آنها را تولید می‌کنند ولذا بسرعت در دسترس بوده و مشکل نگهداری در انبار وجود ندارد.



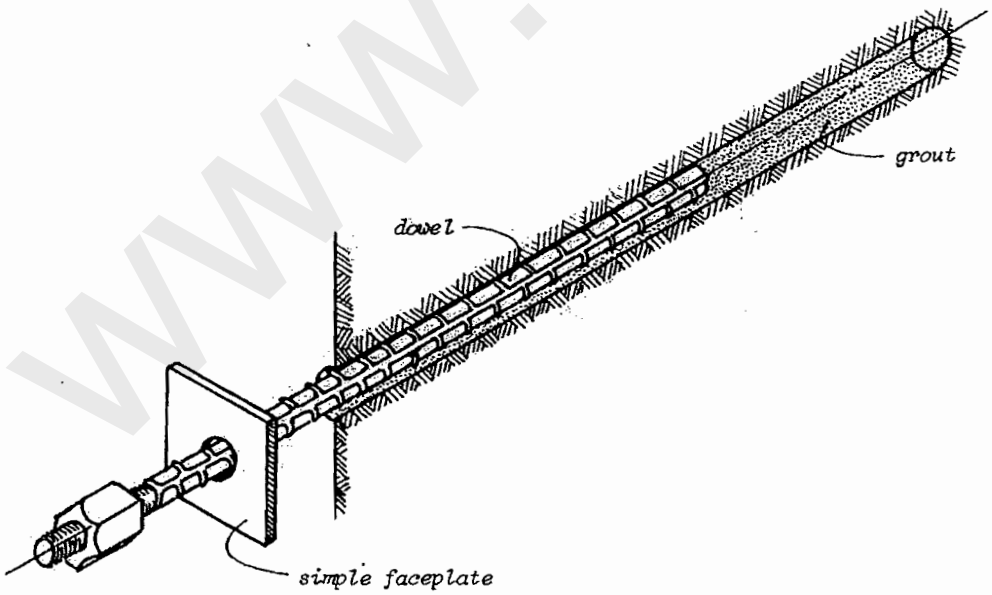
شکل ۵-۷- راکبولت گیردار شده با رزین

۵-۵-۳ میل مهارهای تزریق شده

در شرایطی که امکان نصب میل‌مهار در نزدیکی سینه کار وجود دارد یا انتظار تغییرات تنش در مراحل بعدی حفاری می‌رود میل‌مهارها را می‌توان به جای راکبولت‌ها به‌کاربرد. تفاوت اساسی این دو سیستم در این است که راکبولتهای پس کشیده نیروی مثبت به سنگ اعمال می‌کنند، در حالیکه میل‌مهارها برای بوجود آمدن نیرو در آنها و موثر واقع شدنشان نیاز به حرکت سنگ (تغییر شکل تونل) دارند.
ساده‌ترین نوع میل‌مهار که امروزه به کار می‌رود میل‌مهار با تزریق سیمان است که در شکل ۵-۸ نشان داده شده است.

تزریق دوغاب (معمولا با نسبت آب به سیمان ۰/۳ یا ۰/۳۵) با گذاشتن لولهٔ تزریق در انتهای سوراخ و با پیشروی تزریق، کشاندن آن به سمت بیرون انجام می‌گیرد. چنانچه ویسکوزیتهٔ دوغاب مورد استفاده مناسب باشد از حفره بیرون نمی‌ریزد. میل‌مهار تا نیمه در داخل سوراخ فرو می‌رود و قبل از فرو کردن تمام آن، خم کوچکی به آن داده می‌شود. این خم سبب می‌شود تا در هنگام گرفتن دوغاب، میل‌مهار در جای خود نگه داشته شود. پس از گرفتن دوغاب، صفحه پیشانی در محل خود قرار داده شده و مهره را سفت می‌نمایند. گذاشتن صفحه پیشانی ضروری است بدلیل اینکه اگر میل‌مهار طوری باشد که در برابر تغییر مکان سنگ واکنش نشان دهد، سنگ مجاور سوراخ تمایل به کشیده‌شدن از کنار میل‌مهار 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 میل‌مهارها، ساده و ارزان بودن آنهاست. از معایب آن این است که این راکبولتها را نمی‌توان کشید وبنابراین باید قبل از اینکه برای توده سنگ تغییر شکل قابل ملاحظه و زیادی رخ بدهد نصب شود.

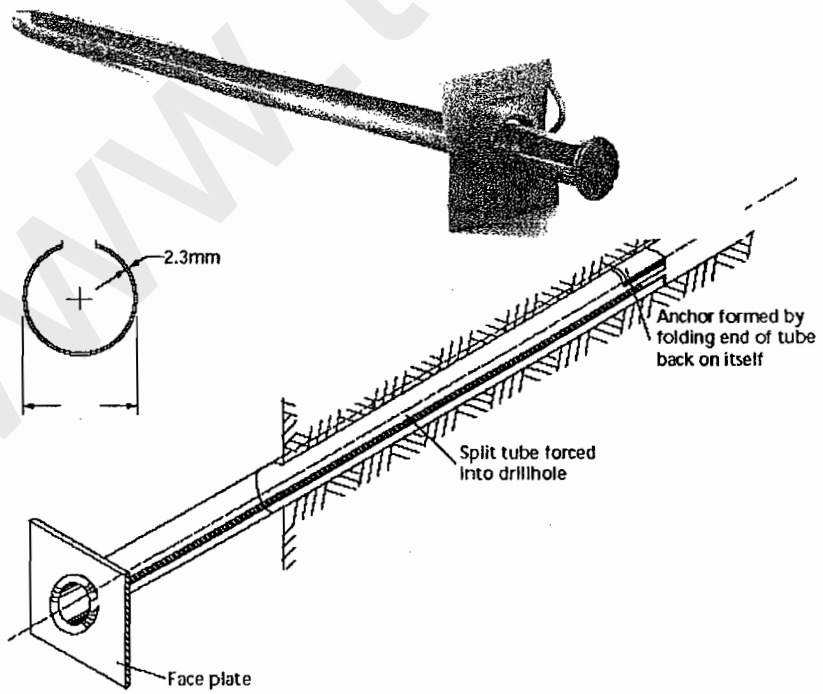


شکل ۵-۸- میل‌مهار تزریق شده

۵-۵-۴ میل‌مهارهای اصطکاکی یا مجموعه شکافدار

این میل‌مهارها 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 استفادهٔ بلند مدت آنها در محیط‌های خورندهٔ به حساب نمی‌آید. برای بالا بردن قابلیت انتقال بار می‌توان اطراف لولهٔ شکافدار را پس از نصب اولیه آن با دوغاب سیمان پر کرد. تزریق دوغاب سیمان تا ۲۰۰٪ انتقال بار را افزایش می‌دهد.



شکل ۵-۹- میل‌مهار اصطکاکی یا مجموعه شکافدار

www.ttnar.ir

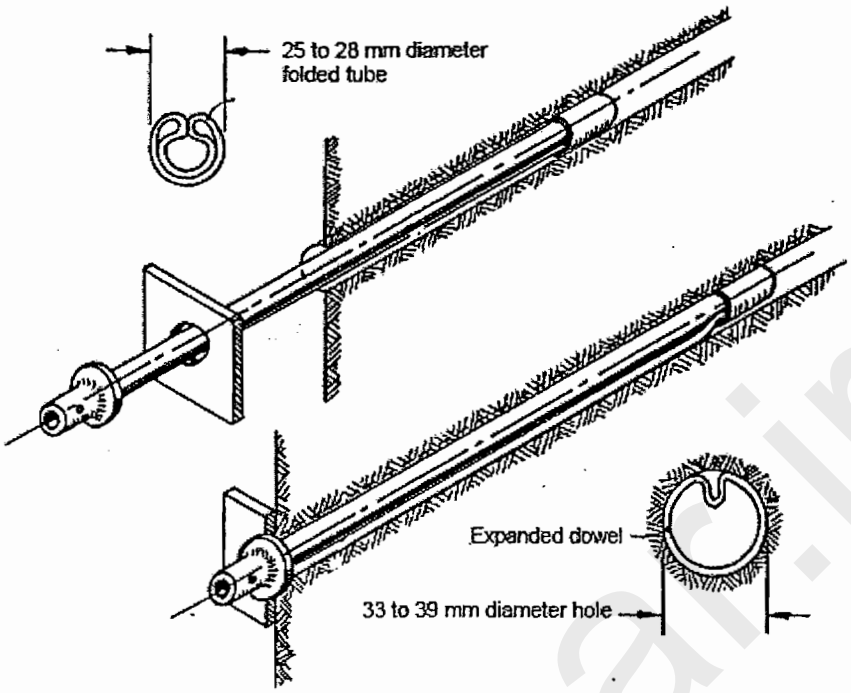
جدول ۵-۱- مشخصات انواع مجموعه شکافدار

مدل مجموعه شکافدار	SS-۳۳	SS-۳۹	SS-۴۶
قطر پیشنهادی سرمته	۳۱mm تا ۳۳	۳۵mm تا ۳۸	۴۱mm تا۴۵
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 تا۵/۴ 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
	۱۲۵ x۱۲۵ mm	۱۲۵ x۱۲۵ mm	-
سیستم گالوانیزه	موجود است	موجود است	موجود است
سیستم ضد زنگ	موجود نیست	موجود است	موجود نیست

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

۵-۵-۵ میل مهارهای از نوع Swellex

سیستم Swellex که در شکل 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 شده‌است که در هنگام ساخت مچاله می‌شود تا به قطر ۲۵mm تا ۲۸ برسد و می‌تواند داخل سوراخهایی با قطر ۳۲mm تا ۳۹ نصب شود. در هنگام داخل کردن آن به داخل سوراخ نیروی فشاری مورد نیاز نمی‌باشد و پس از آن با فشار زیاد آب (حدود ۳۰MPa یا ۴۳۰۰psi) لولهٔ مچاله شده را باز می‌کنند تا در تماس با جدار سوراخ قرار گیرد.



شکل ۵-۱۰- سیستم Swellex

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

براساس ظرفیت باربری می‌توان Swellex ها را طبقه بندی کرد. Swellex استاندارد، ظرفیت ۱۰۰kN را دارد. در حالیکه Swellex سوپر، برای بار ۱۹۰kN طراحی شده است.

امروزه از Swellex در تونل‌ها زیاد استفاده می‌شود، دلایل این استفادهٔ گسترده عبارتنداز:

- امکان استفاده از سوراخهای با قطر متفاوت.
- مهارهای Swellex قابلیت تطبیق با حرکات بزرگ زمین را دارا هستند.
- عدم حساسیت در برابر لرزشهای 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 زیان‌آور.

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

۵-۶ مشخصات بار-تغییر شکل انواع راکبولت‌ها و میل‌مهارها

Stillborg(1994) یک سری آزمایش بر روی بولتها و داولهای نصب شده در جهت عمود بر یک درزه مدل‌سازی شده که با استفاده از دو بلوک بتنی مسلح با مقاومت بالا (دارای مقاومت فشاری ۶۰MPa) ساخته شده بود . این نوع آزمایش شرایط واقعی‌تری را نسبت به آزمایش کشش (pull-out test) ایجاد می‌کند.

راک بولتها و داول‌های مورد آزمایش در چالهای حفر شده با چکش ضربه‌ای و با همان روشهایی که در شرایط واقعی کارگذاشته می‌شوند، نصب شدند. سپس این سیستمهای حائل با کشیدن دو بلوک بتنی به سمت خارج (در جهت مخالف یکدیگر) با سرعتی ثابت و اندازه‌گیری تغییر اندازهٔ 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 می‌دهد.

۵-۷ توری سیمی

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

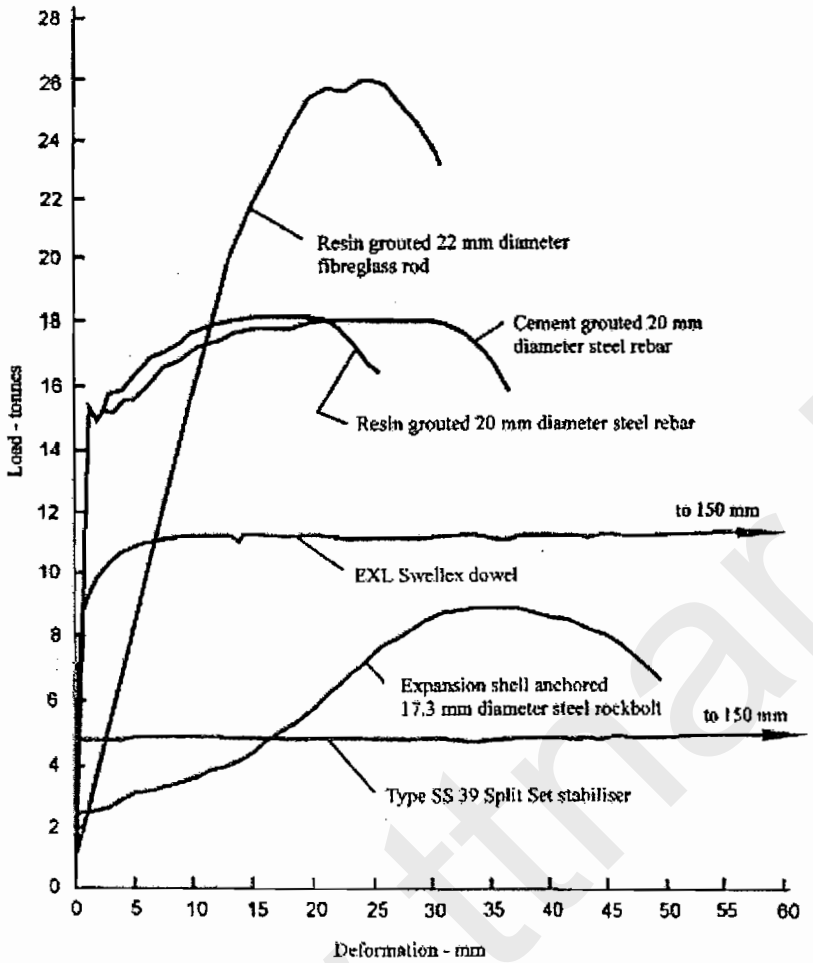
الف - توری بافته یا توری سرندی (chainlink mesh).

ب – توری جوش شده (weld mesh).

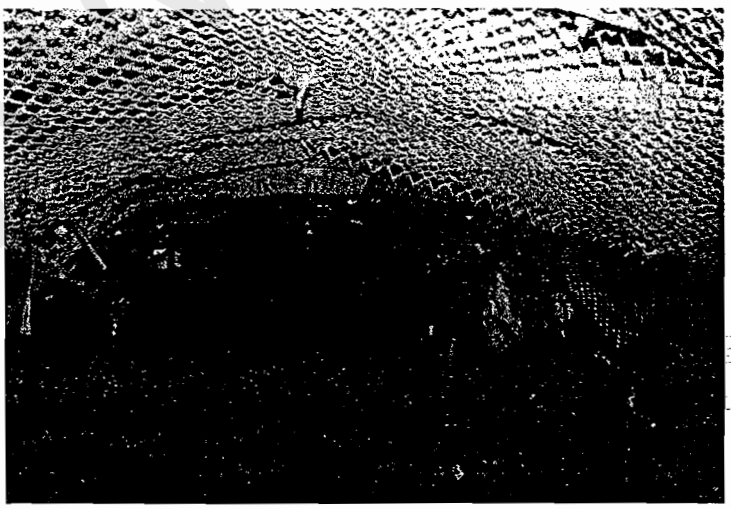
۵-۷-۱ توری بافته یا توری سرندی

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

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



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



شکل ۵-۱۲- نمونه توری سرندی

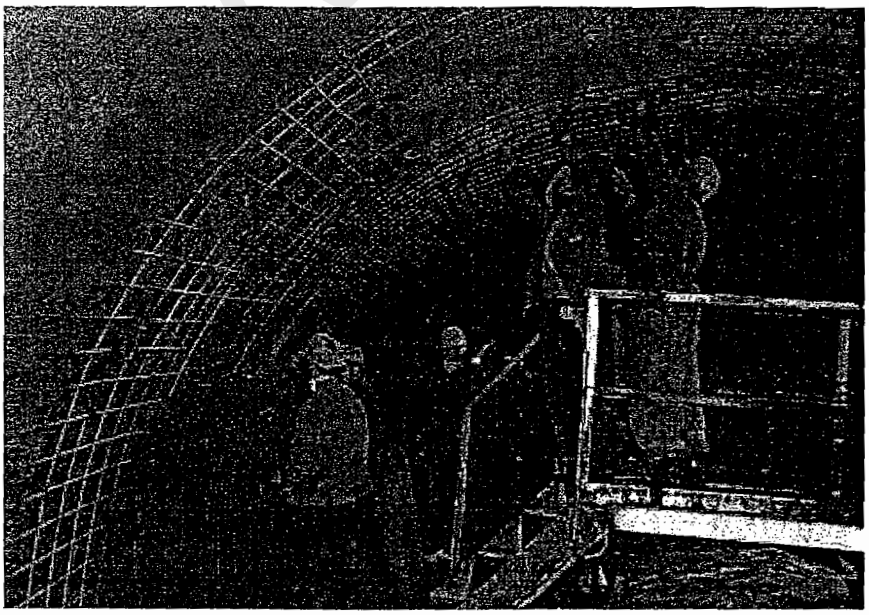
www.tmar.ir

۵-۷-۲ توری جوش شده

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

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

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



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

تهیه توری های جوش شده گالوانیزه (ضدزنگ) مشکل بوده و لذا توری باید به اندازه کافی در داخل بتن قرارگیردتا از خوردگی مصون بماند. باید دقت کافی مبذول گرددتا حباب‌های هوا در پشت مفتول‌ها یا در نقاط تقاطع سیم‌های شبکه تشکیل نشود. این کار با حرکت مداوم سربتن‌پاش امکانپذیر است. زیرا به این ترتیب با تغییر زاویه برخورد بتن با توری کلیه حباب ها پر می‌شود.

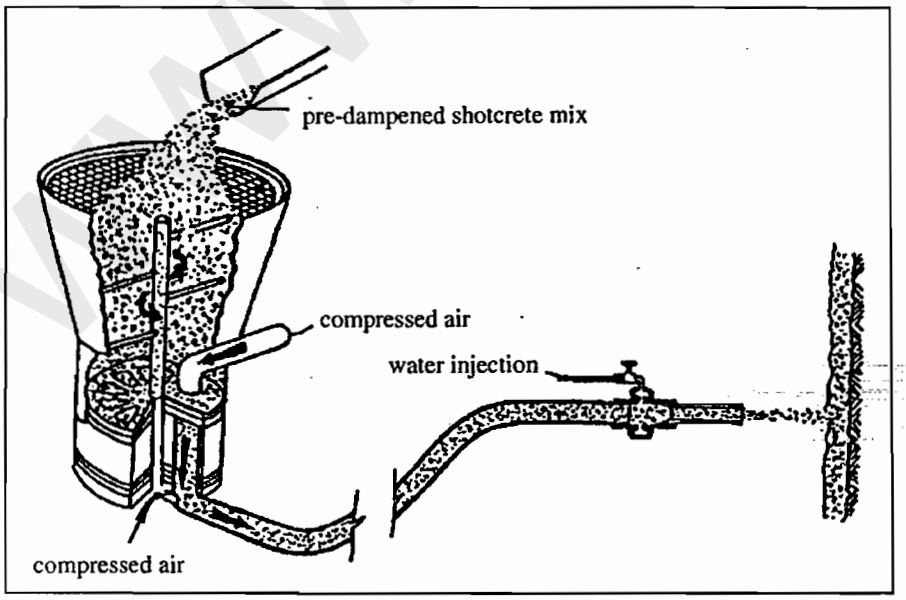
۵-۸ شاتکریت (shotcrete)

۵-۸-۱ انواع شاتکریت

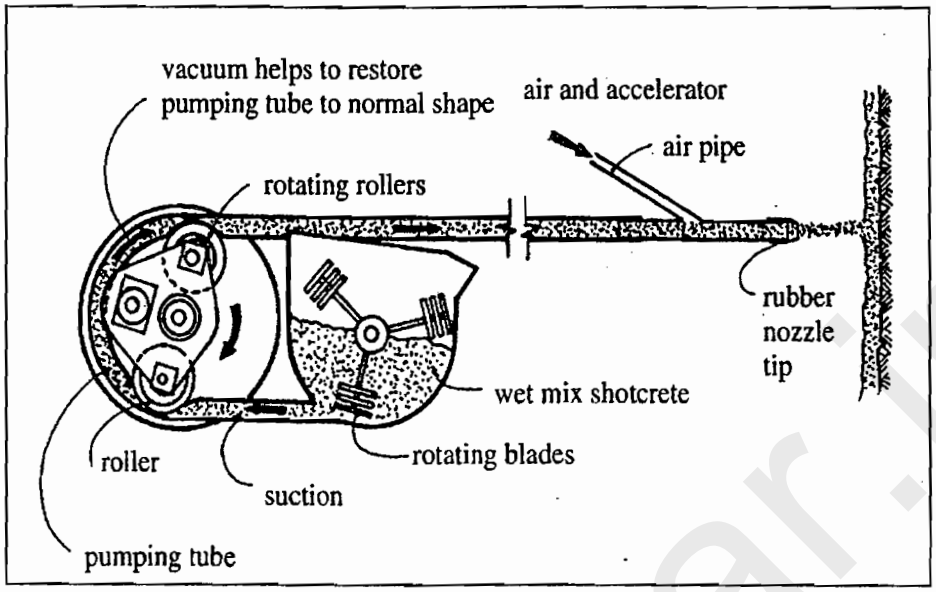
ملات یا بتنی که با کمک فشارهوا پاشیده می‌شود شاتکریت نامیده می‌شود که امروزه بطور وسیعی در حائل‌بندی تونل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. اساسا دو نوع شاتکریت وجود دارد:

- 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 می‌شود. شاتکریت تر بصورت بتنی با اسلامپ پایین تهیه می‌شود و سپس به شیپوره پمپ شده و پخش می‌گردد. در صورتیکه از شاتکریت خشک استفاده شود. از ماده زودگیرکننده در مخلوط می‌توان استفاده کرد، لیکن چنانچه از شاتکریت تر استفاده شود ماده زودگیرکننده باید هنگام پاشیدن بتن در محل شیپوره اضافه شود. در شکل‌های ۵-۱۴ و ۵-۱۵ اجزای دستگاه شاتکریت خشک و تر نشان داده شده‌است. در جدول ۵-۲ نیز مزایا و معایب این دو روش با هم مقایسه شده‌است.



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

نسبت اختلاط

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

- سیمان ۱۵ – ۲۰ ٪
- سنگدانه‌های درشت ۳۰ – ۴۰ ٪
- سنگدانه‌های ریز یا ماسه ۴۰ – ۵۰ ٪

نسبت آب به سیمان در شاتکریت به روش خشک بین ۰/۳ تا ۰/۵ در صد قراردارد که با توجه به شرایط محلی، توسط اپراتور شاتکریت تنظیم می‌گردد. 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 می‌گیرد که این به علت فراوانی آن بوده و عمده مشخصات مورد نیاز شاتکریت معمولی را تامین می‌کند.

www.ttnar.ir

سیمان تیپ **II** (نسبتا ضد سولفات) و تیپ **V** (شدیدا ضد سولفات)- وقتی که سنگ، آب زیرزمینی یا آب مورد استفاده برای اختلاط سولفاته 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 می‌کند. معمولا سیمان تیپ **I** همراه با مواد تند گیر استفاده می‌شود که این بعلت فراوانی این سیمان و انعطاف پذیری آن نسبت به تغییرات کوچک در طرح اختلاط است. باید توجه کرد که بین سیمان و ماده زودگیرکننده سازگاری وجودداشته باشد، زیرارفتار اولیه و نهایی شاتکریت توسط مصالح تشکیل دهنده مخلوط وقتی که با یکدیگر سازگار نباشند تحت تاثیر قرار می‌گیرد.

سنگدانه‌ها

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

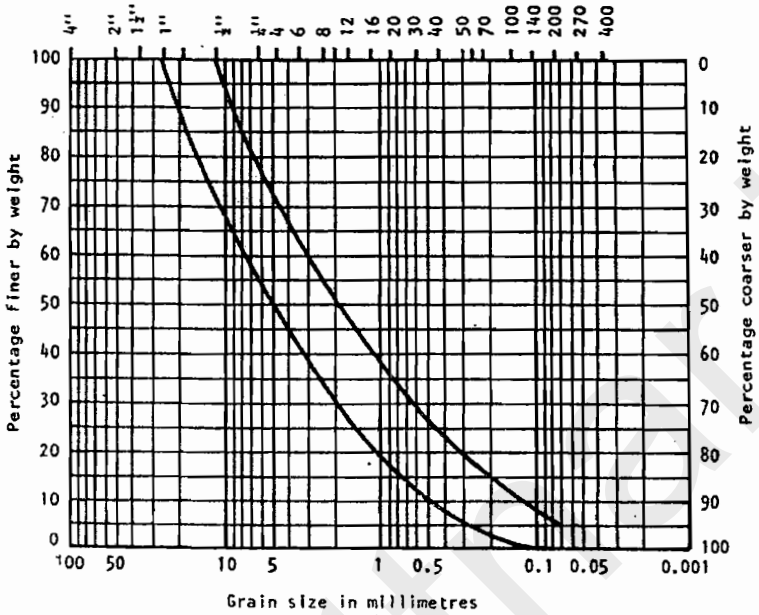
سنگدانه‌ها باید تمیز (clean)، سخت (hard)، سفت (tough)، محکم (strong) و بادوام (durable) باشد. نباید بیش از ۲٪ از مصالح سنگی از الک شماره ۲۰۰ (۰/۰۷۵mm) عبور نماید. سنگدانه‌ها باید عاری از مواد سیلتی و دانه های نرم یا پوشیده شده از مواد بوده و نیز میکا و مواد مضر قلیایی و آلی نباید درآن یافت شود. از مصرف سنگدانه‌های 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 می‌تواند 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 لوله‌های 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 می‌دهد.

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 می‌دهد. بنابراین باید راه حل بینابینی را برگزید و پیشنهاد می‌شود از شکل ۵-۱۶ بعنوان نقطه شروع در یافتن دانه بندی مناسب استفاده شود.



شکل ۵-۱۶- حدود دانه بندی پیشنهادی برای سنگدانه‌های 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 ومواد 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 می‌شوند. از مواد زودگیرکننده به منظور بهبود شرایط پخش شاتکریت، جلوگیری از ریخت و پاش و خصوصا وقتی شاتکریت در قسمتهای فوقانی و در سقف اجرا می‌گردد نیز استفاده می‌شود.

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

تعدادی مواد زودگیرکننده مخصوص برای استفاده در شاتکریت به بازار عرضه شده‌است و این مواد به مراتب سریع تر از مواد معمول زودگیرکننده مورد استفاده در بتن عمل می‌کنند. این مواد زودگیرکننده معمولا حاوی نمکهای قابل انحلال در آب شامل. کربنات سدیم، آلومینات سدیم و هیدروکسیدکلسیم می‌باشند. 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 دستور العملی که سازنده ارائه می‌دهد استفاده کرد. مواد زودگیرکننده هم بصورت مایع و هم بصورت پودر به بازار عرضه می‌شوند، 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 بطورمعمول ازمواد زودگیرکنندهاستفاده می‌شود.دربتن ریزی کف تونلها و در قسمت هایی که ضخامت شاتکریت یا بتن کم است و بتن ریزی روی سنگ خشک و تمیز انجام می‌شود یا شاتکریت روی سطحی انجام میشود که قبلا بتن ریزی شده‌است، 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 ومهندسی بر رفتار شاتکریت در مواردی که بعنوان حائل در سازه های زیرزمینی استفاده می‌شود تاثیر می‌گذارند. این مشخصات عبارتند از مقاومت فشاری، مقاومت چسبندگی، مقاومت خمشی، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته. وقتی از شاتکریت بعنوان حائل در سنگ‌های ضعیف استفاده می‌شود، دستیابی به مقاومت سریع فشاری در طول زمان ضروری است. نمونه‌ای از تغییرات مقاومت فشاری شاتکریت با زمان در جدول ۵-۳ آمده است.

جدول ۵-۳- نمونه‌ای از تغییرات مقاومت فشاری شاتکریت با زمان

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

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

۵-۸-۵ آماده‌سازی 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.

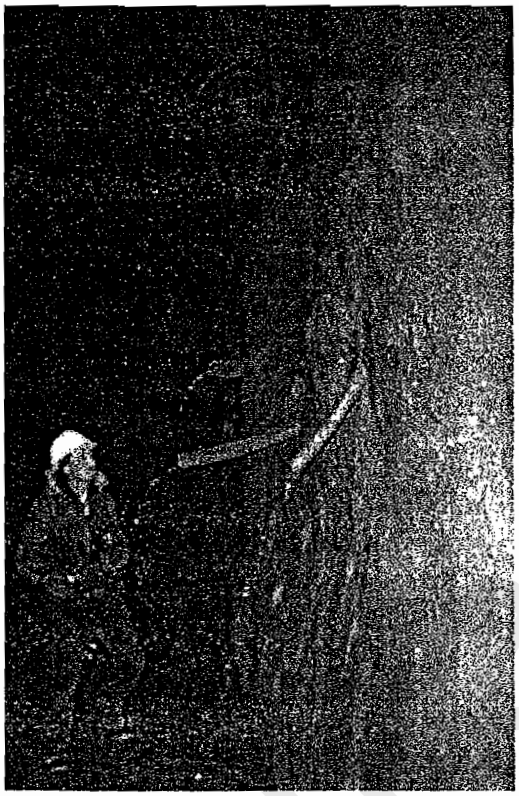
آماده سازی سطحی که باید شاتکریت شود از قسمت های اساسی کار است. لق‌گیری (scaling) سطح کار از نظر فراهم سازی ایمنی مجریان شاتکریت ونیز کاهش احتمال طبله کردن بتن بعلت پاشیدن آن در قسمت های سست، از اهمیت زیادی برخوردار است. روشن است که اگر سنگ خیلی ضعیف باشد. لق‌گیری ممکن است امکانپذیر نباشد و بتن پاشی باید 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 می‌گردد ممکن است مورد نیاز باشد تا باعث تکمیل عمل پایدارسازی بشود.

سطح کاری که قرار است شاتکریت شود باید عاری از هر گونه مواد خارجی یا مواد لق چسبیده به سطح باشد تا یکپارچگی و چسبندگی کامل بدست آید. گردو 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 می‌توان با دستگاه بتن پاش که با فشار معمول برای بتن پاشی (۰/۳ – ۰/۴MPa) تنظیم شده باشد، انجام داد. آب را باید به اندازه کافی در دستگاه وارد نمود تا کلیه مواد زائد ولق جدا شوند. شیپوره باید حدودا در فاصله یک تا دو متری از سینه کار قرار گیرد.

آماده سازی سطوح خیلی صاف و آیینه 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 می‌شود. با این تفاوت که شیپوره بتن پاشی با شیپوره مناسب ماسه پاشی تعویض می‌گردد. از آنجائیکه این عملیات از لحاظ صرف وقت و تامین مصالح گران تمام می‌شود، صرفا باید در شرایط خاص و پس از اینکه جت آب موثر واقع نشد مورد استفاده قرار گیرد.

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

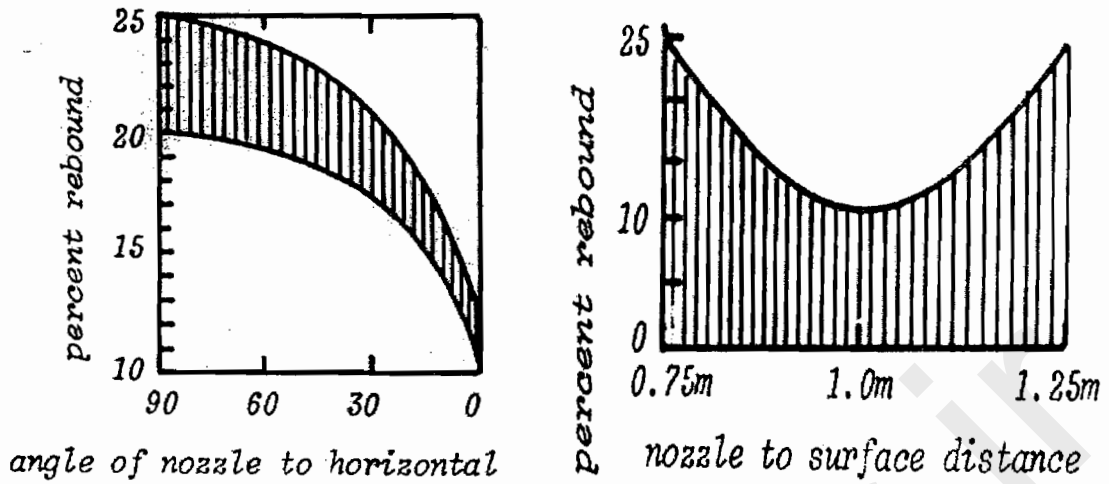
www.itnar.ir



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

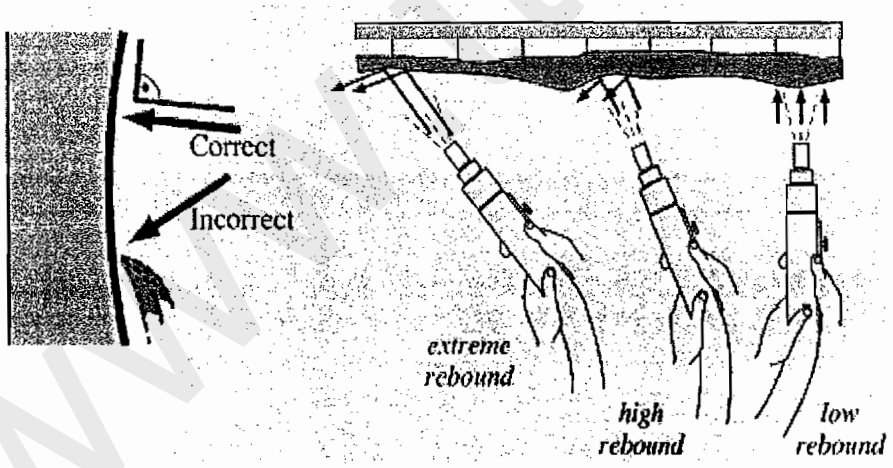
در صورتی‌که خروج آب از سطح مورد اجرا، محدود به نقاط مشخصی نباشد، قبل از اجرای شاتکریت حصیر الیافی متخلخلی (porous fibre mat) را می‌توان به سطح مورد اجرا نصب نمود. در ضمن اجرا، آب از طریق الیاف این حصیر زهکشی شده و از طریق نهر کنار تونل به بیرون هدایت می‌شود.

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



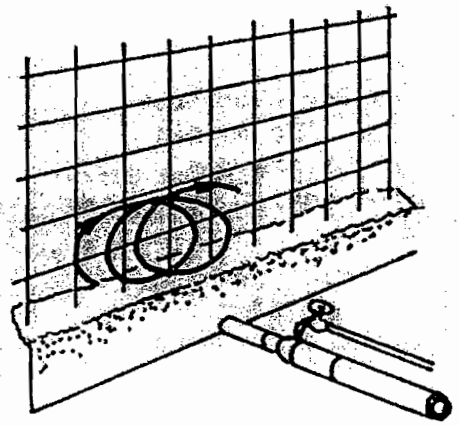
شکل ۵-۱۸- اثر فاصله و زاویه شیپوره بر ریخت وپاش شاتکریت

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 بحرکت 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 حلقه های دایره ای یا بیضی شکلی که رویهم را می‌پوشانند مطابق شکل ۵-۲۰ انجام پذیرد. طول حلقه‌های بیضی معمولا 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 دراجرای شاتکریت

هنگامیکه بتن پاشی روی توری های جوش شده انجام می‌شود، 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 میباشد. روش دیگر که خصوصا وقتی از دستگاه خودکار (ربات) برای بتن پاشی استفاده می‌شود، موفقیت آمیز است، تغییر زاویه شیپوره نسبت به سطح کار است. این کار با راندن بتن به پشت سیم ها از تشکیل حباب جلوگیری می‌کند.

ضخامت لایه شاتکریت عموما توسط حجم مصالح مصرف شده و با اضافه کردن ضریب مربوط به ریخت و پاش تعیین می‌گردد. وقتی که بتن پاشی روی سطوح خیلی نامنظم انجام می‌شود، 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 شده‌است. وقتی که تور سیمی‌جوش شده به سطح سنگ اضافه می‌شود می‌توان از آن بعنوان شاخص و وسیله اندازه گیری ضخامت شاتکریت استفاده کرد.

همچنین اگر از راکبولت در سیستم حائل سازه استفاده شده‌است می‌توان انتهای میله های راکبولت را روی سطح کارباقی گذاشت تا از آنها به عنوان شاخص اندازه گیری ضخامت شاتکریت استفاده کرد.
برخی از طراحان پیشنهاد می‌کنند 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 می‌شود.

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 قبلا بحث شد، می‌تواند براین مسئله غلبه نماید، لیکن نصب تور سیمی وقت گیر است و بنابراین گران تمام می‌شود. فکر استفاده از رشته های فولادی که مستقیما 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. بررسی ها 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.

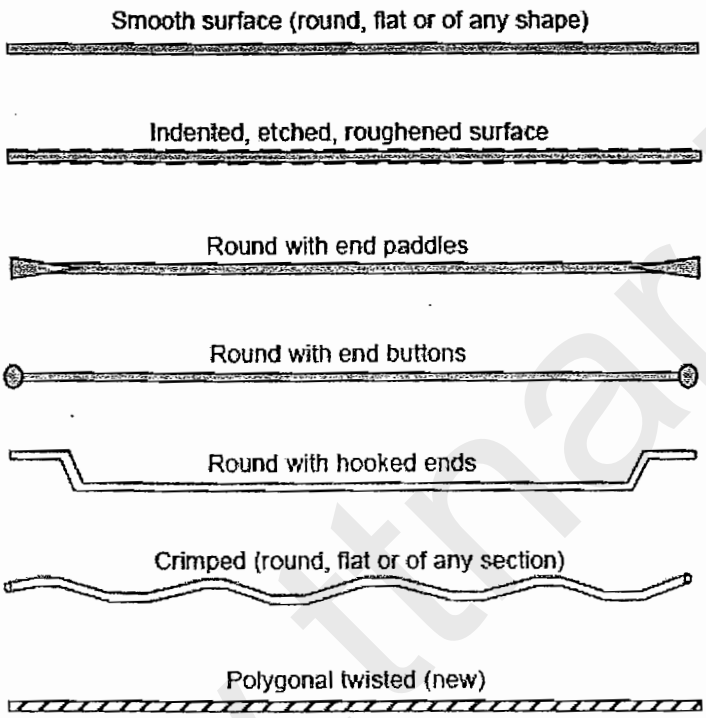
تحقیقات نشان می‌دهد که مخلوط کردن الیاف با بتن در دهانه شیپوره، اتلاف آنها را تا حدود ۱۵٪ کاهش داده و مشکلات مربوط به در هم پیچیده شدن الیاف را نیز کم می‌کند. در یک تحقیق مقاومت ۲۸ روزه شاتکریت مسلح با الیاف فولادی ۸Mpa بدست آمد که در مقایسه با شاتکریت غیر مسلح با مقاومت ۲-۵MPa قابل ملاحظه است .

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

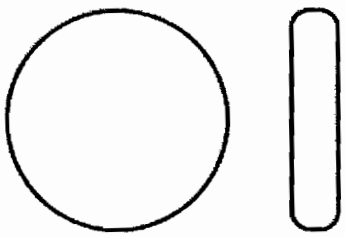
۱- سطح صاف (گرد، تخت یا اشکال دیگر)
۲- سطح زبر، آجدار و کنده شده
۳- گرد با انتهای پره‌ای
۴- گرد با انتهای دکمه‌ای
۵- گرد با انتهای قلاب دار
۶- موج دار (گرد، تخت یا اشکال دیگر)
۷- چند ضلعی تابیده شده (جدید)

www.tnar.ir

در برخی انواع الیاف، به منظور افزایش چسبندگی در مقیاس بسیار کوچک، سطح کنده کاری شده و یا با پلاسما 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



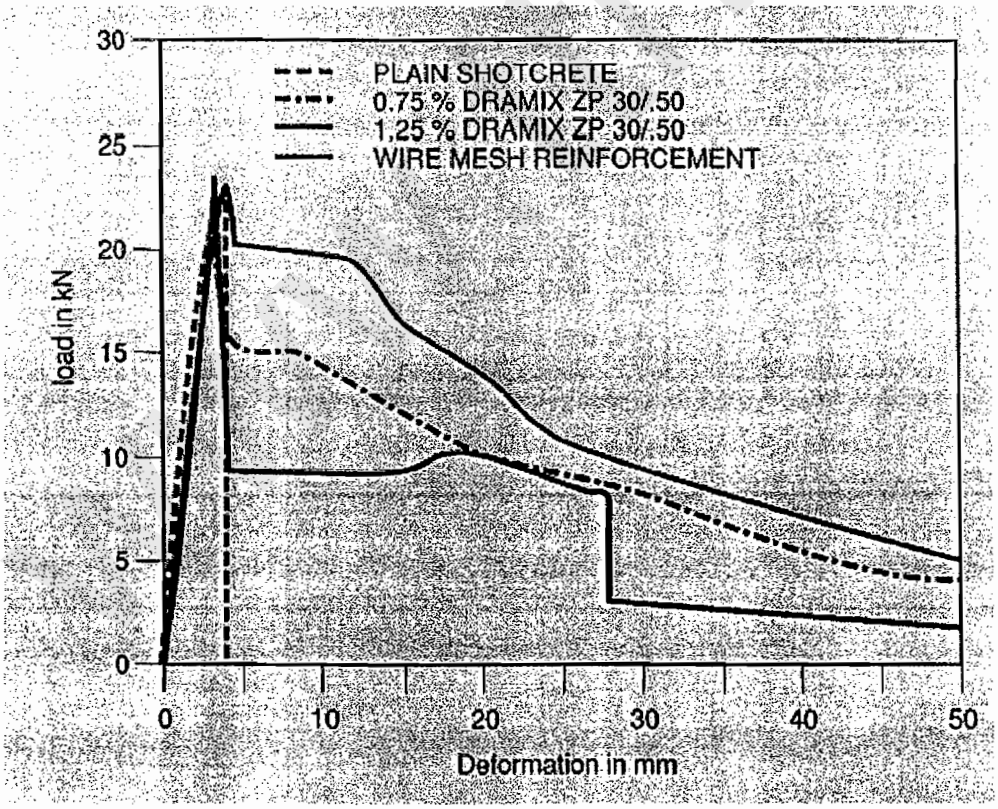
شکل ۵-۲۲- الیاف با شکل حلقه بسته

در جدول ۵-۴ نمونه طرح اختلاط شاتکریت مسلح شده با الیاف آورده شده‌است. 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.

www.itnar.ir

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

	مخلوط خشک		مخلوط تر	
	kg/m^3	درصد وزنی	kg/m^3	درصد وزنی
سیمان	۴۲۰	۱۹.۰	۴۲۰	۱۸.۱
دوده سیلیس	۵۰	۲.۲	۴۰	۱.۷
سنگدانه	۱۶۷۰	۷۵.۵	۱۶۰۰	۶۸.۹
الیاف فولادی	۶۰	۲.۷	۶۰	۲.۶
زودگیرکننده	۱۳	۰.۶	۱۳	۰.۶
روان کننده	-	-	۶ لیتر	۰.۳
کاهنده آب	-	-	۲ لیتر	۰.۱
مواد هوازا	-	-	در صورت لزوم	
آب	در شیپوره کنترل می‌شود		۱۸۰	۷.۷
مجموع	۲۲۱۳	۱۰۰	۲۳۲۱	۱۰۰



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 نظرگرفتن تجارب خود در زمینه کاربرد شاتکریت، توصیه‌هایی را در مورد کاربرد شاتکریت در شرایط مختلف توده‌سنگ بعمل‌آوردند که در جدول ۵-۵ خلاصه شده‌است.

www.ttnar.ir

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

مشخصات توده‌سنگ	رفتار توده‌سنگ	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 گل‌سنگها فرو بپاشد.	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 آتشباری.
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.	تامین نگهداری علاوه بر راکبولتها یا کابلهای مهاری موجود. آب‌بندی رخنمون سطوح لایه‌بندی ضعیف	استفاده از شاتکریت مسلح با الیاف فولادی به ضخامت ۵۰ میلیمتر بر روی سطوح سنگ که در آن آثار ناپیوستگی مشخص است، با توجه خاص به آثار سطوح لایه‌بندی.
سنگ دگرگونی یا سنگ آذرین درزه‌دار، شرایط تنش بالا	ترکیب شکستهای ساختاری و تنشی پیرامون محدودهٔ تونل	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.

www.tunnel.ir

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 فشارندگی	کنترل فشارندگی و شکستگی توده‌سنگ	اجرای هرچه سریعتر شاتکریت مسلح به الیاف فولادی به ضخامت ۷۵ میلیمتر بر روی سطوح تمیز سنگ، نصب راکبولت همراه با صفحه پیشانی، اجرای لایه دوم شاتکریت به ضخامت ۷۵ میلیمتر.
سنگ دگرگونی یا آذرین، با درزه‌های زیاد، شرایط تنش پایین	ریزش گوه‌ها و بلوکهای کوچک ناشی از برخورد صفحات درزه	جلوگیری از ریزش 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، راکبولت 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 راکبولت و میل‌مهار استفاده کرد. اجرای شاتکریت مسلح به الیاف فولادی به ضخامت ۷۵ میلیمتر بر روی آثار صفحات لایه‌بندی قبل از نصب راکبولت.
سنگهای بسیار پر درزه دگرگونی یا آذرین، کنگومرا یا سنگ سیمانی شده، شرایط تنش بالا	فشارندگی و جریان پلاستیک توده‌سنگ در اطراف فضای زیرزمین	کنترل شکستگی و انبساط توده‌سنگ	اجرای هرچه سریعتر شاتکریت مسلح به الیاف فولادی به ضخامت ۱۰۰ میلیمتر و نصب راکبولت همراه با صفحه پیشانی. اجرای لایه دوم شاتکریت اضافی به ضخامت ۵۰ میلیمتر در موارد ضروری، در صورت لزوم، سیستم نگهداری تا پایین دیواره‌های جانبی ادامه یابد.
سنگ رسوبی بسیار پر درزه با سطوح پوشیده از رس، شرایط تنش بالا	فشارندگی 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 قابهای فولادی سبک در مکانهای ضروری. سپس اجرای لایه دوم شاتکریت مسلح به الیاف فولادی برای پوشش دادن قابها یا شبکه. ممکن است استفاده از سیستم پیش نگهداری و پیش 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 فشارندگی و تورم ممکن باشد. بعد از حصول پایداری باید فضای خالی را پر نمود.
شرایط ترکش (rockburst) سنگ ملایم در توده‌سنگ متراکم 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 راکبولت یا کابل مهاری به طور محکم به سنگ متصل شده است.

www.tinari.ir

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 حلقهٔ 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 معمولا از بتن مسلح ساخته می‌شوند دارای میلگرد در داخل قطعات نبود.

استفاده از قطعات بتنی بعدا 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 تهیهٔ 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 (.

۵-۹-۲ مشخصات پوشش

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

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

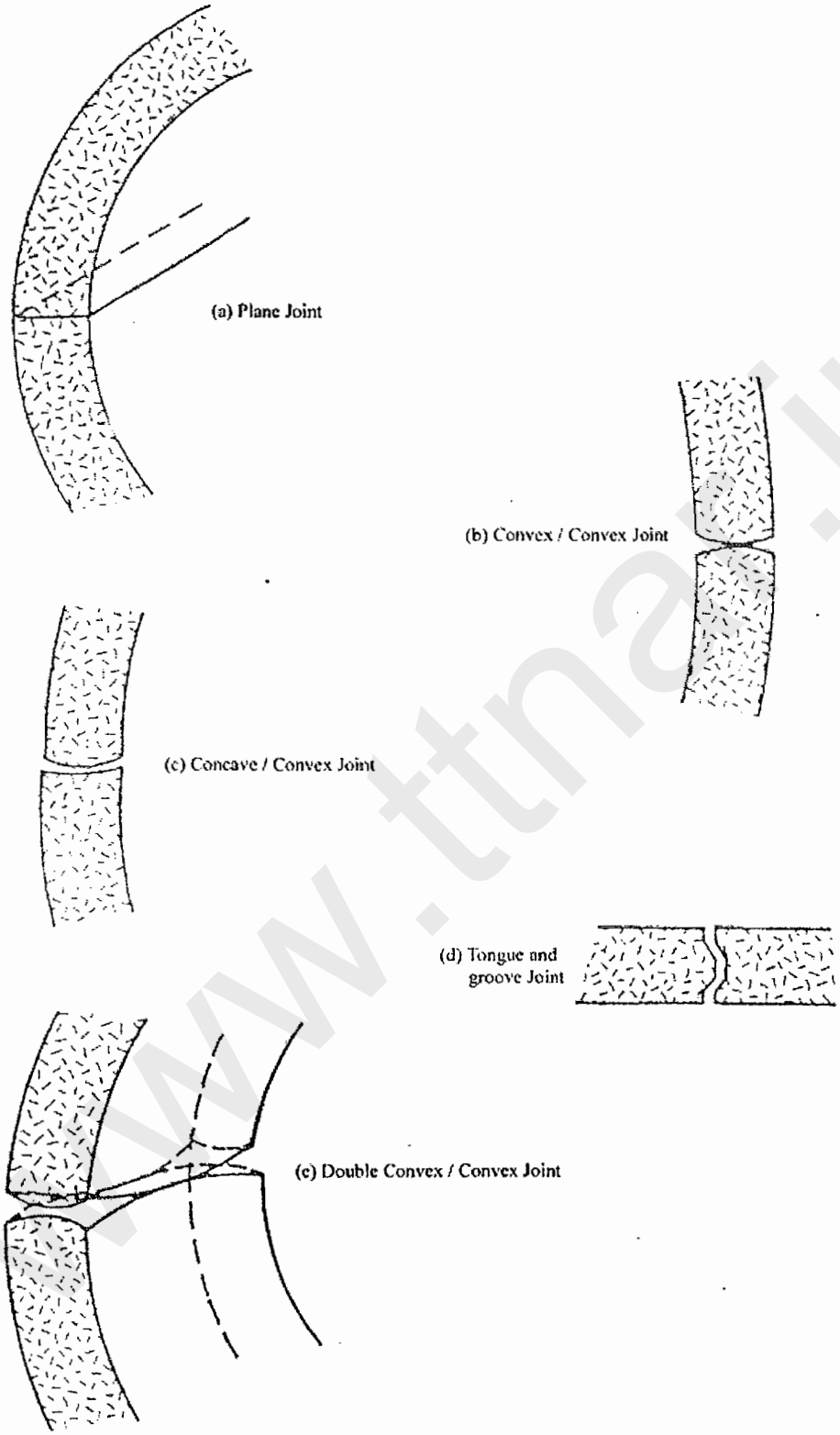
۵-۹-۳ اتصالات قطعات بتنی

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

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

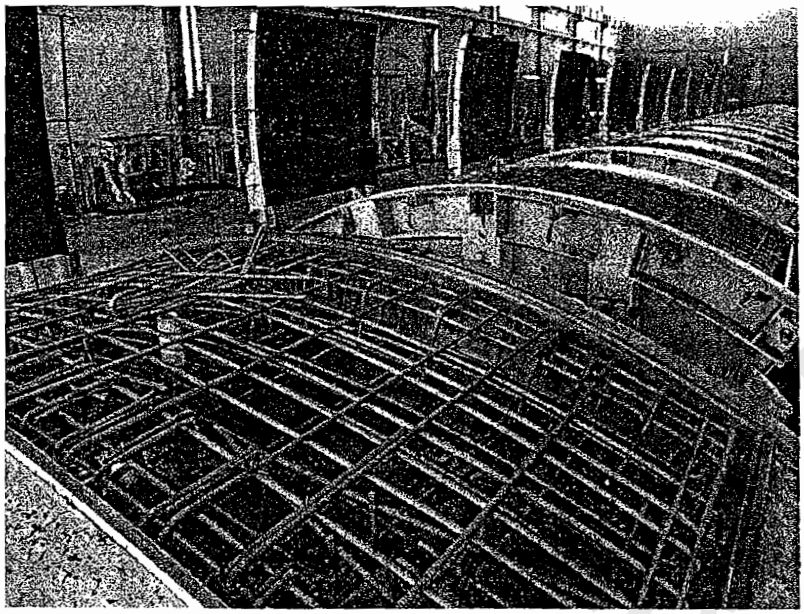
در شکل ۵-۲۵ و ۵-۲۶ دو تصویر مربط به سگمنت بتنی نشان داده شده‌است.

www.tunnel.ir

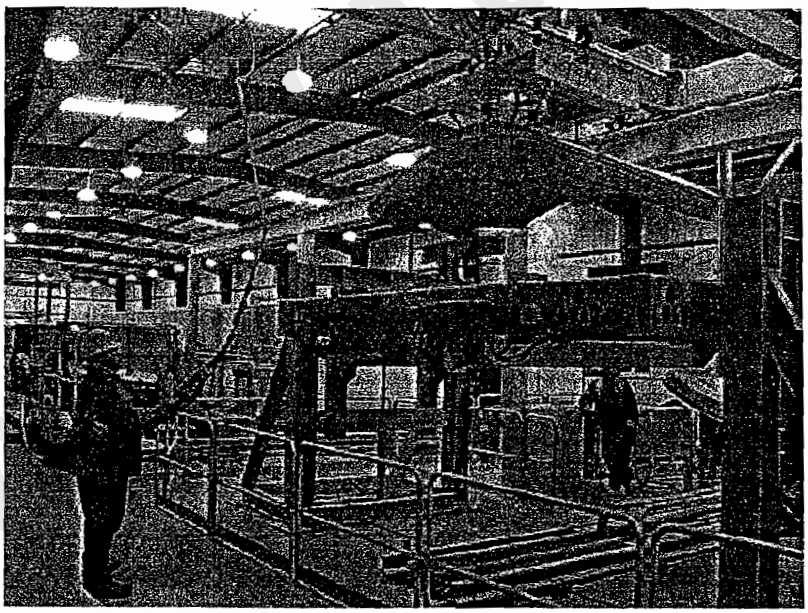


شکل ۵-۲۴- انواع اتصالات مورد استفاده در پوشش قطعاتی

www.ttnai.ir



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 کاربردشان 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 معمولا 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 ذیلا نحوه استفاده از این روش‌ها برای تعیین حائل مورد نیاز تونل‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

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

- روش مورد استفاده برای حفاری تونل، روش چالزنی و انفجار می‌باشد.
- شکل مقطع تونل نعل‌اسبی و دهنه آن ۱۰ متر می‌باشد.
- تنش برجای قائم (insitu vertical stress) توده سنگ محل حفاری تونل کمتر از۲۵ مگاپاسکال می‌باشد (معادل عمق حدود ۹۰۰ متری از سطح زمین).

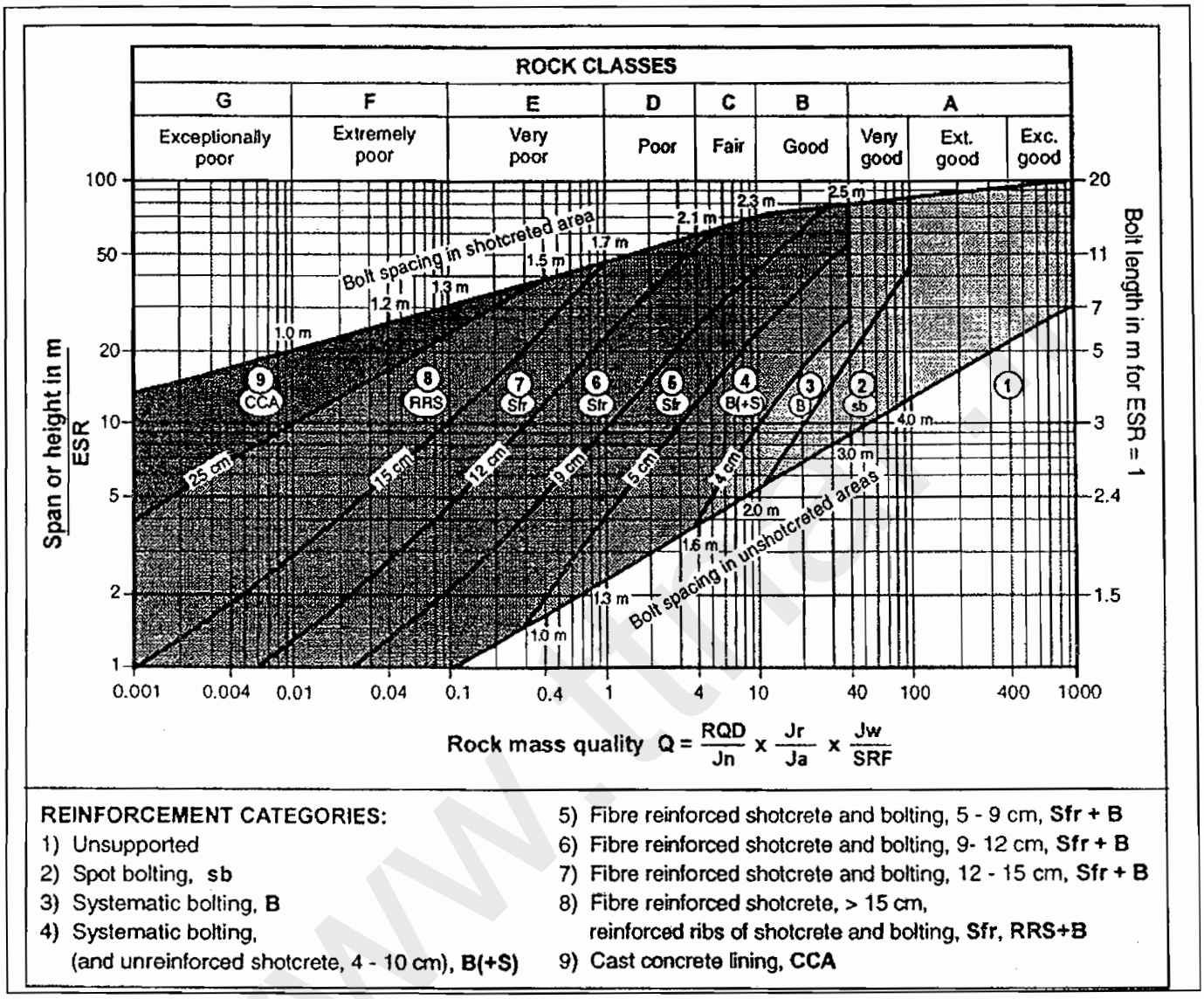
در صورت استفاده از روش حفاری مکانیزه برای حفاری تونل، استفاده از توصیه‌های روش RMR برای حائل‌بندی تونل، مقداری دست‌بالا خواهد بود زیرا در روش حفاری مکانیزه آسیب بسیار کمتری به سنگ پیرامون تونل وارد می‌شود. بنابراین در این حالت می‌توان تا حدی حائل پیشنهادی توسط روش RMR را در جهت کاهش آن تعدیل نمود.

در سیستم Q برای انتخاب حائل مورد نیاز، می‌توان از نموداری که به همین منظور ارائه شده‌است استفاده نمود (شکل ۵-۲۷). با داشتن مقدار Q و دهنه یا ارتفاع تونل و نیز با در نظر گرفتن مقدار مناسب برای 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 گرفته‌می‌شود.

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

سیستم حائل			مراحل حفاری	طبقهٔ توده سنگ
قاب‌های فولادی (steel sets)	شاتکریت	راکبولت (به قطر ۲۰میلیمتر که بطور کامل تزریق می‌شود)		
معمولا حائل مورد نیاز نیست، ولی بعضا راکبولت بصورت موضعی و محلی (spot bolting) لازم است.			حفاری مقطع در یک مرحله- ۳ متر پیشروی	سنگ خیلی خوب I RMR: 81-100
لازم نیست	در صورت لزوم ۵۰ میلیمتر در تاج	راکبولت در مناطقی از تاج به طول ۳ متر و با فواصل ۲/۵ متر و بعضا همراه با توری سیمی	حفاری مقطع در یک مرحله، ۱ تا ۱/۵ متر پیشروی، نصب حائل تا ۲۰ متری سینه کار	سنگ خوب II RMR: 61-80
لازم نیست.	۵۰-۱۰۰ میلمتر در تاج، ۳۰ میلیمتر در دیواره ها	استفاده از راکبولت بصورت منظم با طول ۴ متر و با فاصله بندی ۲ تا ۱/۵ متر در تاج و دیواره ها وتوری‌سیمی در تاج.	حفاری بصورت طاق و سکو (top heading & bench) ۳-۱/۵ متر پیشروی در طاق، پس از هر مرحله آتشکاری حائل نصب شود، حائل تا ۱۰ متری سینه کار تکمیل شود.	سنگ متوسط III RMR: 41-60
قاب‌های فولادی سبک تا متوسط با فاصله بندی ۱/۵ متر در صورت نیاز	۱۰۰-۱۵۰ میلیمتر در تاج، ۱۰۰ میلیمتر در دیواره ها	استفاده از راکبولت به طول ۴ تا ۵ متر بصورت شبکه منظم با فاصله بندی ۱ تا ۱/۵ متر در تاج و دیواره ها همراه با توری سیمی	حفاری بصورت طاق و سکو (top heading & bench) ۱/۵-۱ متر پیشروی در طاق، همزمان با آتشکاری حائل تا ۱۰ متری سینه کار نصب شود.	سنگ ضعیف IV RMR: 21-40
قاب‌های فولادی متوسط تا سنگین با فاصله بندی ۰/۷۵ متر با میان‌قاب‌های فولادی (steel lagging) و در صورت لزوم پیش‌مهار (forepoling)، کف تونل بسته و مهار شود.	۱۵۰-۲۰۰ میلیمتر در تاج، ۱۵۰ میلیمتر در دیواره ها و ۵۰ میلیمتر در سینه کار	راکبولت به طول ۵ تا ۶ متر بصورت شبکه منظم و فاصله بندی ۱ تا ۱/۵ متر در تاج و دیواره ها همراه با توری سیمی، استفاده از راکبولت در کف (invert).	حفاری چند مرحله ای (multiple drifts)، ۱/۵-۰/۵ متر پیشروی در راس، حائل را همزمان با حفاری نصب کنید. بتن پاشی به محض انجام آتشکاری انجام شود.	سنگ خیلی ضعیف V RMR <20

www.tmar.ir



شکل ۵-۲۷- راهنمای حائل‌بندی تونل‌ها در سیستم Q

۶- استفاده از ابزاربندی برای رفتارنگاری تونل‌ها

۶-۱ تاریخچهٔ ابزاربندی

ابزاربندی‌های ژئوتکنیکی طی سالهای ۱۹۳۰-۱۹۴۰ برای کمک به مشاهدات صحرایی و محلی بوجود آمد. در ۵۰ سال اول، فقط تعدادی روش مشخص برای ابزاربندی و اندازه گیری بکار می‌رفت در سالهای اخیر با پیشرفت تکنولوژی و افزایش نقش و حساسیت اندازه گیریهای ژئوتکنیکی، وسایل پیچیدهٔ الکتریکی و پنوماتیکی پا به عرصه گذاشته و رایج گشته‌اند. در عین حال این تکنولوژی پیشرفته نیاز فزاینده‌ای به مهارتهای ژئوتکنیکی دارد که متاسفانه امروزه تعداد زیادی از برنامه های ابزاربندی در دست افرادی است که آشنایی کافی با هدف و منظورهای این اندازه گیریها ندارند و در نتیجه، این ابزاربندیها و اندازه‌گیریها در مقایسه با سالهای آغازین، بعضا 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، کلیهٔ پارامترهای مهم طرح مورد بررسی قرار گرفته و در صورت لزوم بازنگریهای لازم در طرح و نحوهٔ عملیات اجرائی اعمال می‌گردد.

تأیید طراحی : ابزارها برای تایید 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 اولیهٔ یک پروژه حاصل شده باشند، ممکن است احتیاج (و یا مجال) تغییر در طراحی برای مراحل بعدی پروژه را آشکار سازند.

کنترل نحوهٔ عملیات اجرائی : 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 تامین پایداری صحیح است یا نه.

حمایت قانونی: داده‌های ابزار دقیق به عنوان شاهدی 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 بهره برداری تهیه می‌شوند.

www.tunnel.ir

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 مقایسهٔ آن با مفروضات طراحی می‌باشد. در صورت افزایش مقدار یک پارامتر از مقدار پیش فرض، آگاهیهای لازم برای شروع یک حادثهٔ ناخواسته به وجود آمده و راه های پیشگیری و کاهش زیانها به مرحلهٔ اجرا درمی‌آید.

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

۶-۳ لزوم ابزاربندی

رفتارسنجی در مرحلهٔ 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 زمینهٔ تکنولوژی و ساخت وسائل اندازه‌گیری و ابزار دقیق صورت گرفته است، بهترین و مطمئن ترین راه به منظور کنترل ایمنی طرح در زمان ساخت و بهره برداری، استفاده از سیستم رفتارسنجی است به طوری که امروزه بهره گیری از سیستم های ابزار دقیق، یکی از ضروریات اصلی طرحهای عمرانی مهم از جمله تونل‌ها قلمداد می‌شود.

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

۶-۴ 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.

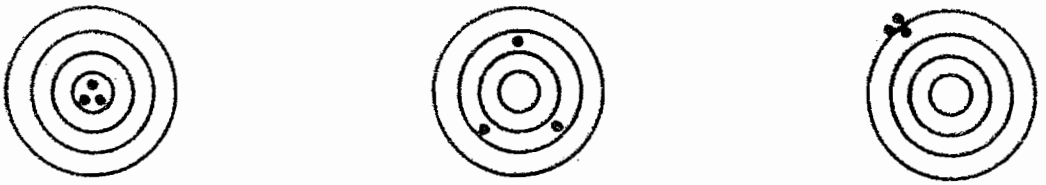
۶-۵ خطا و عدم اطمینان در اندازه گیری

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 می‌شود.

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 اندازهٔ 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 پیزومترها نباید با ایجاد مسیرهای زهکشی باعث افت فشار آب حفره‌ای در مکانهای دیگر شوند. بدلایل فوق، تطابق یکی از عوامل موثر در دستیابی به دقتهای زیاد خواهد بود.

صحت (accuracy): صحت، فاصلهٔ مقدار اندازه گیری شدهٔ یک پارامتر را با مقدار واقعی آن بیان می‌کند. صحت یک وسیله طی کالیبراسیون آن، که مقدار واقعی پارامتر مورد بررسی توسط یک وسیلهٔ دیگری که صحت آن مشخص و تعیین شده است، مشخص می شود. معمولاً صحت بصورت یک مقدار ± دار بیان می شود. صحت ۱± میلیمتر یعنی اینکه مقدار اندازه گیری شده در محدودهٔ یک میلیمتری مقدار واقعی است و صحت ٪۱± بمعنی اینست که مقدار اندازه گیری شده در محدودهٔ یک درصدی مقدار واقعی است. هنگام انتخاب هر وسیلهٔ اندازه گیر با صحت مشخص، صحت کل سیستم و صحت تک تک اجزاء آن باید مورد توجه قرار گیرد.

دقت (precision): دقت، فاصلهٔ هر یک از مقادیر اندازه گیری شده به میانگین آنها می باشد و همان تکرارپذیری(repeatability) می باشد. معمولاً دقت بصورت یک مقدار ± دار بیان می شود. تعداد ارقام معنی دار در هر اندازه‌گیری، دقت آنرا نشان می دهد؛ بعنوان مثال دقت ۱/۰۰± بیشتر از دقت ۱/۰± است و بالعکس مقدار هر اندازه گیری، دقت دستگاه و وسیلهٔ استفاده شده را نشان می دهد. همچنین تعداد ارقام معنی دار نمی‌تواند صحت اندازه گیری را مشخص کند. تفاوت دقت و صحت در شکل ۶-۱ نشان داده شده است. مرکز دوایر 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 ولی نادرست　　غیردقیق ولی بطور متوسط صحیح　　دقیق و صحیح

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 نمی‌شود. ریزی دستگاههای دیجیتالی، به اندازهٔ افزایش آخرین رقم آنهاست.

حساسیت (sensitivity): حساسیت در حقیقت میزان واکنش یک وسیله یا وارسان در برابر مقدار ورودی به آن می باشد، بعنوان مثال حساسیت یک وارسان اختلافی خطی(LVDT) که برای تغییرشکل سنگها مورد استفاده قرار می‌گیرد، حدود ۱۰۰۰ میلی ولت به ازاء هر اینچ(mV/in.) است. حساسیت بالا نمی تواند دلیلی بر دقت و یا صحت بیشتر باشد و وسیلهٔ 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 تجربهٔ کم می‌باشند و شامل قرائت غلط، ثبت غلط، خطاهای محاسباتی، نصب اشتباه، عدم آشنایی با دستگاه قرائت و اتصلات الکتریکی غلط می باشند. این خطاها با تکرار قرائت، تعدد اپراتور، مقایسهٔ 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، هیسترزیس و خطی بودن می باشند. این خطاها را میتوان کالیبراسیونهای دوره ای و مقایسهٔ نتایج با استانداردها کم کرد.

۳. خطاهای محیطی(environmental errors): این خطاها ناشی از گرما، رطوبت، لرزش، ضربه، فشار، خوردگی و غیره می باشند. که میتوان آثار ناشی از عوامل فوق الذکر را اندازه گیری کرده و ضرایب اصلاحی اعمال نمود و یا از وسایلی که کمتر تحت تاثیر عوامل محیطی

قرار می‌گیرند، استفاده کرد. بطور کلی توصیه میشود شرایط محیطی بهمراه 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، ارائهٔ برنامهٔ 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 مسئلهٔ مهندسی دیگری، نیازمند تعریف دقیق از مسئلهٔ مورد نظر است و پس از آن با برداشتن گامهای مشخص، پاسخ مسئلهٔ مذکور مشخص می‌گردد که شامل ارائهٔ دقیق جزئیات، نقشه های اجرائی، تعیین دقیق کیفیت اجرا و حتی روش اجرا و تعیین مشخصات فنی دستگاه ها می‌باشد. طرح ریزی یک سیستم ابزار دقیق باید به گونه ای باشد تا این اطمینان حاصل شود که اطلاعات مورد نیاز هم درحین دورهٔ ساختمان و هم در دورهٔ 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

www.tfnar.ir

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. تهیهٔ برنامهٔ کاری در زمینهٔ نصب ابزار و قرائت آنها

www.ttnar.ir

۶-۸ چند نمونه از وسایل اندازه‌گیری در تونل‌ها

اندازه گیری هایی که در حین اجرای انجام می‌شود 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 مرحله‌ای برسند که خیلی گران تمام شود یا از نظر اجرایی غیر ممکن باشد انجام شود. در بحث و بررسی پیرامون استفاده از ابزاربندی طی مراحل اجرایی تونل باید توجه نمود که ابزار مورد استفاده ساده و محکم باشند و به طریقی نصب شوند که تداخل با فعالیت های اجرایی به حداقل برسد.

۶-۸-۱ نقشه برداری نوری

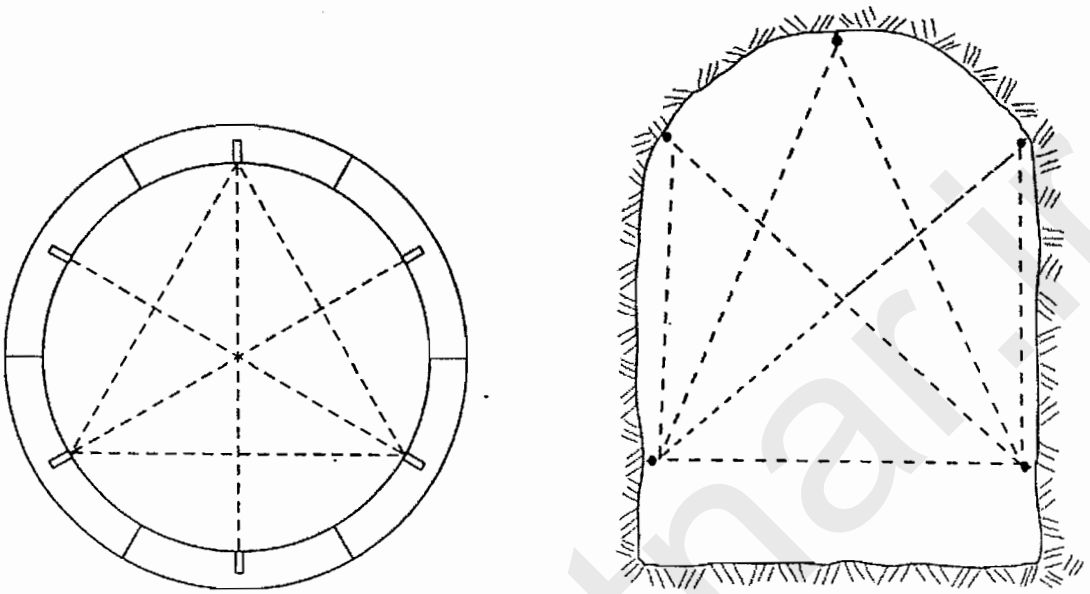
اندازه‌گیری جابجایی و تغییر مکان موثرترین وسیلهٔ کنترل و نظارت بر رفتار توده سنگ طی اجرای یک تونل است. روشهای متعددی برای کنترل و نظارت بر تغییر مکان ها و جابجایی توده سنگ موجود است که مهمترین آنها شامل نقشه‌برداری، استفاده از تقارب‌سنج‌ها برای اندازه‌گیری همگرایی تونل و بکارگیری انبساط‌سنج‌ها برای اندازه‌گیری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

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 می‌توان 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 درحدکیفیت موردنظرمعمولادرمحل موجوداست 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 معمولا تداخل می‌کند و بالاخره در تونل های بلند ممکن است از دقت کافی برای شناسایی جابجایی ها در توده سنگ سالم و سخت برخوردار نباشد.

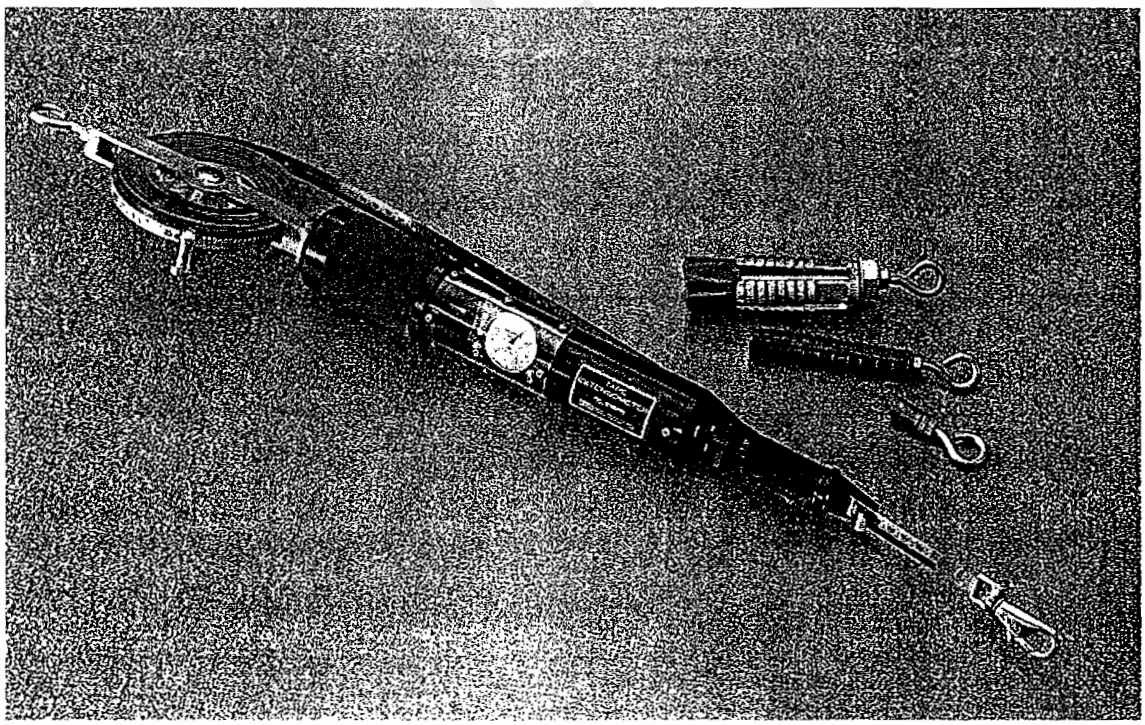
با ورود دستگاه های الکترونیکی- نوری برای اندازه گیری فاصله، کار نقشه برداران ساده‌تر شده است و می‌توان از محل ثابت دستگاه، فواصل آن تا تعدادی نشانه ها و علائم باز تابنده را که به طاق و دیواره های تونل وصل شده اندازه گیری کرد و از این طریق اطلاعات مفیدی بدست آورد.

۶-۸-۲ اندازه گیری همگرایی

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



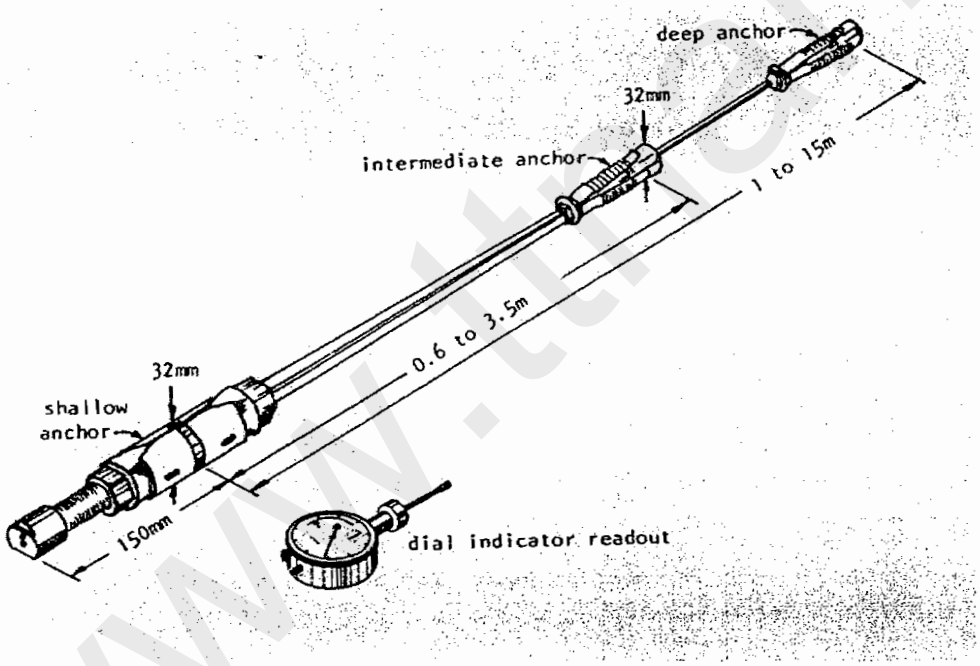
شکل ۶-۲- نمونه ای از اندازه گیری همگرایی در تونل‌ها- در شکل سمت راست نقاط نشانه در چالهای حفر شده در سنگ نصب شده و در شکل سمت چپ نقاط نشانه در سگمنت‌های بتنی تعبیه شده است.



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

۶-۸-۳ 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 شودکه اصطکاک در حداقل ممکن باقی می‌ماند. شکل ۶-۴ یک انبساط‌سنج ساده با دو محل مهار (anchor) را نشان می‌دهد.

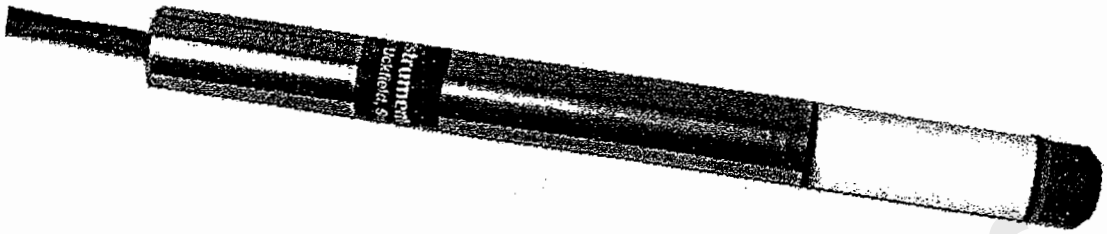


شکل ۶-۴- نمونه‌ای از انبساط‌سنج میله ای برای اندازه گیری جابجایی ها در توده سنگ اطراف تونل.

۶-۸-۴ 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 ۶-۵ 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

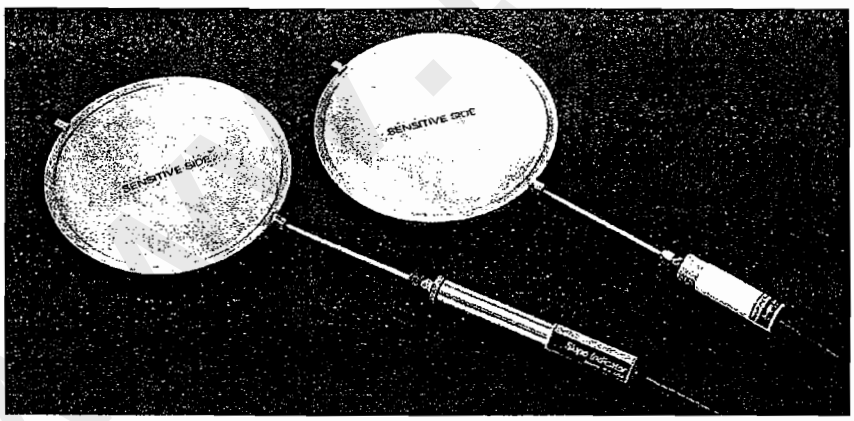
مقادیری که در مرحله طراحی در نظر گرفته شده‌بود مقایسه نمود ودر صورت تفاوت زیاد تمهیدات لازم را بعمل آورد.



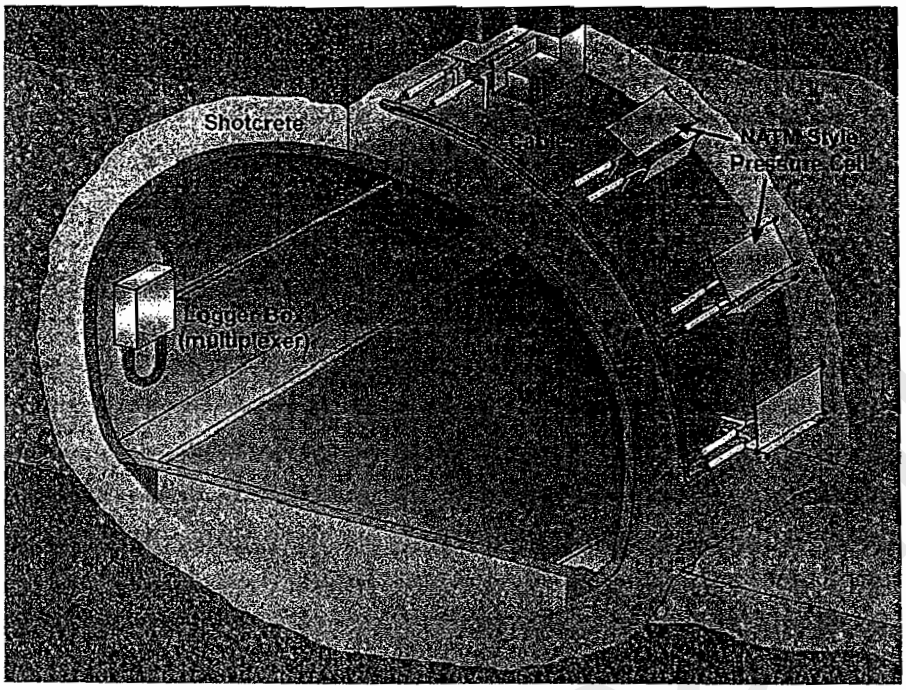
شکل ۶-۵- نمونه یک پیزومتر

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

با استفاده از سلول فشار کل، می‌توان میزان فشار کل وارده بر پوشش بتنی، شاتکریت و یا سگمنت‌های بتنی را اندازه گرفت. سلول فشار کل از دو صفحه که لبه آنها به هم متصل شده تشکیل می‌شوند. فاصله بین این صفحات با یک مایع تراکم ناپذیر پر می‌شود. در شکل ۶-۶ نمونه‌ای از سلول فشار کل نشان داده‌شده است. این سلول‌ها فشار وارد بر صفحات را در جهت عمود بر آنها اندازه‌گیری می‌کنند. در شکل ۶-۷ نمونه‌ای از نحوه نصب سلول‌های فشار کل در یک تونل نشان داده‌شده است.



شکل ۶-۶- نمونه سلول فشار کل



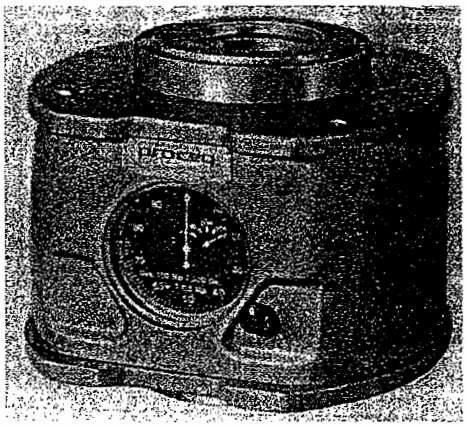
شکل ۶-۷- نمونه‌ای از نحوه نصب سلول‌های فشار کل در یک تونل

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)

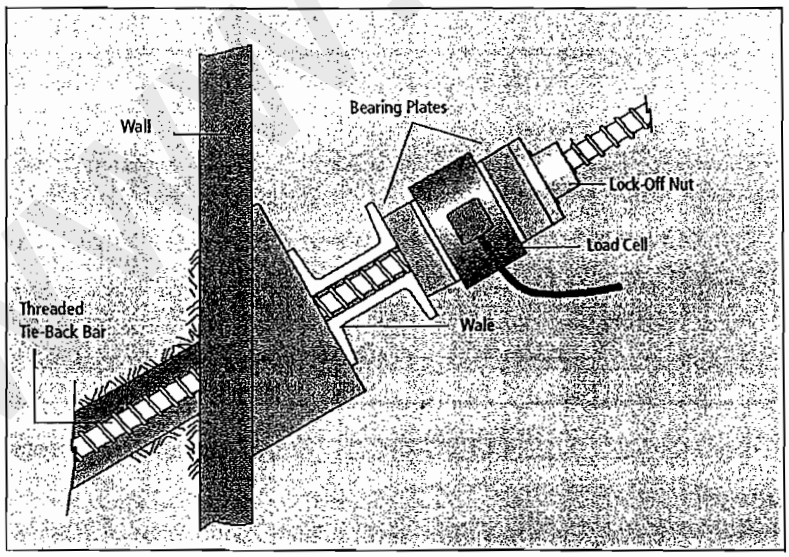
از سلول بار برای اندازه‌گیری میزان بار در راکبولت‌ها استفاده می‌شود. سلول‌های بار انواع مختلفی دارند. در شکل ۶-۸ یک سلول بارکه میزان بار وارده بطور مستقیم روی آن قابل قرائت است و در شکل ۶-۹ یک سلول بار دیگر که نیاز به دستگاه جداگانه‌ای برای قرائت میزان بار دارد، نشان داده شده است.

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 x89 x83	1077
90	42 x 89 x 83	2148
135	51 x 108 x 89	3225
135	76 x 127 x 114	3225
180	64 x 127 x 114	4303
180	89 x 152 x 140	4303
270	76 x 152 x 114	6451
270	102 x 168 x 152	6451

جدول ۶-۲- مشخصات سلول‌های بار شرکت Soil Instruments

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

www.tunar.ir

www.ttnar.ir