بسمه تعالی

جزوه

تونل سازی

دانشگاه

تهران

استاد

دکتر پلاسی

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.tunari.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 کامتر 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 موئی 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 درزه‌ی عرضی ضعیف گردند. در چنین سنگی شرایط پوسته پوسته شدن کاملا معمول است.

www.tnar.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)

www.ttnar.ir

- 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 1 تا 5 mm بازشدگی، درزهای ممتد	ضخامت مواد پرکننده تره بیش از 5mm ، یا بازشدگی بیش از5mm ، درزه‌ها ممتد
	امتیاز		۳۰	۲۵	۲۰	۱۰	۰
۵	آب زیر زمینی	جریان اب 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	اب قطره‌قطره می‌ریزد	آب جاری است
	امتیاز		۱۵	۱۰	۷	۴	۰

www.tmar.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 دهنه 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.itnan.ir

ادامه جدول ۱-۱ سیستم طبقه‌بندی RMR

و- راهنمای طبقه‌بندی وضعیت درزه‌ها

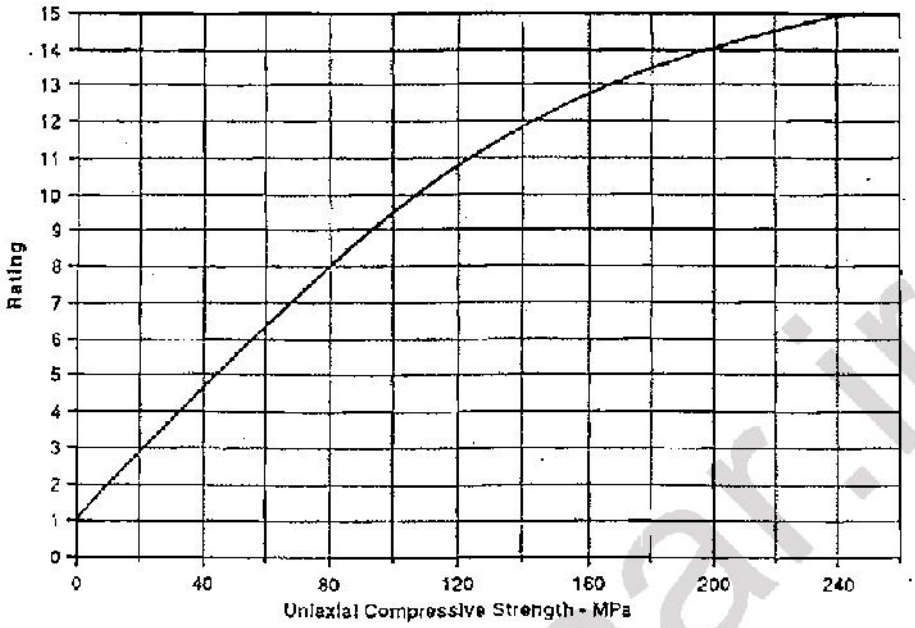
طول ناپیوستگی‌ها	< 1 m	۱-۳ متر	۳-۱۰ متر	۱۰-۲۰ متر	> ۲۰m
امتیاز	۶	۴	۲	۱	۰
جدا شدگی	بدون جداشدگی	< ۰.۱mm	۰.۱-۱	۱-۵	> ۵mm
امتیاز	۶	۵	۴	۱	۰
زبری	خیلی زبر	زبر	کمی زبر	صاف	آینه‌ای
امتیاز	۶	۵	۳	۱	۰
مواد پر کننده	بدون مواد پرکننده	< 5 mm مواد سخت	> 5 mm مواد سخت	< 5 mm مواد نرم	> 5 mm مواد نرم
امتیاز	۶	۴	۲	۲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

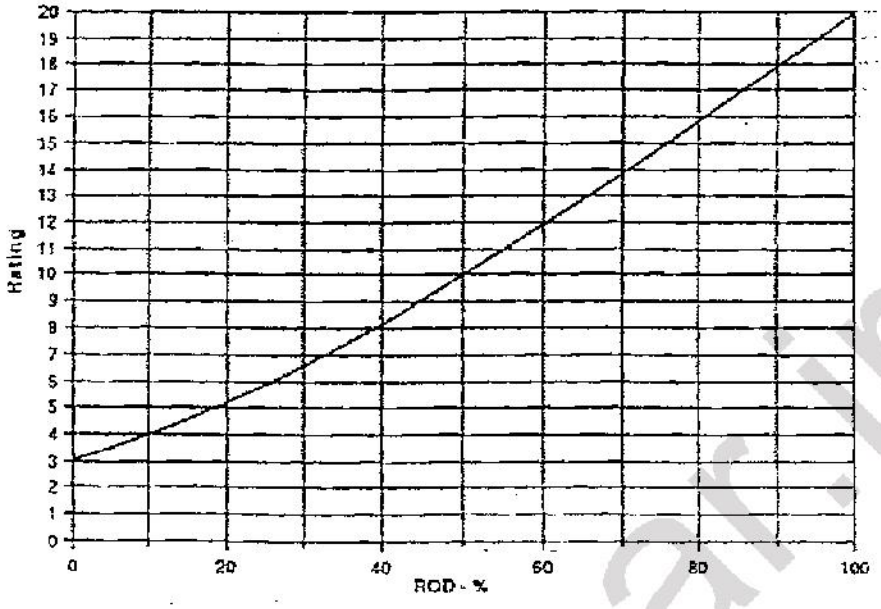
بدلیل ابهاماتی که در مورد استفاده از جدول ۱-۱ برای تعیین امتیاز مربوط به مقاومت فشاری، میزان RQD و فاصله درزه‌ها وجود داشت منحنی‌های شکل‌های ۱-۱ الی ۱-۳ برای دادن امتیاز به این پارامترها ارائه گردید.

www.ttnar.ir

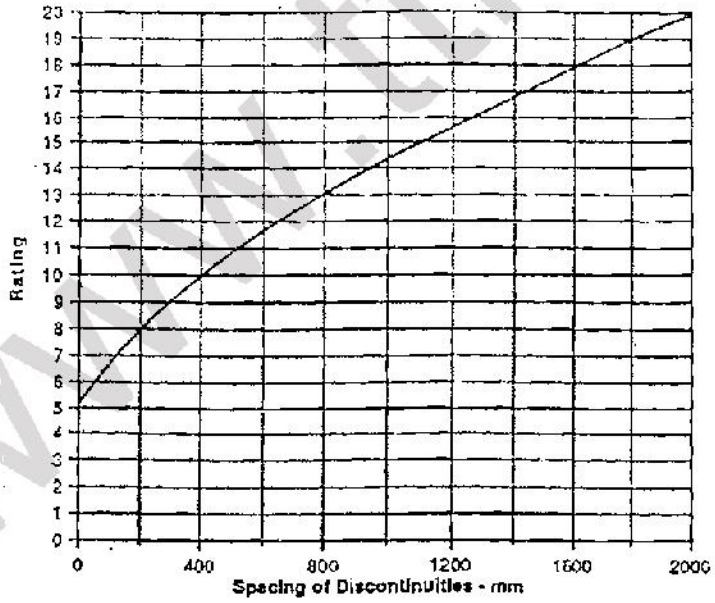


شکل ۱-۱- امتیاز مقاومت فشاری تک محوره

www.tunari.ir



شکل ۱-۲- امتیاز شاخص کیفیت سنگ



شکل ۱-۳- امتیاز فاصله درزه‌ها

www.tnar.ir

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:

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

که در آن :

RQD = شاخص کیفی سنگ

J_n = عدد دسته درزه (joint set number)

J_r = عدد زبری درزه (joint roughness number)

J_a = عدد دگرسانی درزه (joint alteration number)

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

SRF = ضریب کاهش تنش (stress reduction factor)

در جدول 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: ($۳\times J_n$)
D. دو دسته درزه	۴	
E. دو دسته درزه به‌اضافه درزه‌های اتفاقی	۶	۲- برای ورودی تونل J_n را در ۲ ضرب کنید: ($۲\times J_n$)
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	
I سنگ خردشده، خاک مانند	۲۰	
۳-عدد زبری درزه	**J_r**	
a دیواره درزه‌ها در تماس با یکدیگر و		
b دیواره درزه‌ها درتماس بایکدیگرقبل از ۱۰cm برش		
A. درزه‌های غیر ممتد	۴	۱ چنانچه فاصله بندی متوسط دسته درزه‌ها بزرگتر از ۳ متر باشد مقدار ۱ را به J_r اضافه کنید.
B. زبر و نامنظم، موجدار	۳	
C. صاف، موجدار	۲	
D. آینه ای، موجدار	۱/۵	۲- J_r=۰/۵-۳ را می توان برای درزه‌های مسطح و آینه ای که دارای لایه بندی باشند استفاده کرد به شرطی که لایه ها در جهتی قرار گرفته باشند که مقاومت حداقل باشد.
E. زبر یا نامنظم ، مسطح	۱/۵	
F. صاف، مسطح	۱	
G. آینه ای، مسطح	۰/۵	
c دیواره درزه‌ها وقتی برش اتفاق می افتد 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	۰/۷۵	
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 mm ۵ >)	۶/۰	(۱۶-۲۴)
H. پیش تحکیم شده متوسط یا کم، مواد پرکننده رسی نرم شونده، (ممتد ضخامت mm ۵ >)	۸	(۱۲-۱۶)
J. مواد پرکننده متورم شونده مانند مونت موری لونیت، (ممتد ضخامت mm ۵ >) مقدار J_a بستگی به درصد اندازه ذرات رس و میزان دسترسی به آب دارد)	۸/۰-۱۲/۰	(۶-۱۲)
c. دیواره درزه‌ها پس از برش در تماس باهم قرار نمی‌گیرند.		
K. نواحی یا نوارهای متلاشی‌شده یا خرد شده	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.tmar.ir

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

شرح	مقدار	ملاحظات
۵-ضریب کاهش آب درزه	J_w	(فشار تقریبی اب kgf/cm^2)
A. حفاری خشک یا 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 یا 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 *a. مناطق ضعیفی تونل را قطع می کند که ممکن است موجب سستی توده سنگ هنگام حفاری تونل شود.*	SRF	۱- این مقادیر SRF را چنانچه مناطق برشی تونل راقطع نمیکند بلکه فقط تحت تاثیر قرارمی دهد به میزان ٪ ۵۰-۲۵ کاهش دهید
A. وقوع متعدد مناطق ضعیف که حاوی رس یا سنگ خرد شده و تجزیه شده است، سنگ خیلی سست در اطراف تونل (درهر عمق)	۱۰	
B. مناطق ضعیف منفرد حاوی رس، یا سنگ تجزیه شده و هوازده (<۵۰m عمق حفاری)	۵/۰	۲- برای تنش در جای شدیدا غیرایزوتروپ (اگراندازه گیری شده است):
C. مناطق ضعیف منفرد حاوی رس، یا سنگ تجزیه شده و هوازده (>۵۰m عمق حفاری)	۲/۵	اگر $5<\frac{\sigma_1}{\sigma_3}<10$، مقدار σ_c را به $0.8\ \sigma_c$ و σ_t را به $0.8\ \sigma_t$ کاهش دهید.
D. مناطق برشی متعدد در سنگ سالم و خوب (بدون رس)، سنگ سست در اطراف تونل (هرعمقی)	۷/۵	وقتی $\frac{\sigma_1}{\sigma_3}>10$، مقدار σ_c و σ_t را به $0.6\ \sigma_c$ و $0.6\ \sigma_t$ کاهش دهید، مقاومت فشاری تک محوری و σ_t مقاومت کششی است (با نقطه ای). σ_1 و σ_3 تنش‌های اصلی بزرگترو کوچکترهستند.
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 جبه قند مانند (هرعمقی)	۵	

www.tnar.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	
σ_t/σ_1 σ_c/σ_1		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).
>۱۳ >۲۰۰		
J. تنش متوسط ۱۰-۲۰۰ ۰/۶۶-۱۳	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 سرپالایی 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 .

www.itnar.ir

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.tinar.ir

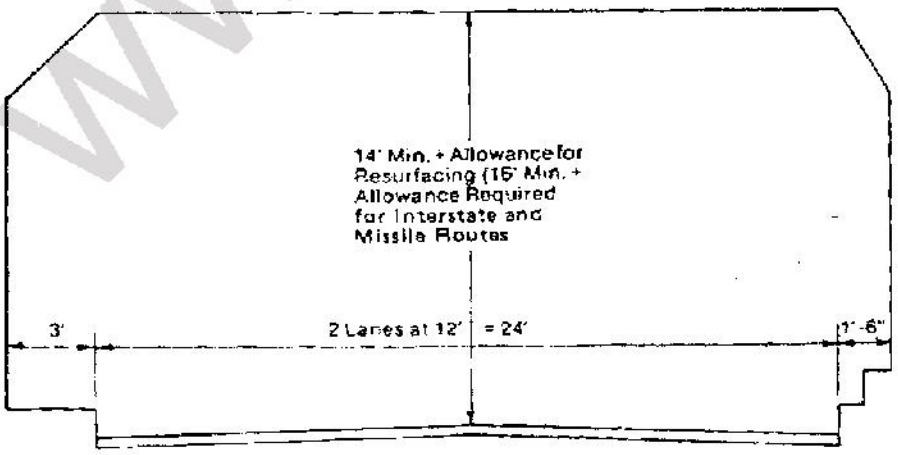
۱- در تونل با مقطع منحنی حداقل عرض پیاده رو ۶۰ سانتی متر باشد.
۲- در تونل با دیواره قائم حداقل عرض پیاده رو ۷۵ سانتی متر باشد.
۳- حداقل ارتفاع پیاده رو از لبه راه ۲۰ سانتی متر و حداکثر آن ۴۰ سانتی متر باشد.

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

www.tfnar.ir

۲-۳ مسیر تونل‌های راه در پلان

در تعیین فصله 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.tnar.ir

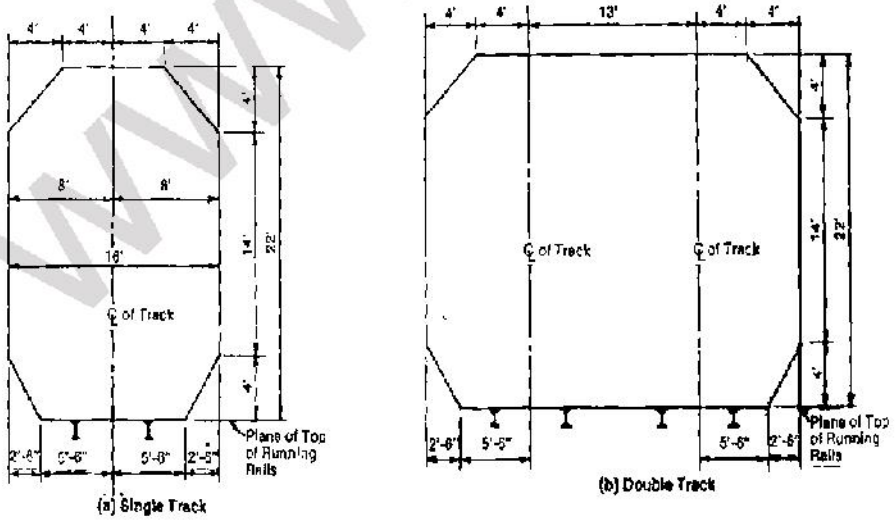
۲-۵ نیم رخ عرضی تونل‌های راه‌آهن

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

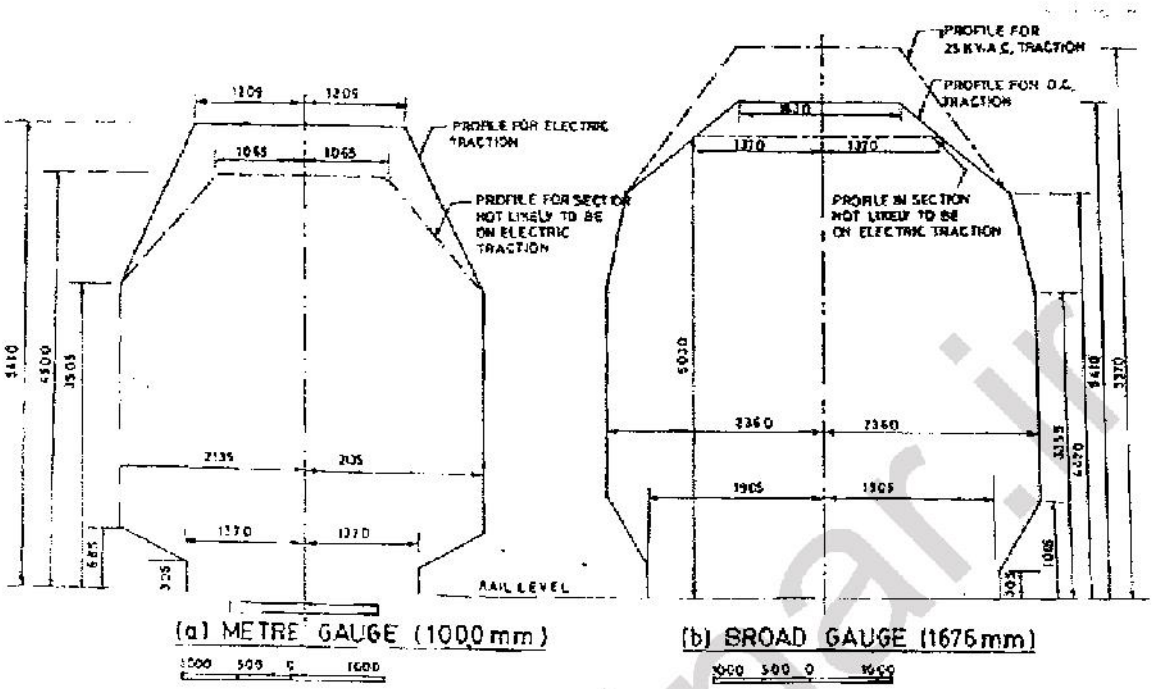
	نام کشور	عرض تونل (m)	ارتفاع طاق تونل تا بالای ریل(m)
تونل‌های دو خطه (double track)	ایتالیا	۸.۰۰	۶.۰۰
	فرانسه	۸.۰۰	۵.۸۰
	آلمان	۸.۲۰	۶.۲۰
	استرالیا	۸.۲	۶.۴۰
تونل‌های تک خطه (single track)	ایتالیا	۴.۶۰	۵.۰۰
	استرالیا	۵.۵۰	۵.۰۰
	سویس	۵.۲۰	۵.۸۰
	هند	۴.۷۲	۶.۰۰

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.tnar.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.

www.tunari.ir

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، نور 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.tunar.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 .

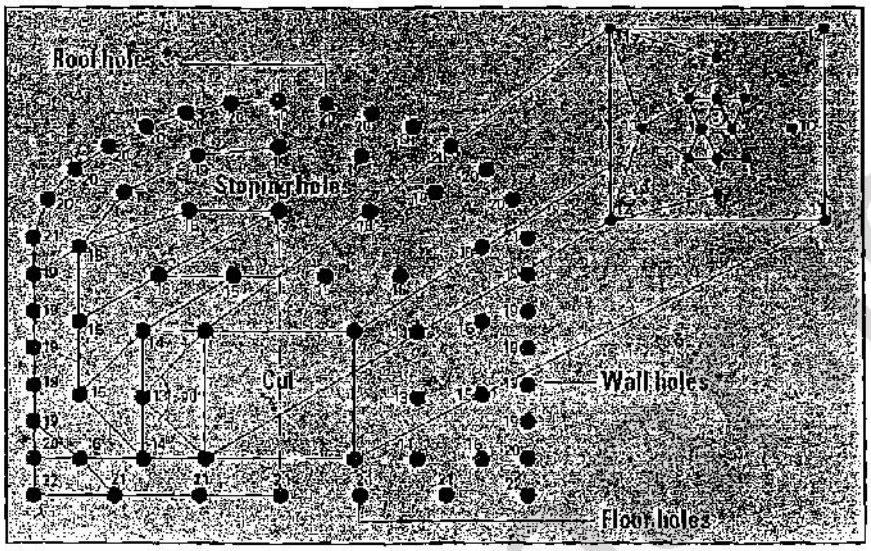
۳-۱-۱ الگوی چالزنی

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.

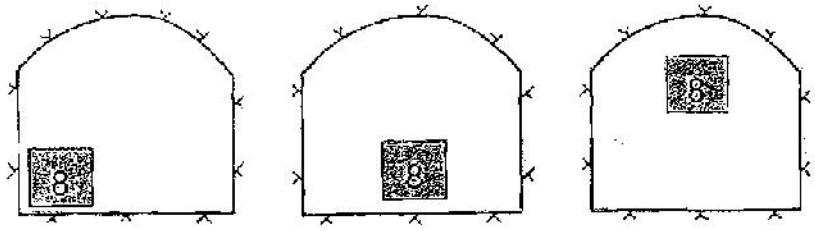


شکل ۳-۱- یک نمونه الگوی چالزنی و ترتیب انفجار چالها

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 جبههٔ 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.

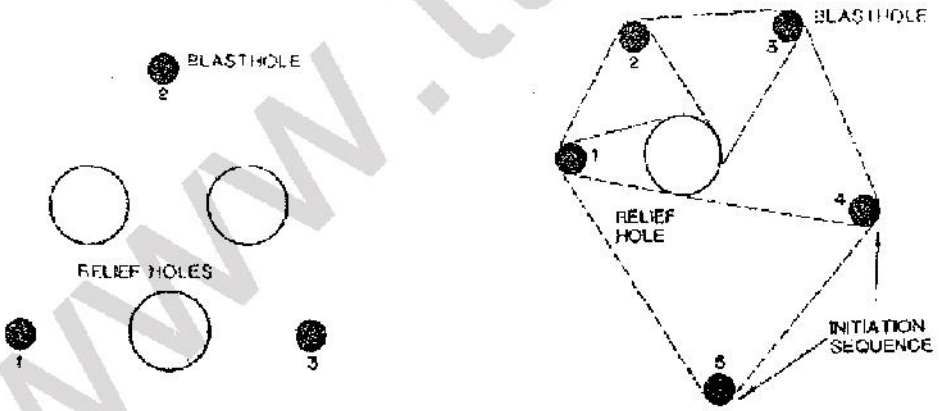


شکل ۳-۲- محل‌های مختلف برای ایجاد برش

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.



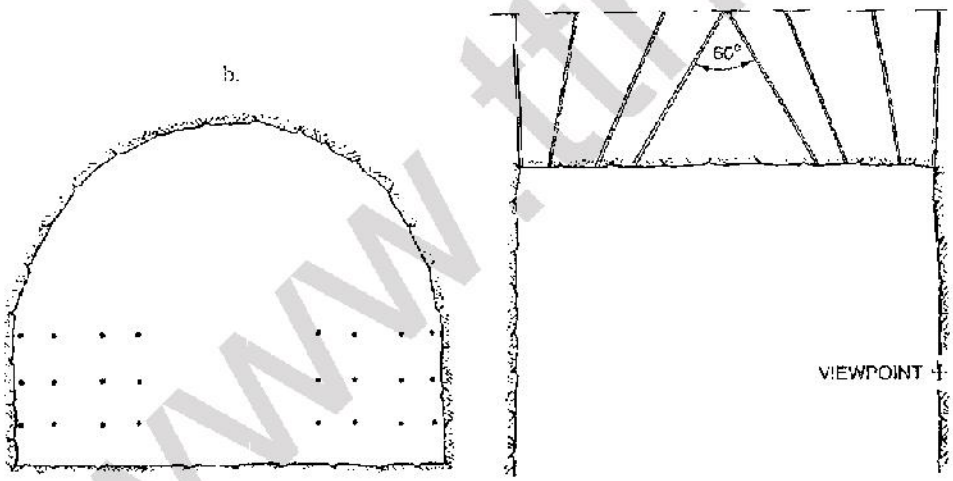
شکل ۳-۳- دو نوع برش موازی

www.ttnar.ir

۳-۱-۴ برش‌های زاویه‌دار

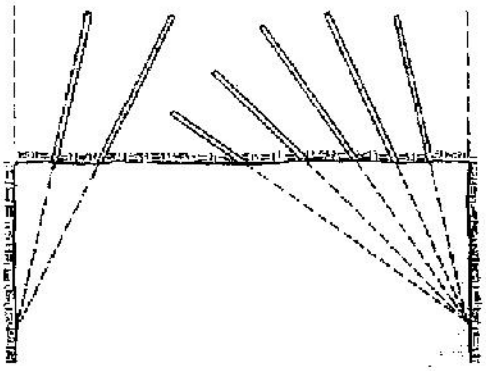
از جمله برش‌های زاویه‌دار برش گوه‌ای (برش V شکل) و برش بادبزنی می‌باشد. از برش گوه‌ای تنها در صورتی می‌توان استفاده کرد که عرض تونل به اندازه کافی بزرگ باشد تابتوان وسایل چالزنی را در آن جا داد. بطور معمول، مقدار پیشروی در هرمرحله ۴۰ تا ۴۵ درصد عرض تونل است (Hoek & Brown, 1994). میزان پیشروی به دقت چالزنی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

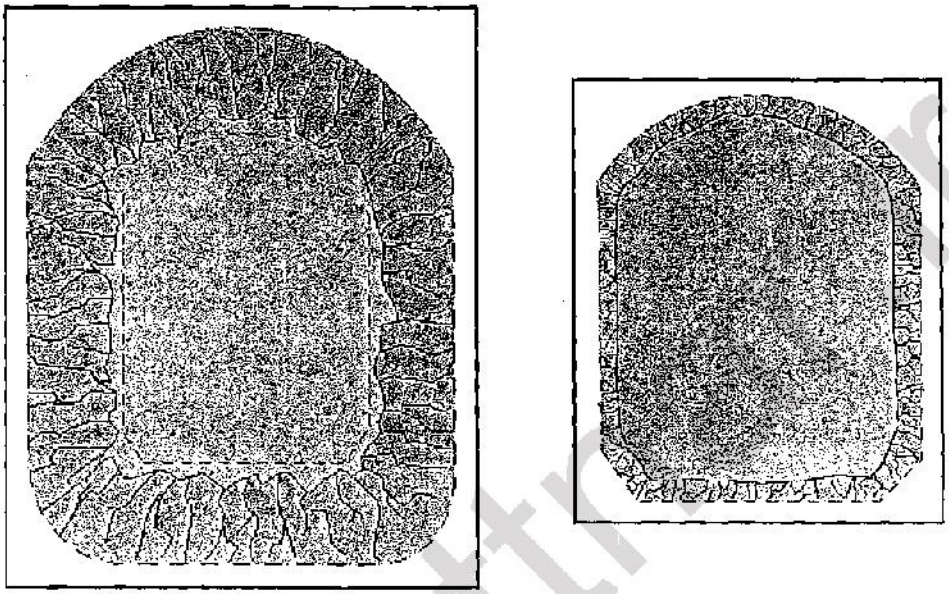
انفجار کنترل شده برای ایجاد سطحی صاف‌تر به کار می‌رود. در این روش فاصله چالها از هم کم و خرج آنها هم کمتر از بقیه چاهاست در این صورت پروفیل حاصل صاف تر خواهد بود و نیاز کمتری به نگهداری و پایدارسازی وجود خواهد داشت.

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)

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.

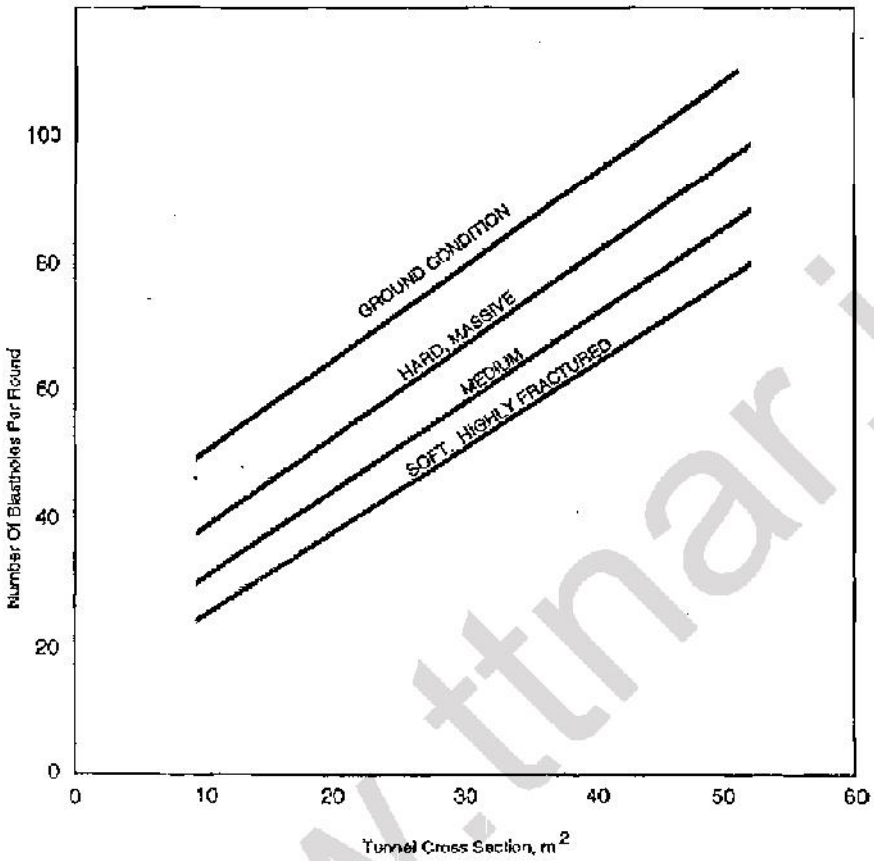


شکل ۳-۶- ناحیه ترک‌خورده در انفجار معمولی و انفجار صاف -
شکل سمت چپ انفجار معمولی- شکل سمت راست انفجار صاف،

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

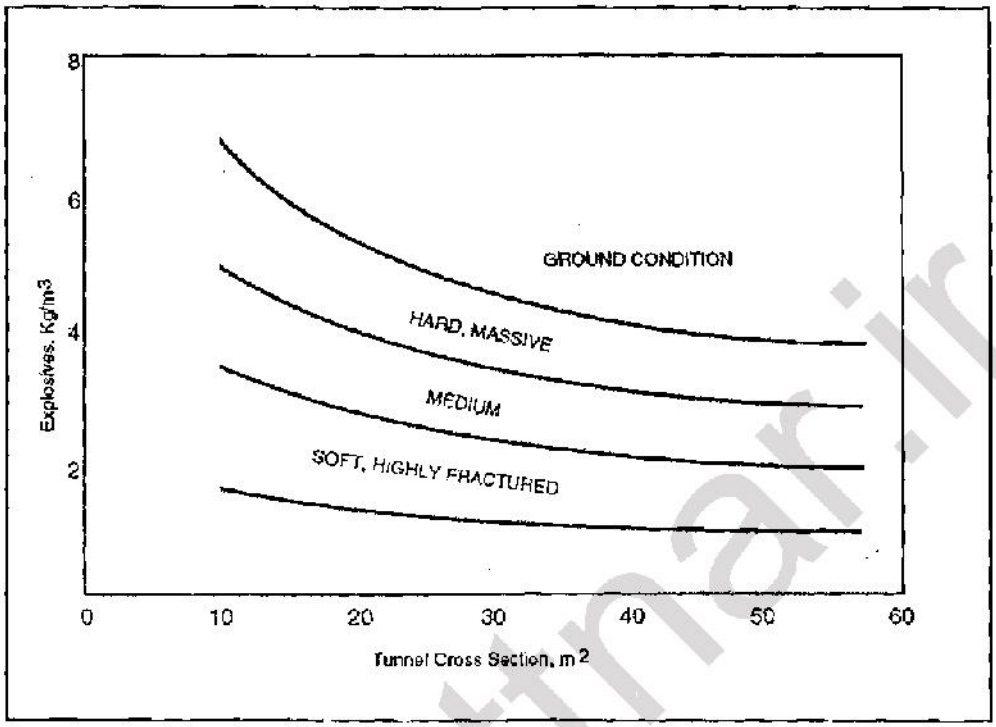
تعداد چال مورد نیاز برای حفاری یک تونل به عوامل متعددی از جمله شرایط زمین از نظر زمین شناسی، شکل و اندازه مقطع تونل و قطر چالهای مورد استفاده بستگی دارد. بدیهی است با افزایش سطح مقطع به چالهای بیشتری نیاز است. شکل ۳-۷ تعداد چالهای مورد نیاز را به ازاء تغییرات سطح مقطع تونل در سنگهای مختلف نشان می‌دهد.

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



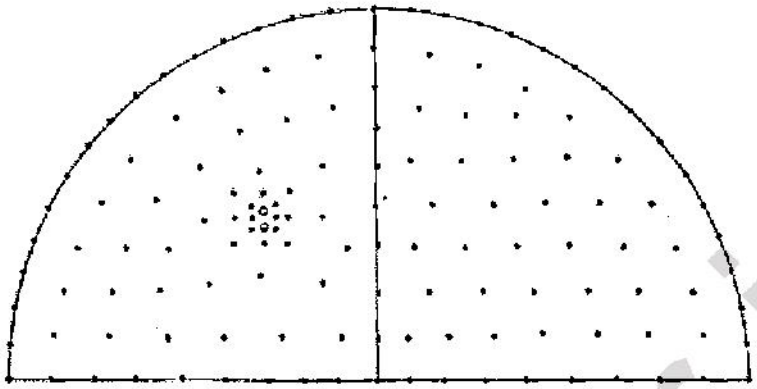
شکل ۳-۸- مقدار مواد منفجره مورد نیاز

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.ttnar.ir



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

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

www.itnar.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.tnar.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	۲۶
	>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
	+10 تا +20 %	۶
	+3 تا +10%	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.ttnar.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.

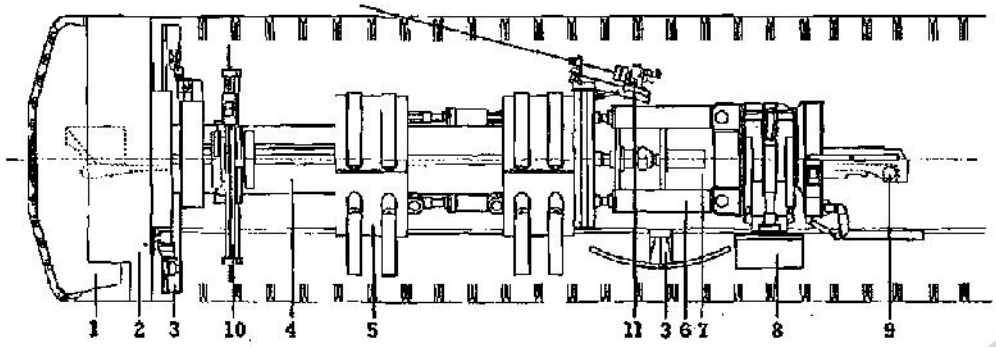
در طول عمل حفر، صفحه حفاری تا آنجا که محور اصلی دستگاه جا دارد (به اندازه یک کورس جک‌های هیدرولیکی) به داخل سینه کار فشار داده می‌شود و در حقیقت یک سیکل پیشروی صفحه حفاری انجام می‌شود. سپس چنگزن‌ها جمع شده و دستگاه برای آماده شدن جهت سیکل بعدی برش به جلو رانده می‌شود. مواد حفاری شده توسط تسمه نقاله به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

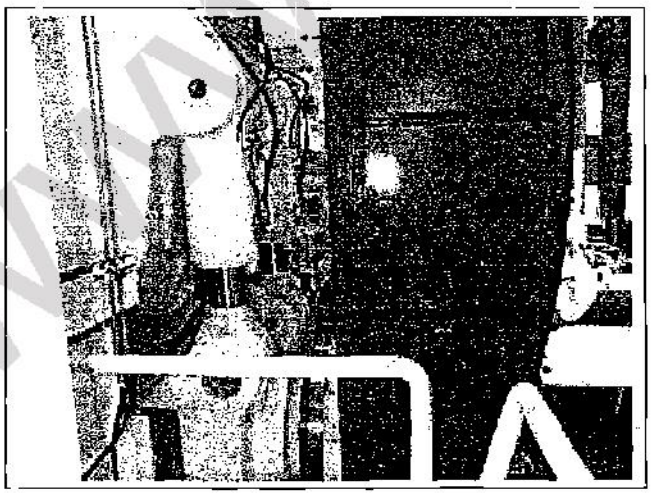
www.ttnar.ir



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

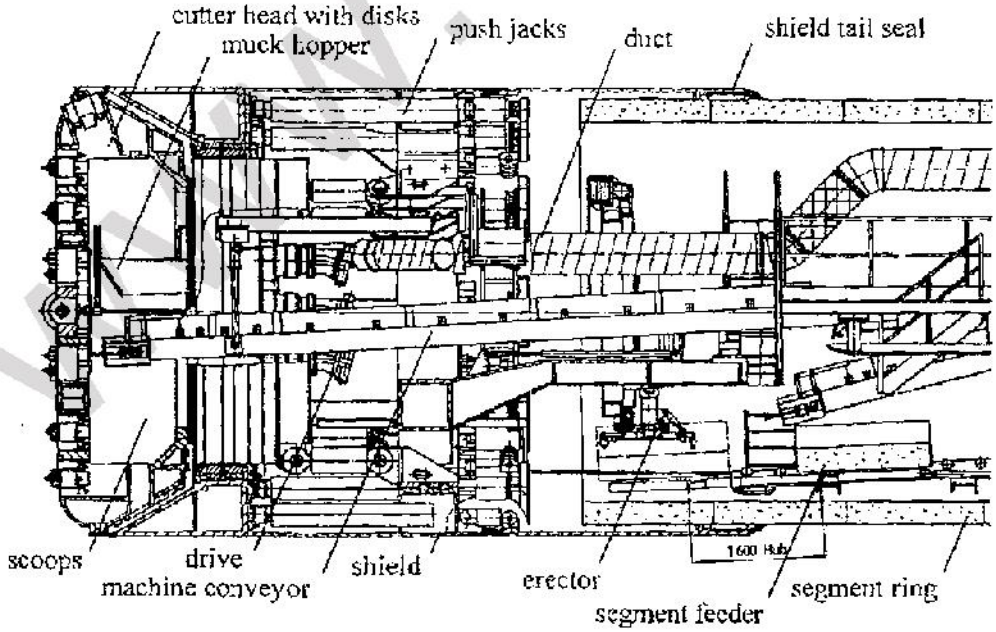
www.tunar.ir

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.

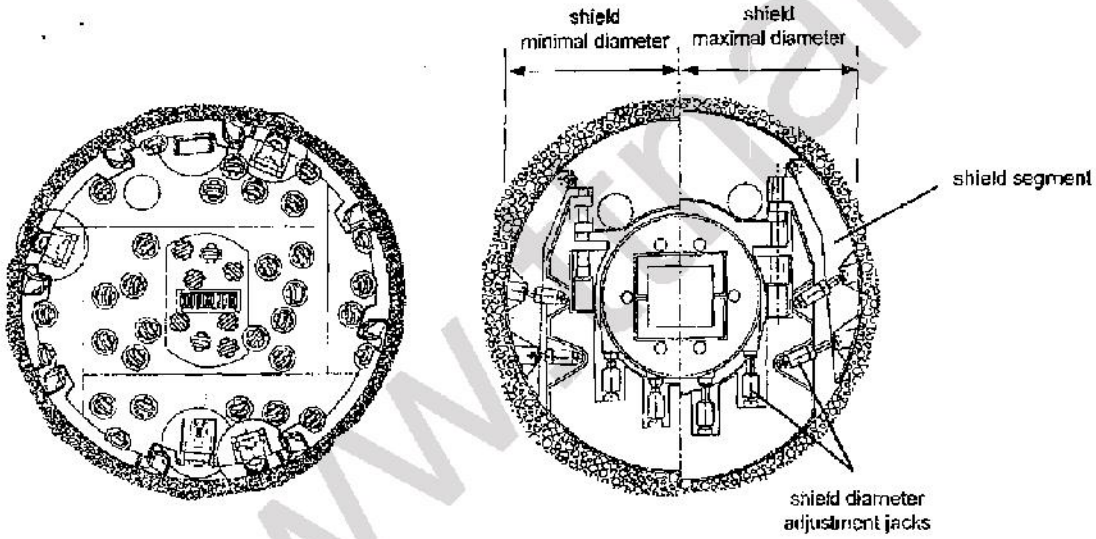
در TBMهای تک سپری، نیروی رانش ماشین توسط سگمنت‌ها تحمل می‌شود. فضای خالی بین سگمنت‌های کارگذاشته شده و دیواره تونل توسط شن پر شده و توسط ملات بصورت پیوسته تزریق میشود. هندسه سگمنت‌ها برسرعت اجرا تأثیر می‌گذارد. در این TBMها، در حین عملیات سگمنت‌گذاری، عمل حفاری متوقف می‌شود.



شکل ۳-۱۲- نمایی از یک TBM تک سپری

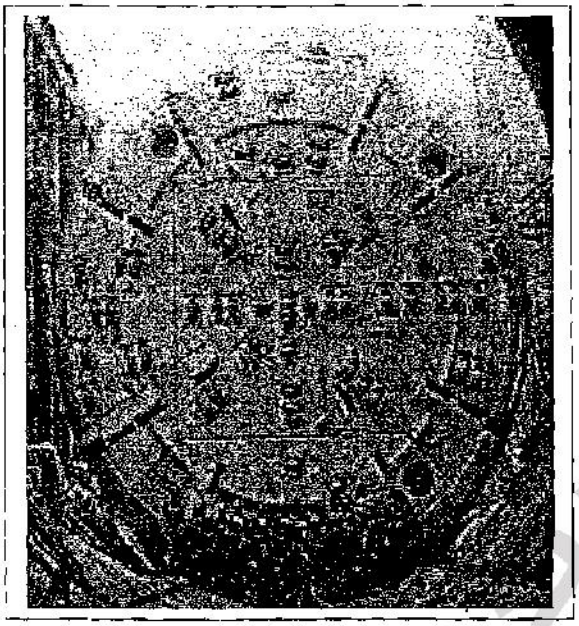
www.ttnar.ir

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.



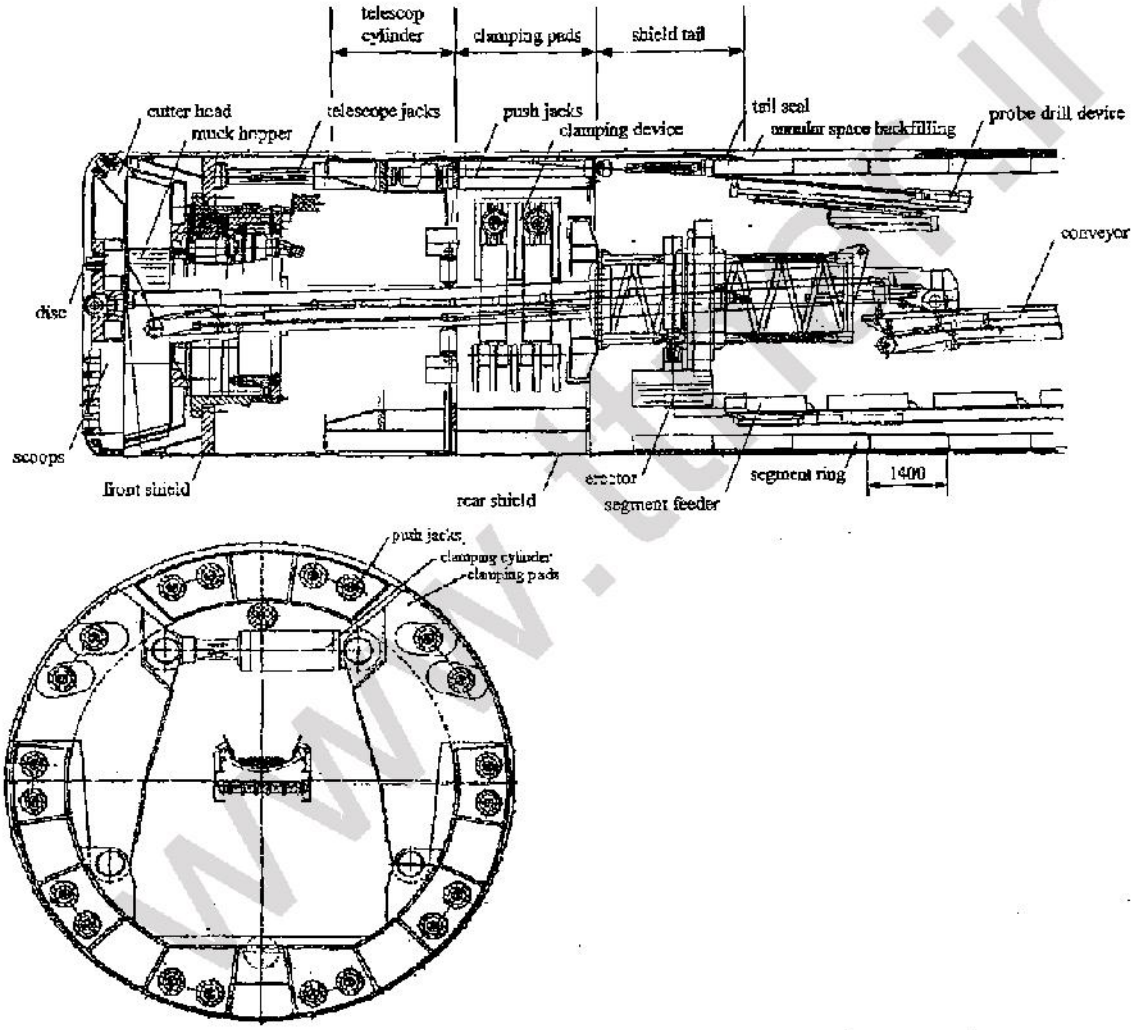
شکل ۳-۱۴- نمای یک TBM تک سپری مورد استفاده در یک تونل راه
و نیز یک تونل راه‌آهن به قطر ۱۱/۹ متر

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

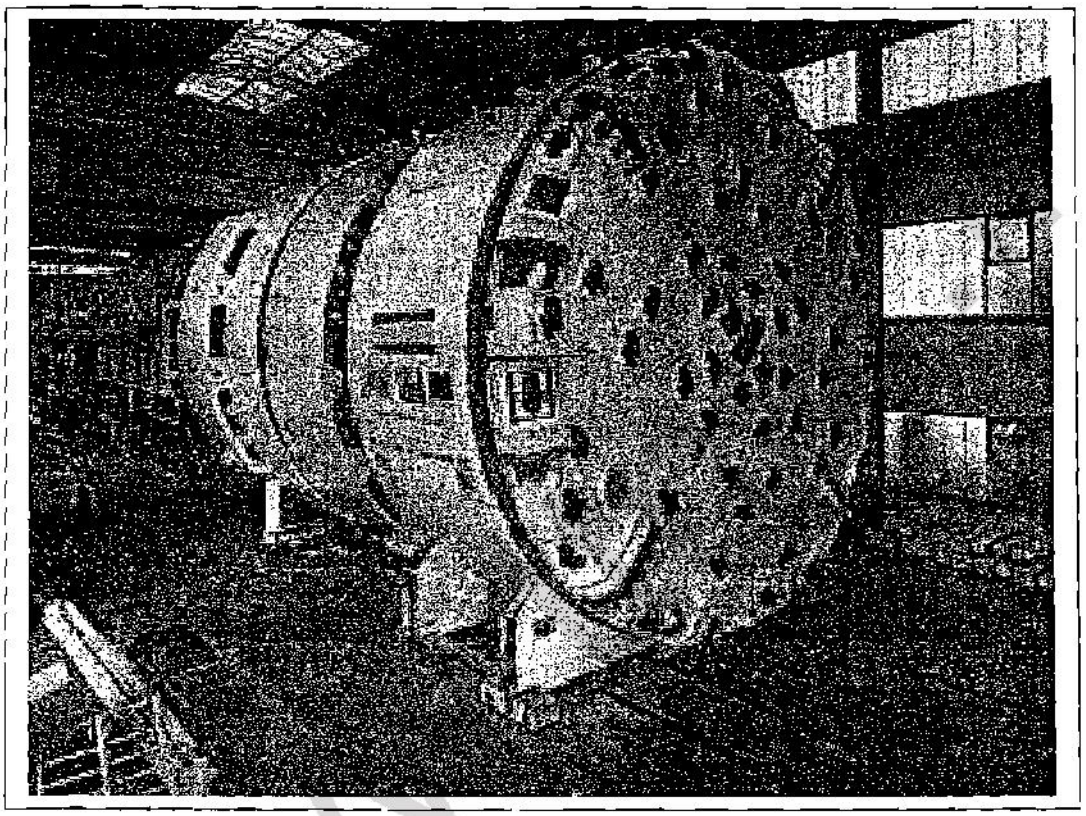
TBMهای دوسپری قادرند همزمان با حفاری، عمل نصب سگمنت‌ها را نیز انجام دهند و عمل حفاری در اینگونه TBMها فقط برای مدت زمان کوتاهی جهت جلو رفتن سپر عقبی بعد از هر کورس حفاری (boring stroke) متوقف می‌شود. در TBMهای تک سپری، در حین نصب سگمنت‌ها، دستگاه قادر به حفاری نمی‌باشد. بنابراین، سرعت حفاری با یک TBM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

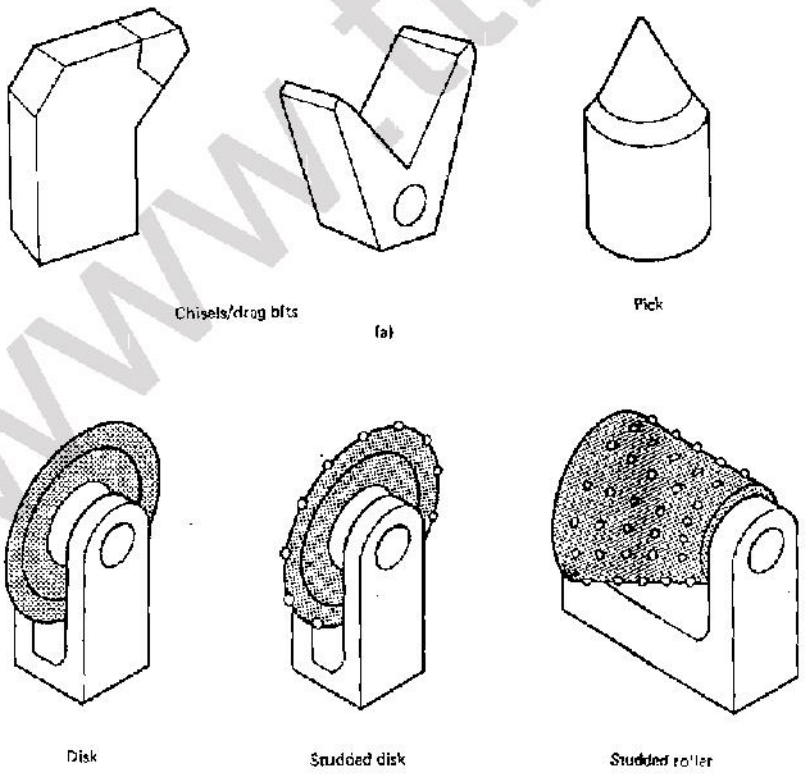
۳- ابزار برش غلتکی (roller)

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 یا 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 ان 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

www.tunnel.ir

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 ساییدگی 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.

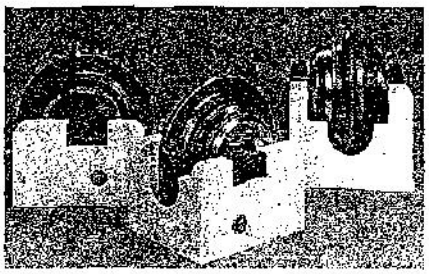
ابزاربرش میانی (face cutters) : قسمت اصلی سینه کار معمولا با ابزاربرش دیسکی یا غلتشی حفر می‌شود که بکارگیری این ابزاربرش به سختی سنگ بستگی دارد. برخی مواقع نظیر حفاری در سنگهای ضعیفتر ممکن است استفاده از ابزاربرش اسکنه‌ای را ایجاب نماید.

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.

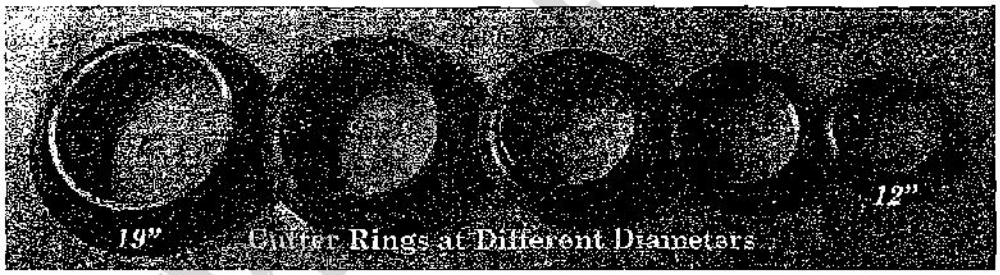
اصل اساسی که بازدهی خردکردن سنگ بوسیله دستگاه را افزایش می‌دهد افزایش اندازه قطعات خرد شده است. یعنی ابزار برش باید طوری چیده شوند که بزرگترین اندازه قطعات خرد شده بدست آید. در یک TBM مخصوص سنگ سخت اگر بار هر کاتر افزایش داده‌شود، کاتر بیشتر در سنگ فرو می‌رود و با

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 همچنین درشرایط سنگی سخت‌تر، 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 = طول حفاری شده / زمان حفاری

ب- بهره‌وری دستگاه (utilization)

درصدی از زمان شیفت که صرف حفاری می‌شود.

U = زمان‌حفاری دستگاه / زمان‌شیفت X ۱۰۰

ج سرعت پیشروی (advance rate)

AR = طول حفاری شده / زمان شیفت

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 حفری 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.ttnar.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)	$P=\frac{3940F_n}{UCS}$	ـــــ
P نرخ نفوذ بر حسب mm/Rev، F_n نیروی متوسط روی هر ابزار برش بر حسب kN، UCS مقاومت فشاری سنگ بر حسب kPa		
Farmer & Glossop (1980)	$P=\frac{624F_n}{\sigma_{tf}}$	بر مبنای ۶ پروژه حاصل شده‌است
P نرخ نفوذ بر حسب mm/Rev، F_n نیروی متوسط روی هر ابزار برش بر حسب kN، σ_{tf} مقاومت کششی سنگ بر حسب kPa		
Cassinelli (1982)	$P=-0.0059RSR+1.59$	ـــــ
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)	$\beta 1 = \frac{\sigma_c}{\sigma_t}, \beta 2 = \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t}$ $P = 26.78.e^{-0.24\beta 1}$ $P = 4\beta 210^{10} e^{-28.59\beta 2}$	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.tnar.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.

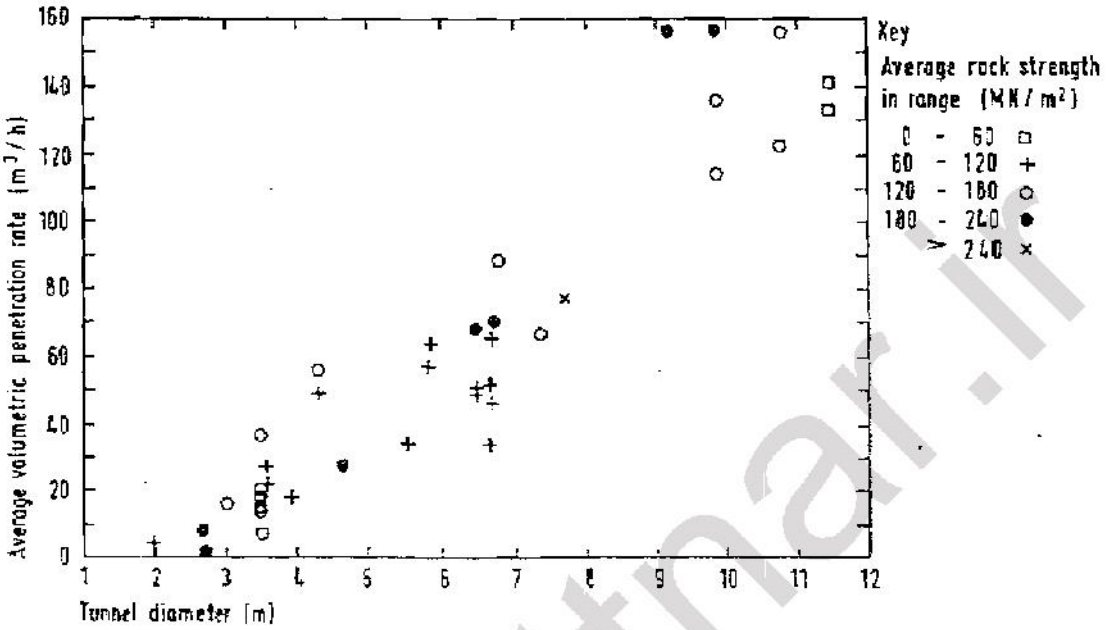
در شکل ۳-۱۹، تغییرات سرعت نفوذ متوسط حجمی (average volumetric penetration rate) برای قطرهای مختلف تونل برای محدوده‌های گوناگون مقاومت سنگ نشان داده شده‌است.
سرعت پیشروی حداکثر (maximum advance rate) با زیادتر شدن بازه زمانی در نظر گرفته شده، کاهش پیدا می‌کند. در تحقیقات CIRIA حداکثر سرعت پیشروی در مدت 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

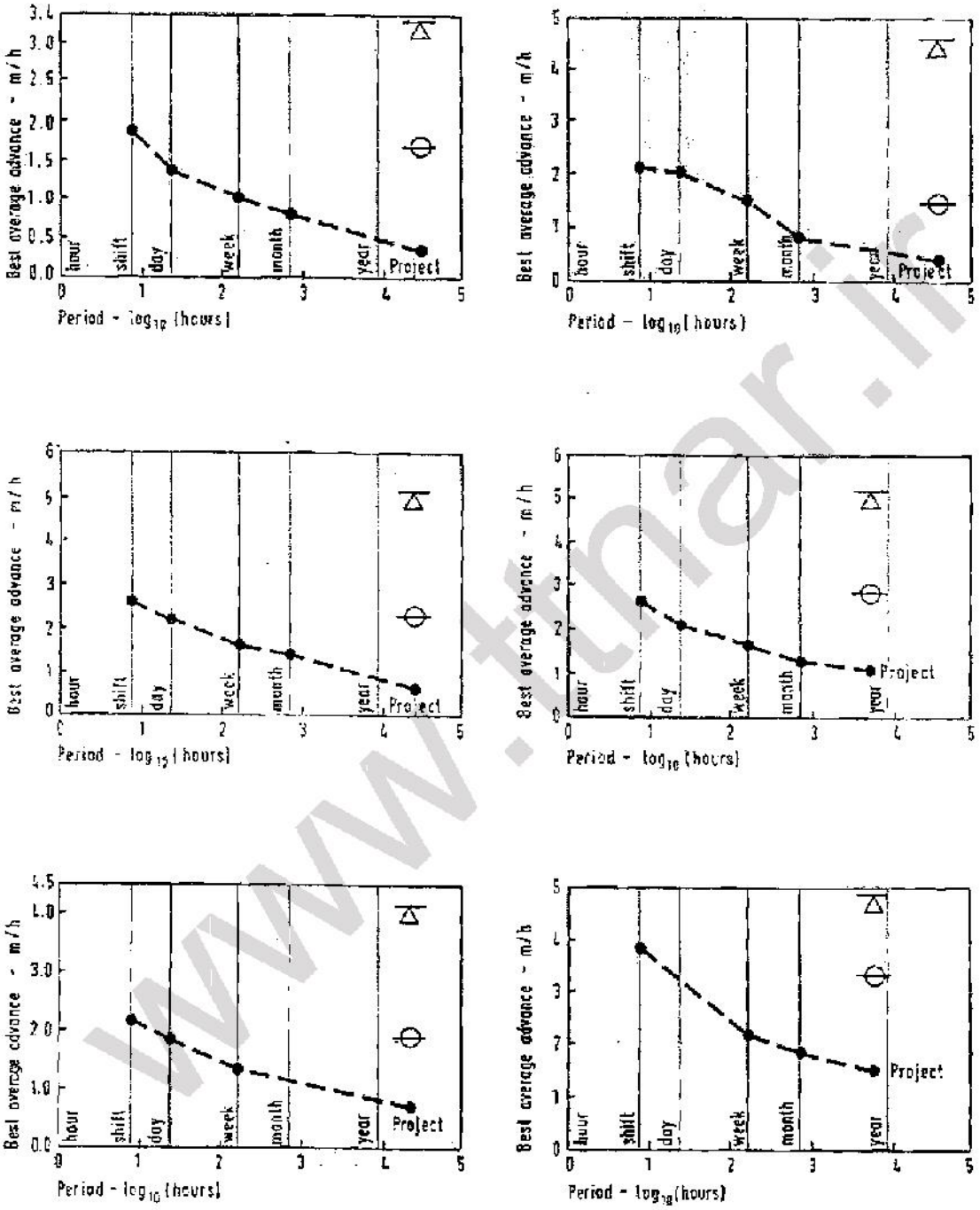
www.tunar.ir

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



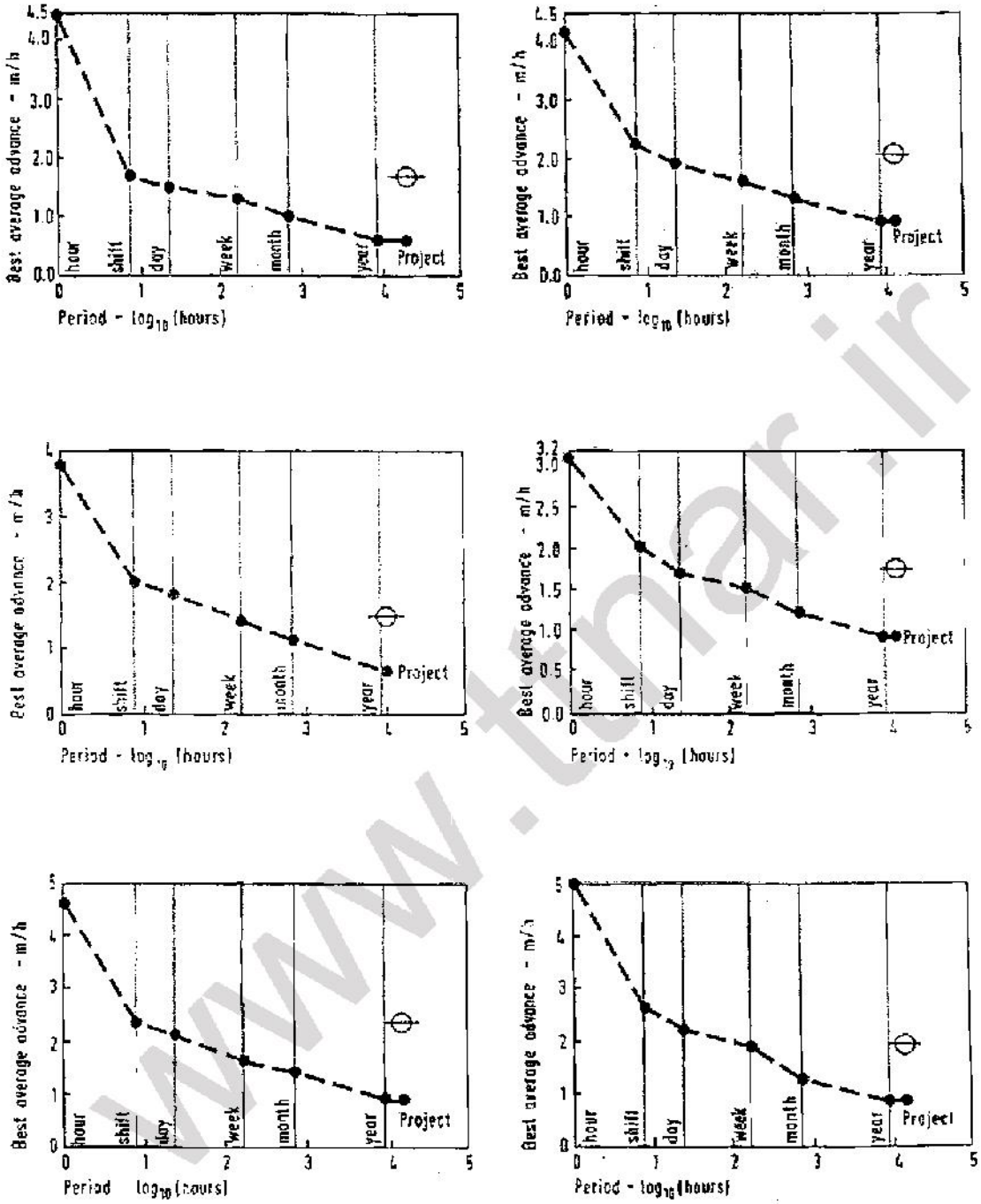
شکل ۳-۱۹- تغییرات سرعت نفوذ متوسط حجمی برای قطرهای مختلف تونل برای محدوده‌های گوناگون مقاومت سنگ

www.ttnar.ir



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

www.tnar.ir



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

www.tnar.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:

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

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

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}

$$Q_{TBM} = Q_0 \times \frac{SIGMA}{F^{10}/20^9} \times \frac{20}{CLI} \times \frac{q}{20} \times \frac{\sigma_0}{5} \qquad (\times 20^9 / F^{10} = 0.0054 \text{ با } ۲۰ \text{ tnf/برش دهنده})$$

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	۰۴۸

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.tnar.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	۰۰.۱۸
۲- فیلیت	۰۶	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				$\sum T = ۵۲۳۹۲$ ساعت	۶ سال

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

www.ttnar.ir

و- عملکرد کلی

PR (متوسط وزنی), ΣI., 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	$\sum L(m)$	$\sum T(hr)$	$\overline{PR}$	$\overline{AR}$
۱،۲،۳و۴	۱۶۰۰۰	۵۲۳۹۳	۶۳۶۰۰/۱۶۰۰۰=۳.۹۸	۷۲۸۰/۱۶۰۰۰=۰.۴۶

ی- سرعت پیشروی در انتهای پروژه

$$AR = \bar{P}\bar{R} \times \sum T^{\bar{m}} \text{ (انتها)}$$

نواحی	$\overline{m}$	$\overline{PR}$	$\overline{AR}$	AR (انتها)
۱،۲،۳و۴	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.itnar.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