

بسمه تعالی

جزوه

تونل سازی

دانشگاه

تهران

استاد

دکتر پلاسی

بنام خدا

فهرست مطالب

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

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

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

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

۱- طبقه بندی زمین مسیر از نظر زمین شناسی و ژئوتکنیکی

اکثر تونل ها بویژه تونل های راه و راه آهن عمدتا در مناطق کوهستانی حفر شده و تونل در داخل سنگ احداث می شود. برای طبقه بندی توده سنگ روش های متعددی موجود است. در بعضی طبقه بندی ها فقط به منشا تشکیل سنگ توجه شده و لذا سنگ را به سه دسته آذرین، رسوبی و دگرگونی تقسیم می نمایند و یا بعضا سنگ را بر اساس مقاومت تک محوری آن دسته بندی می کنند. در روشهای کامتر که امروزه بیشتر مورد استفاده قرار می گیرند خصوصیات درزه و شکاف ها و شرایط آب زیرزمینی و اثر تنش های درجا نیز ملحوظ می شود. از جمله روش هایی که امروزه بکار گرفته می شوند روش ترزاقی، روش RMR، و روش Q می باشد. روشهای فوق الذکر در بیشتر مراجع مربوط به تونل سازی از قبیل (Hoek & Brown, 1994)، (Hoek et al., 1995) و (Singh & Goel, 1999) توضیح داده شده اند. در این بخش خلاصه ای از روش های مزبور ارائه می شود.

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 می گیرد. 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 می شود را برای شرایط مختلف زمین مشخص نمود. ترزاقی وضعیت انواع سنگ را بشرح زیر تعریف می نماید:

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 می افتد. بعلا آسپ 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 می شود. 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 می شود.

سنگ لایه ای (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 درزه های عرضی ضعیف گردند. در چنین سنگی شرایط پوسته پوسته شدن کاملا معمول است.

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

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

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

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

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

۱-۲ طبقه بندی توده سنگ به روش RMR

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

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

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

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

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

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

الف - پارامترهای طبقه‌بندی و امتیاز آنها

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

ادامه جدول ۱-۱- سیستم طبقه بندی RMR

ب- تعدیل امتیاز برای جهت درزه ها

راستا و جهت میل درزه ها	خیلی مساعد	مساعد	متوسط	نامساعد	خیلی نامساعد
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 می شود

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

د اطلاعات مربوط به هر رده

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

ادامه جدول ۱-۱ سیستم طبقه بندی RMR

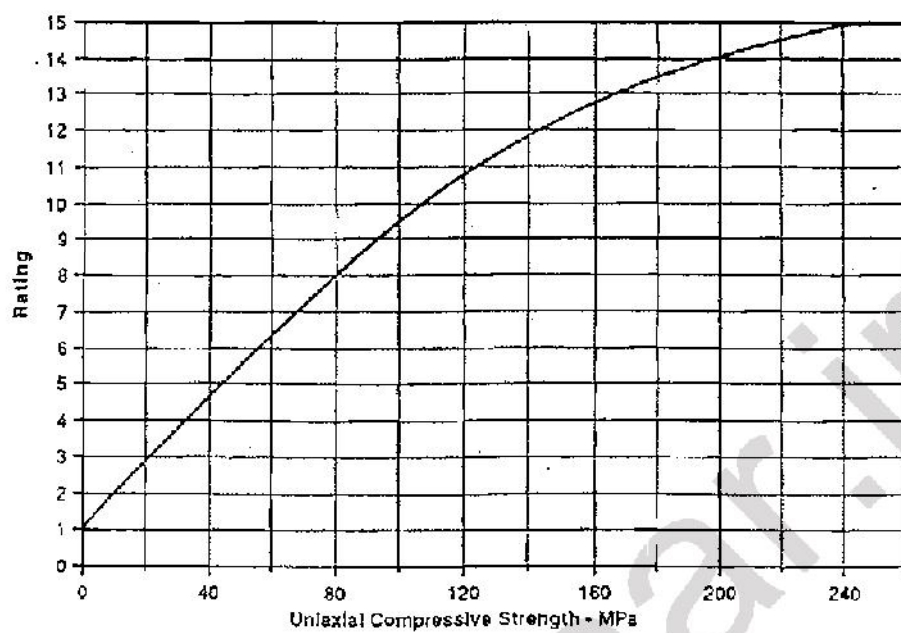
و- راهت های طبقه بندی وضعیت درزه ها

طول ناپیوستگی ها امتیاز	$< 1\text{ m}$ ۶	۱-۲ متر ۴	۳-۱۰ متر ۲	۱۰-۲۰ متر ۱	$> 20\text{ m}$ ۰
جدا شدگی امتیاز	بدون جدا شدگی ۶	$< 0.1\text{ mm}$ ۵	۰.۱-۱ ۴	۱-۵ ۱	$> 5\text{ mm}$ ۰
زبری امتیاز	خیلی زبر ۶	زبر ۵	کمی زبر ۳	صاف ۱	آینه ای ۰
مواد پر کننده امتیاز	بدون مواد پر کننده ۶	$< 5\text{ mm}$ مواد سخت ۴	$> 5\text{ mm}$ مواد سخت ۲	$< 5\text{ mm}$ مواد نرم ۲	$> 5\text{ mm}$ مواد نرم ۰
هوا زدگی امتیاز	بدون هوا زدگی ۶	کمی هوا زده ۵	هوا زدگی متوسط ۳	هوا زدگی شدید ۱	متلاشی شده ۰

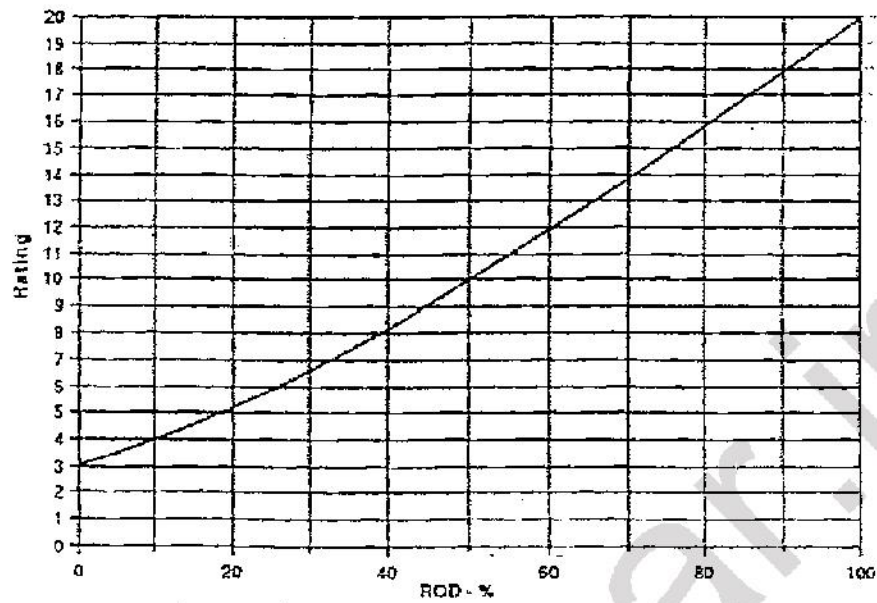
ی- اثر راستا و شیب درزه ها در تونل سازی

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

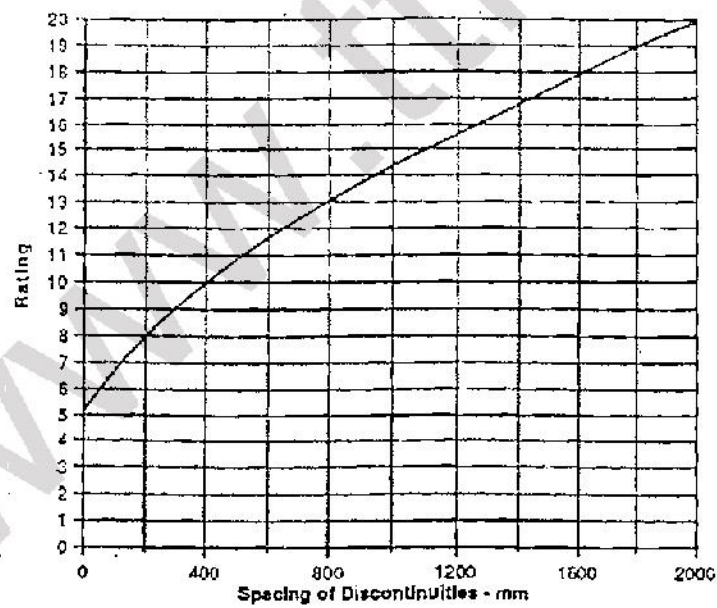
بدلیل ابهاماتی که در مورد استفاده از جدول ۱-۱ برای تعیین امتیاز مربوط به مقاومت فشاری، میزان RQD و فاصله درزه ها وجود داشت منحنی های شکل های ۱-۱ الی ۳-۱ برای دادن امتیاز به این پارامترها ارائه گردید.



شکل ۱-۱- امتیاز مقاومت فشاری تک محوره



شکل ۱-۲- امتیاز شاخص کیفیت سنگ



شکل ۱-۳- امتیاز فاصله درزه‌ها

۳-۱ طبقه بندی توده سنگ به روش Q

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

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

که در آن :

RQD = شاخص کیفی سنگ

J_n = عدد دسته درزه (joint set number)

J_r = عدد زبری درزه (joint roughness number)

J_a = عدد دگرسانی درزه (joint alteration number)

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

SRF = ضریب کاهش تنش (stress reduction factor)

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

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

جدول ۱-۲- امتیاز بندی پارامترها در سیستم Q

شرح	مقدار	ملاحظات
۱- شاخص کیفی سنگ	RQD	۱- و قتیکه مقدار RQD بین ۱۰-۰۰ باشد
A. خیلی ضعیف	۰-۲۵	برای ارزیابی Q مقدار RQD برابر با ۱۰ فرض می شود.
B. ضعیف	۲۵-۵۰	
C. مناسب	۵۰-۷۵	۲- مقادیر RQD با فواصل ۵ یعنی
D. خوب	۷۵-۹۰	۱۰۰، ۹۵، ۹۰ و غیره به اندازه کافی دقیق هستند.
E. خیلی خوب	۹۰-۱۰۰	
۲- عدد دسته درزه	J_n	
A. توده‌ای (massive)، بدون درزه یا درزه کم	۱-۰/۵	
B. یک دسته درزه	۲	
C. یک دسته درزه به اضافه درزه‌های اتفاقی	۳	۱- برای تقاطع دو تونل J_n را در ۳ ضرب کنید: ($J_n \times 3$)
D. دو دسته درزه	۴	
E. دو دسته درزه به اضافه درزه‌های اتفاقی	۶	۲- برای ورودی تونل J_n را در ۲ ضرب کنید: ($J_n \times 2$)
F. سه دسته درزه	۹	
G. سه دسته درزه به اضافه درزه‌های اتفاقی	۱۲	
H. چهار دسته درزه و درزه‌های اتفاقی، شدیداً درزه‌دار، مانند حبه‌قند، و غیره	۱۵	
I. سنگ خردشده، خاک مانند	۲۰	
۳- عدد زبری درزه	J_z	
a دیواره درزه‌ها در تماس با یکدیگر و	.	
b دیواره درزه‌ها در تماس با یکدیگر قبل از ۱۰ cm برش	.	
A. درزه‌های غیر ممتد	۴	۱- چنانچه فاصله بندی متوسط دسته درزه‌ها بزرگتر از ۳ متر باشد مقدار ۱ را به J_z اضافه کنید.
B. زبر و نامنظم، موجدار	۳	
C. صاف، موجدار	۲	
D. آینه ای، موجدار	۱/۵	۲- $J_z = ۰/۵$ 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	
H. دیواره درزه‌ها وقتی برش اتفاق می افتد در تماس با هم قرار نمی گیرند.	.	
I. مناطق حاوی کانی های رسی با ضخامت کافی که از تماس دیواره ها جلوگیری کند.	۱	
J. بخش ماسه ای، شنی یا سنگ خردشده با ضخامت کافی که از تماس دیواره ها جلوگیری کند.	۱	

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

شرح	مقدار	ملاحظات
۴- عدد دگرسانی درزه	J_d	Φ_r (درجه)
a. دیواره درزه‌ها در تماس با هم هستند	۲۷۵	
A. شدیداً جوش خورده، سخت، نرم نشونده، مواد پرکننده غیر قابل نفوذ	۱۱۰	(۲۵-۳۵)
B. دیواره های درزه دگرگون نشده سطوح درزه فقط زنگ زده است.	۲۱۰	(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	۳۱۰	(۲۰-۲۵)
D. مواد پوششی درزه‌ها از لای، یا رس ماسه‌ای، بخشهای کوچک رسی (نرم نشونده)	۴	(۸-۱۶)
F. مواد پوششی درزه‌ها از مواد رسی نرم یا با اصطکاک کم، یعنی کائولینیت، میکا همچنین کلریت، تالک، گچ و گرافیت و غیره و مقادیر کم رسهای توری (پوشش ناپیوسته با ضخامت ۱-۲mm و یا کمتر است).		
b. دیواره درزه‌ها تا قبل از ۱۰ mm برش در تماس با هم قرار می‌گیرند.	۲۱۰	(۲۵-۳۰)
F. ذرات ماسه‌ای، سنگ متلاشی شده عاری از مواد رسی و غیره	۶۱۰	(۱۶-۲۴)
G. شدیداً پیش تحکیم شده، مواد پرکننده رسی نرم نشونده، (ممتد، ضخامت $< 5\text{ mm}$)	۸	(۱۲-۱۶)
H. پیش تحکیم شده متوسط یا کم، مواد پرکننده رسی نرم شونده، (ممتد ضخامت $< 5\text{ mm}$)	۸/۰-۱۲/۰	(۶-۱۲)
J. مواد پرکننده متورم شونده مانند مونت موری لونیت، (ممتد ضخامت $< 5\text{ mm}$) مقدار J_s بستگی به درصد اندازه ذرات رس و میزان دسترسی به آب دارد)	۶۱۰	(۶-۲۴)
c. دیواره درزه‌ها پس از برش در تماس با هم قرار نمی‌گیرند.	۸/۰	
K. نواحی یا نوارهای متلاشی شده یا خرد شده	۸/۰	
L. و رس (برای شرایط رس به بندهای J,H,G)	۸/۰-۱۲/۰	
M. (مراجعه شود).	۵/۰	
N. نواحی یا نوارهای از جنس لای یا رس لای دار، مقدار کم رس، نرم نشونده	۱۰/۰-۱۳/۰	(۶-۲۴)
O. نواحی یا نوارهای ضخیم و ممتد رس	۱۳/۰-۲۰/۰	
P و R (برای شرایط رس به J,H,G مراجعه شود)		

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

شرح	مقدار	ملاحظات
۵- ضریب کاهش آب درزه	J_w	(فشار تقریبی آب kgf/cm^2)
A. حفاری خشک با جریان آب جزئی یعنی $< 5 \text{ lit/min}$ بصورت موضعی	۱/۰	$< 1/0$
B. آب با مقدار یا فشار متوسط، بعضاً آب شستگی مواد پر کننده 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 پر کننده بطور قابل ملاحظه	۰/۳۳	۲/۵-۱۰/۰
E. جریان فوق العاده زیاد آب با فشار در ناحیه آتشفکری، کاهش آب در طول زمان	۰/۱-۰/۲	> 10
F. جریان فوق العاده زیاد آب با فشار بطور مداوم و بدون کاهش در طول زمان	۰/۱-۰/۰۵	> 10
۶- ضریب کاهش تنش	SRF	
« مناطق ضعیفی تونل را قطع می کند که ممکن است موجب سستی توده سنگ هنگام حفاری تونل شود.	۱۰	۱ این مقادیر SRF را چنانچه مناطق برشی تونل را قطع نمیکند بلکه فقط تحت تاثیر قرار می دهد به میزان ۵۰-۲۵ کاهش دهید
A. وقوع متعدد مناطق ضعیف که حاوی رس یا سنگ خرد شده و تجزیه شده است، سنگ خیلی سست در اطراف تونل (در هر عمق)	۵/۰	۲- برای تنش در جای شلبدان غیرایزوتروپ (اگر اندازه گیری شده است):
B. مناطق ضعیف منفرد حاوی رس، یا سنگ تجزیه شده و هوازده ($< 50 \text{m}$ عمق حفاری)	۲/۵	اگر $\frac{\sigma_1}{\sigma_3} < 10$ ، مقدار σ_c را به $\sigma_c/8$ و σ_t را به $1/8 \sigma_t$ کاهش دهید.
C. مناطق ضعیف منفرد حاوی رس، یا سنگ تجزیه شده و هوازده ($> 50 \text{m}$ عمق حفاری)	۲/۵	وقتی $\frac{\sigma_1}{\sigma_3} > 10$ ، مقدار σ_c و σ_t را به σ_c
D. مناطق برشی متعدد در سنگ سالم و خوب (بدون رس)، سنگ سست در اطراف تونل (هر عمقی)	۵/۰	۰/۶ و $0/16 \sigma_t$ کاهش دهید σ_c مقاومت فشاری تک محوری و σ_t مقاومت کششی است (با نقطه ای)، σ_1 و σ_3 تنش های اصلی بزرگتر و کوچکتر هستند.
E. مناطق برشی منفرد در سنگ سالم و خوب (عاری از رس)، ($< 50 \text{m}$ عمق حفاری)	۲/۵	
F. مناطق برشی مجرد در سنگ سالم و خوب (عاری از رس)، ($> 50 \text{m}$ عمق حفاری)	۵	
G. درزه های باز سست، شنیدار در زمدار یا جبهه قند مانند (هر عمقی)		

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

شرح	مقدار	ملاحظات
b. سنگ سالم و خوب، مسائل تنش در سنگ		
H. تنش کم نزدیک سطح زمین	۲/۵	
σ_c / σ_1 σ_c / σ_1		
	> 13 > 200	
J. تنش متوسط	۱۰-۲۰۰	
K. تنش زیاد، ساختار خیلی محکم (light) (معمولا از نظر پایداری مساعد است ممکن است برای پایداری دیواره ها نامساعد باشد).	۱۰-۵	
L. انفجار ملایم سنگ rock-burst (سنگ توده ای)	۵-۱۰	
M. انفجار شدید سنگ (سنگ توپر) $< 2/5$	۱۰-۲۰	
N. سنگ فشارنده، جریان پلاستیک سنگ غیر بکر، تحت تاثیر فشار زیاد سنگ	۵-۱۰	
O. فشار سنگ ملایم ناشی از فشارش	۱۰-۲۰	
P. فشار سنگ شدید ناشی از فشارش		
d. سنگ تورمی، تورم به علت فعل / تفاعلات شیمیایی ناشی از حضور آب		
F. فشار سنگ ملایم ناشی از تورم	۵-۱۰	
R. فشار سنگ شدید ناشی از تورم	۱۰-۱۵	

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 تأثیر بگذارد ندارد. در ایران آیین‌نامه وزارت راه مشخصاتی را برای تونل‌های راه تعیین کرده‌است که خلاصه‌ای از آن ذیلاً ذکر می‌شود:

۲-۱ شیب تونل‌های راه

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

دلایل انتخاب شیب کم در تونل‌ها:

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

تونل.

۲-تأثیر سریالایی‌های واقع در ارتفاعات در تعداد وسائط نقلیه ای که دچار خرابی می‌شوند.

۳-تأثیر سریالایی‌ها در افزایش مقدار الودگی هوا

۴- تأثیر سرپایینی‌ها در افزایش سرعت وسایل نقلیه

به توصیه AASHTO شیب تونل‌های راه با ترافیک سنگین در سریالایی‌ها بخاطر مسائل تهویه ترجیحاً 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 ب مجرای بزرگ دارای امتیازات زیر است:

الف) با ساختن یک تونل در ابتدا می‌توان از آن به صورت ۲ طرفه استفاده کرد.
ب) با ساختن تونل دوم از هر تونل می‌توان در یک جهت استفاده کرد.
پ) در آینده دور می‌توان تونل سوم را ساخت و از یکی از تونل‌ها 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 ساعت‌های 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 خط‌های اصلی در داخل تونل برابر با عرض خط‌های مسیر راه است. شانه‌های تونل مانند راه در طرفین خط‌های اصلی قرار می‌گیرد و بدون وجود اختلاف سطحی به آن متصل می‌گردد. این شانه‌ها 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 می‌گردد. عرض این شانه‌ها در جدول ۱-۲ آمده است.

معمولا ورود عابران پیاده به داخل تونل‌های برون شهری مجاز نیست و پیاده رو‌ها فقط برای استفاده ماموران بهره برداری و کسانی که وسایل نقلیه آنها دچار خرابی شده است احداث می‌شود. این پیاده رو‌ها باید دارای شرایط زیر باشند:

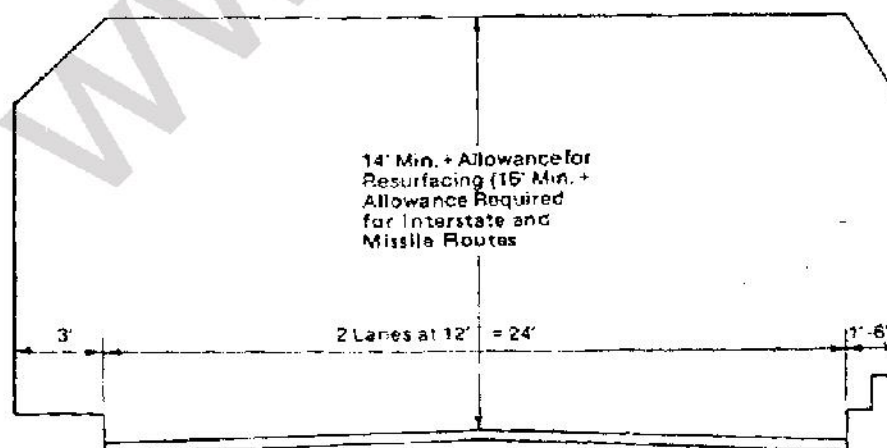
- ۱- در تونل با مقطع منحنی حداقل عرض پیاده رو ۶۰ سانتی متر باشد.
- ۲- در تونل با دیواره قائم حداقل عرض پیاده رو ۷۵ سانتی متر باشد.
- ۳- حداقل ارتفاع پیاده رو از لبه راه ۲۰ سانتی متر و حداکثر آن ۴۰ سانتی متر باشد.

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

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

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

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



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

۳-۲ مسیر تونل های راه در پلان

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

- ۱- دود وسایل نقلیه که باعث کاهش دید می گردد.
 - 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 آیین نامه 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 می باشد.
- بطور کلی، در طراحی مسیر تونل های راه، در صورت استفاده از پیچ، شعاع پیچ باید طوری انتخاب شود که فاصله دید توقف برآورده شود. لازم بذکر است که تامین فاصله دید سبقت در تونلها الزامی نیست. به توصیه AASHTO فاصله دید توقف بسته به سرعت طرح از جدول ۲-۲ انتخاب می شود:

جدول ۲-۲- فواصل دید توقف طبق AASHTO

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

۴-۲ شیب تونل های راه آهن

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

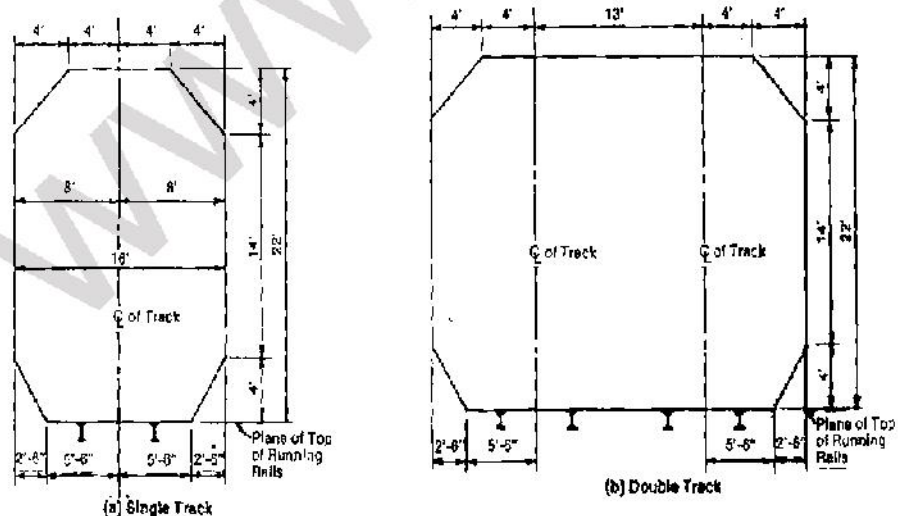
۲-۵ نیم رخ عرضی تونل‌های راه‌آهن

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

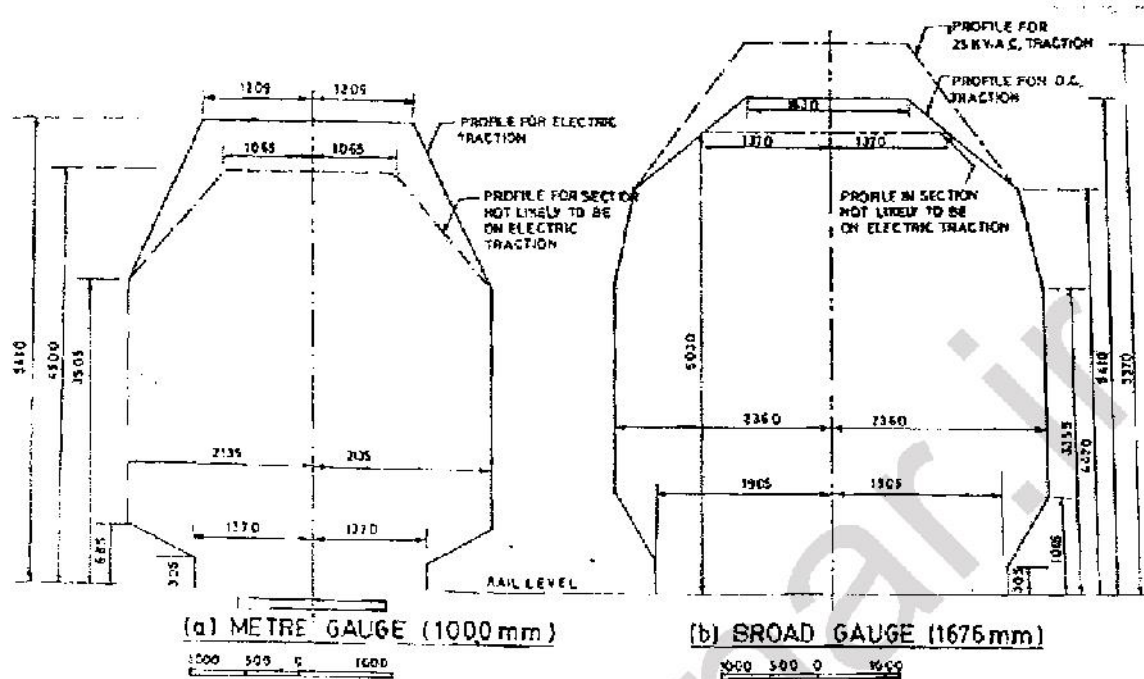
جدول ۲-۳- ابعاد تونل‌های راه‌آهن در چند کشور

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

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 تک خطه و دوخطه طبق توصیه انجمن مهندسين راه‌آهن آمريكا



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

۲-۶ مسیر تونل‌های راه‌آهن در پلان

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

۳- روش های حفاری تونل

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

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

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

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

روش های حفاری مکانیزه عمدتاً شامل موارد زیر است:

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

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

۳-۱ روش چالزنی و انفجار

این روش شامل مراحل زیر است :

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

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

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

در ۲۵ سال اخیر تکنیکهای چالزنی پیشرفت زیادی کرده است و استفاده از جامبوهای 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 می توان کلیه فعالیت های انجام شده را کنترل و ثبت و کیفیت چالزنی را بالا برد. خرجگذاری در چالها می تواند با سرعت زیاد انجام شود. این کار توسط خرجهای با لوله پلاستیکی و یا تجهیزات خرجگذاری مکانیکی صورت می گیرد. در مورد اخیر مقدار خرج قرار داده شده در واحد طول چال را می توان 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 می کنند.

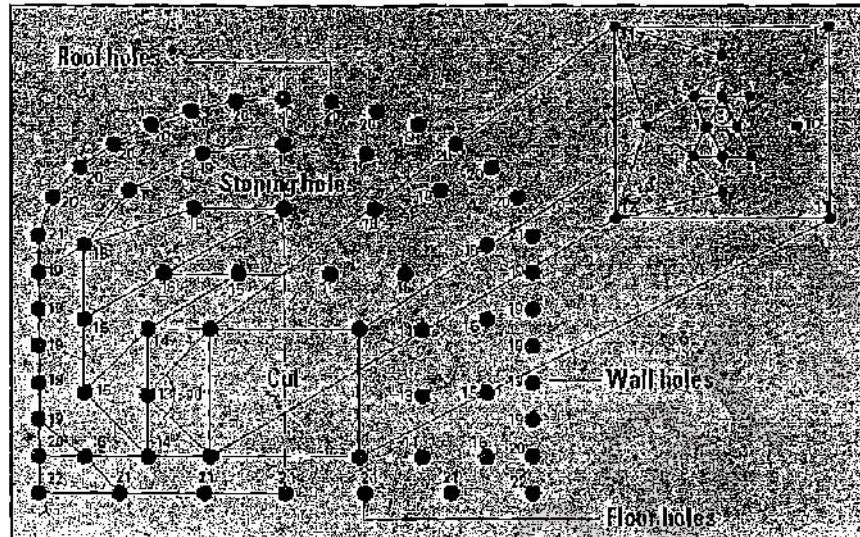
سرعت پیشروی در حفاری به روش چالزنی و انفجار در پروژه هایی که بخوبی مدیریت می شوند تا ۷۰ متر در هفته نیز امکان پذیر می باشد ولی به علت بالا بودن تعداد نیروی انسانی و نتیجتاً بالا بودن هزینه ها در این روش و نیز آسیب هایی که این روش حفاری به سنگ اطراف تونل وارد می کند و همچنین با در نظر گرفتن مسائل زیست محیطی، در بسیاری موارد استفاده از روش های 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 زمین شناسی
- نوع مواد منفجره و جانشینی های در دسترس برای استفاده
- نوع تجهیزات مورد استفاده برای چالزنی
- محدودیت ارتعاشات ناشی از انفجار

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

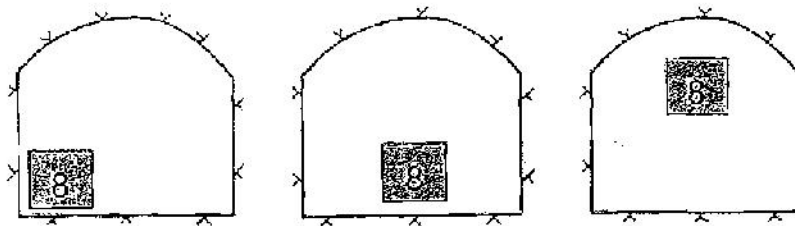


شکل ۳-۱- یک نمونه الگوی چالزنی و ترتیب انفجار چالها

۳-۱-۲ سطح آزاد

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

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

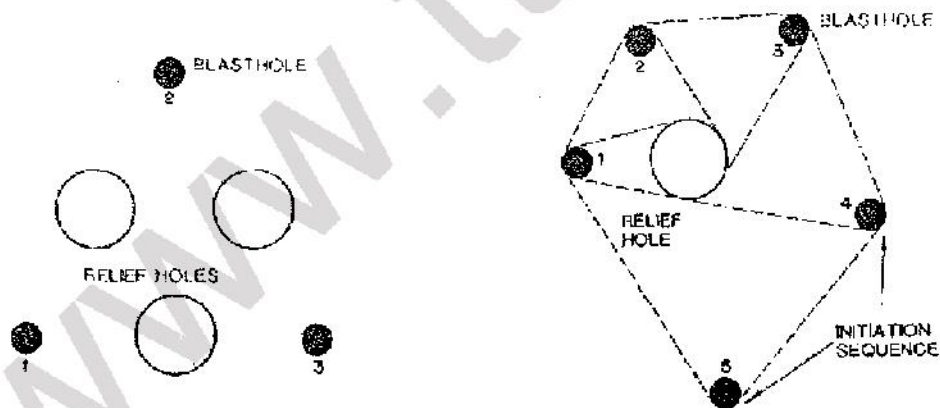


شکل ۳-۲- محل های مختلف برای ایجاد برش

۳-۱-۳ برش موازی

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

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

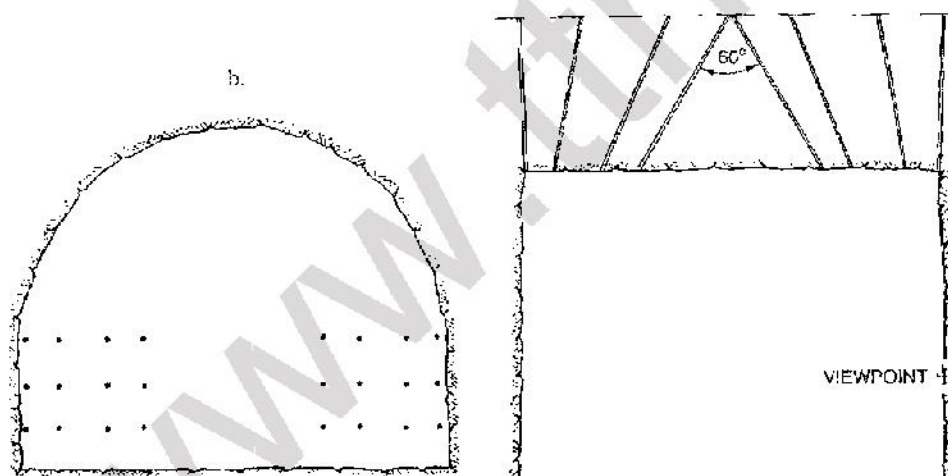


شکل ۳-۳- دو نوع برش موازی

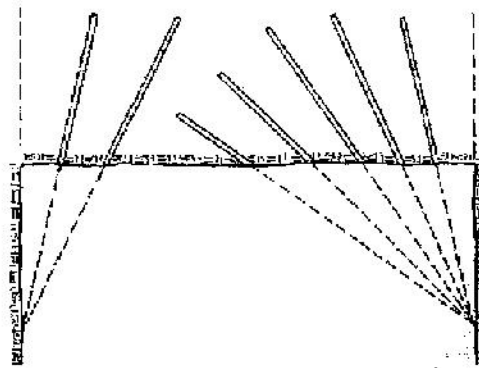
۳-۱-۴ برش های زاویه دار

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

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



شکل ۳-۴ - نمونه ای از برش گوه ای



شکل ۳-۵- برش بادبزنی

۳-۱-۵ محیط مقطع تونل

محیط مقطع تونل را می توان 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 می شود 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 نمی شود. فاصله چالهای کناری زیاد است و خرج کار گذاشته شده به اندازه بقیه جاهاست در این صورت سطح تونل ناهموار، ترک خورده و نامنظم می شود.

انفجار کنترل شده برای ایجاد سطحی صاف تر به کار می رود. 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.

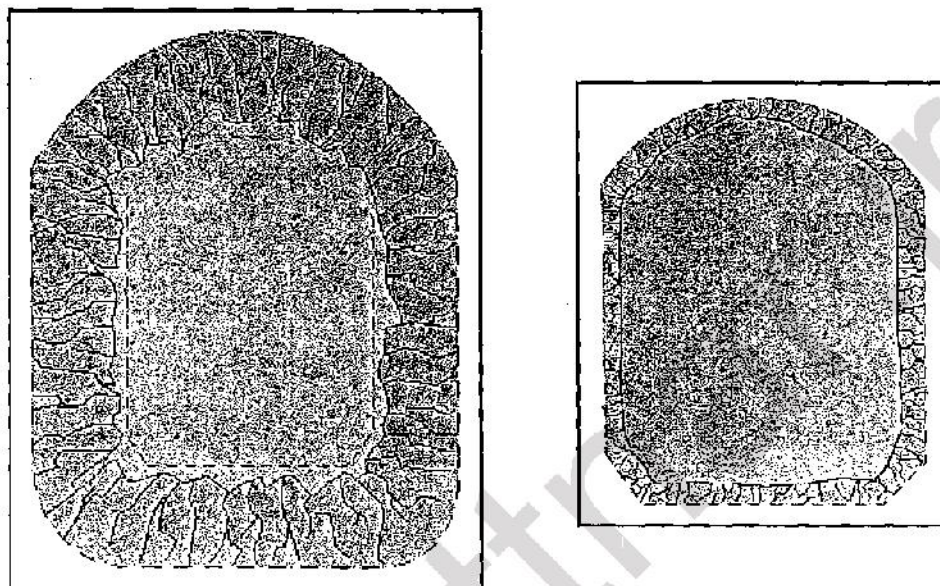
۳-۱-۶ انفجار کنترل شده

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 می یابد. 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 می توان تا حدی جلوی ترک خوردگی سنگهای اطراف را حتی در شرایط بد زمین شناسی گرفت. به این منظور بهترین راه استفاده از چالهایی با فاصله کمتر و در عوض با خرج کم است. دو روش معمول عبارت است از:

- روش انفجار صاف (smooth blasting)

- روش پیش برش (presplitting)

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



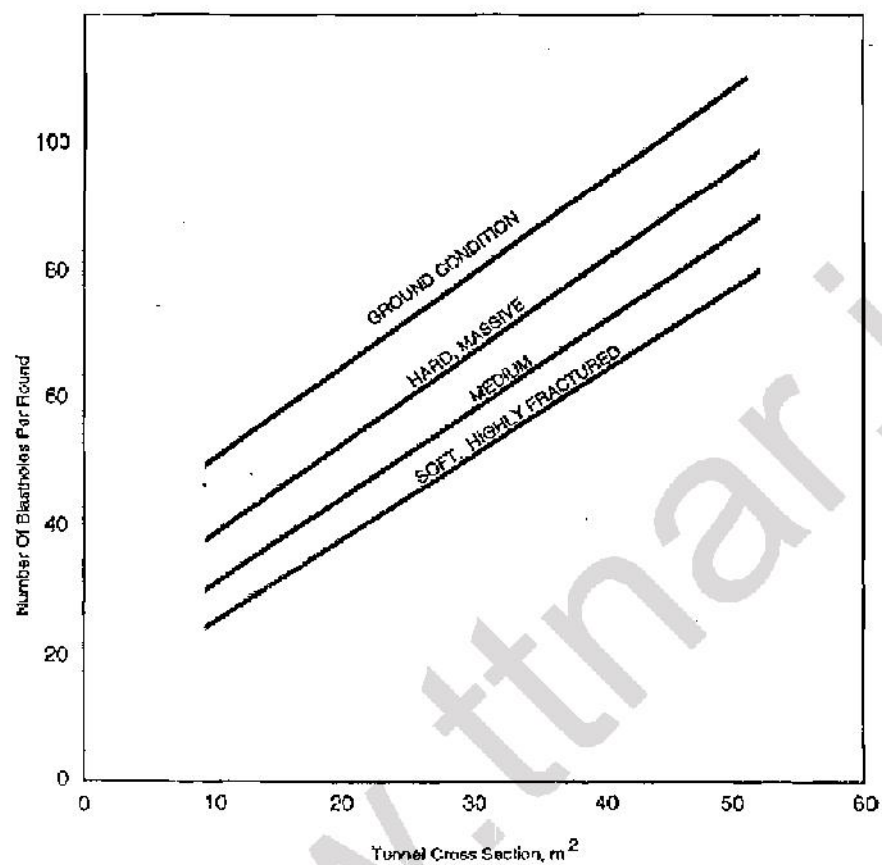
شکل ۳-۶- ناحیه ترک خورده در انفجار معمولی و انفجار صاف -

شکل سمت چپ انفجار معمولی - شکل سمت راست انفجار صاف

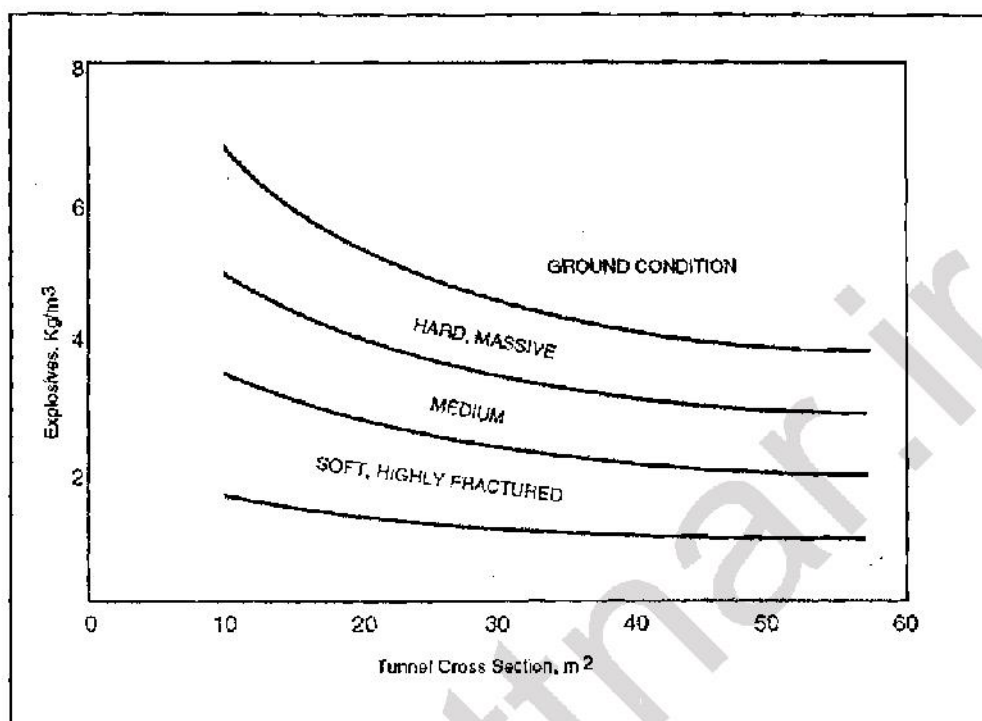
۳-۱-۷ تعداد چال و مقدار مواد منفجره مورد نیاز

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

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



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

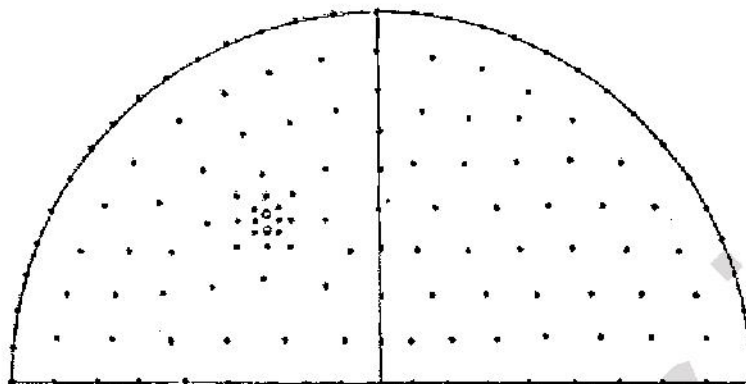


شکل ۸-۳- مقدار مواد منفجره مورد نیاز

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

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

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



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

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

۳-۲ حفاری با TBM

۳-۲-۱ تاریخچه ساخت و استفاده از TBM

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

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

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

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

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

تعداد	آیتم	
۲۶	1963-1970	تعداد تونل بر حسب دوره زمانی اتمام پروژه
۵۲	1971-1975	
۱۲۲	1976-1980	
۱۳۹	1981-1985	
۱۷۶	1986-1990	
۱۱۴	1991-1994	
۲۱۹	2-3.5m	تعداد تونل بر حسب قطر حفاری
۲۲۷	3.6-5.0	
۱۰۴	5.0-6.5	
۲۶	6.5-8.0	
۳۴	>8.0	
۴۰۲	بدون شفت	تعداد تونل بر حسب عمق شفت
۳۵	<15m	
۹۲	15-50m	
۱۰۱	>50m	
۴۰	سرایی ۲۰٪+	تعداد تونل بر حسب شیب طولی
۶	+10 % تا +20 %	
۱	+3 % تا +10 %	
۵۷۳	-3 % تا +3 %	
۳	-10 % تا -3 %	
۷	-20 % تا -10 %	
۰	سرایی ۲۰٪-	
۲۱۸	نو	تعداد TBM بر حسب وضعیت آن در شروع کار
۲۲	استفاده مجدد مستقیم	
۲۶۱	استفاده پس از تعمیر	
۲۹	نا مشخص	
۵۱۲	باز	تعداد TBM بر حسب نوع سپر
۵۶	تک سپر	
۳۸	دو سپر	
۱۵	سپر مخصوص	
۹	نا مشخص	

۳-۲-۲ انواع TBM

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

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

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

۳-۲-۱-۲-۳ TBM های باز

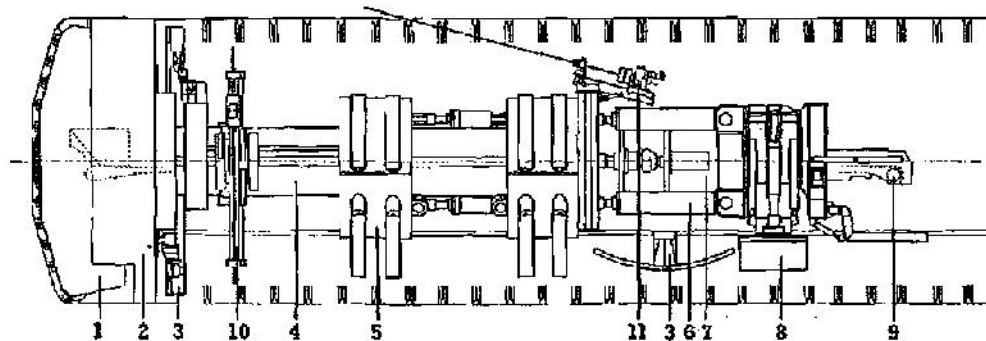
بر خلاف TBM های سپردار که در آنها دستگاه در داخل یک سپر فولادی استوانه‌ای شکل قرار می‌گیرد، TBM های باز بدون سپر محافظ می‌باشند. در این TBM ها، نیروی عکس‌العمل برای رانش صفحه حفاری به جلو توسط چنگزن‌هایی (gripper) که به دیواره تونل تکیه می‌زنند تامین می‌شود.

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

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

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

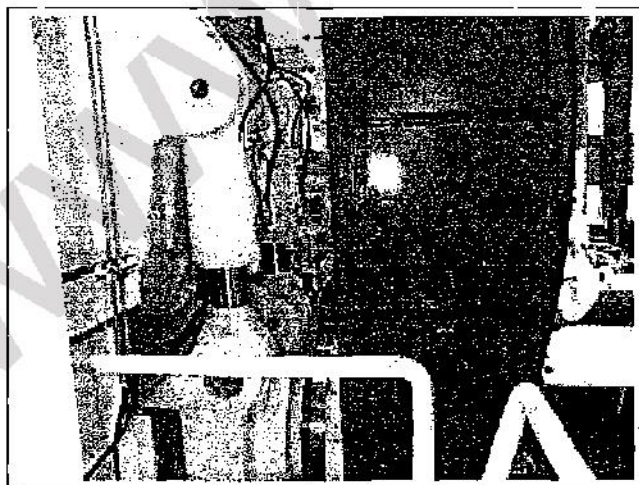
برخلاف TBM های سپردار که در آنها نصب پوشش سگمنتی (segment lining) مستقل از کیفیت سنگ است، میزان عملکرد TBM باز به وسعتی از سنگ که نیاز به پایداری دارد و زمان مورد نیاز برای پایداری بستگی دارد.



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

شکل ۳-۱۰- نمای از یک TBM باز

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



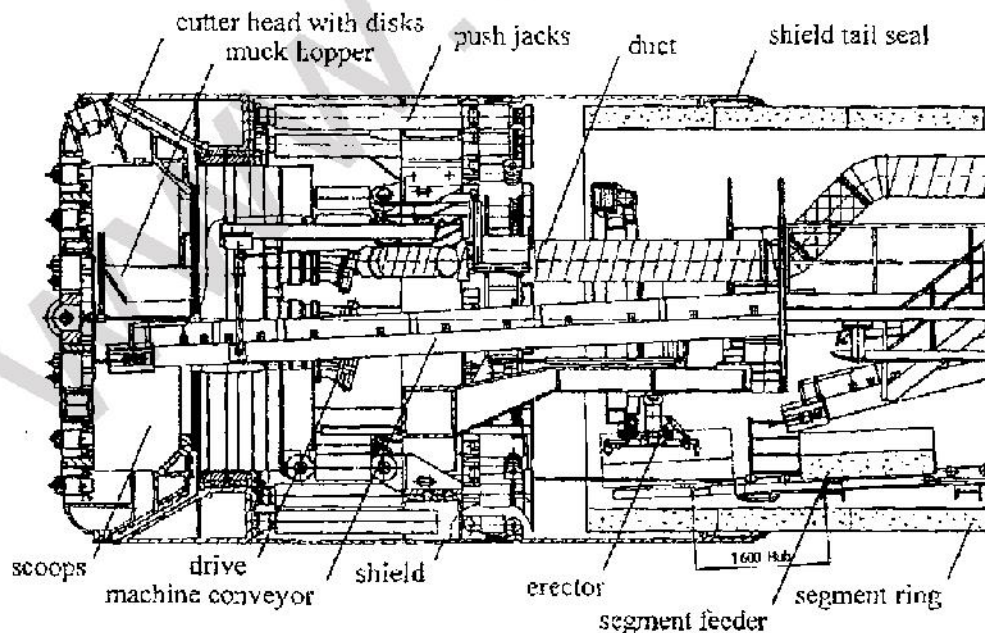
شکل ۳-۱۱- جکهای مربوط به تغییر جهت یک TBM دارای تک چنگزن

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

۳-۲-۲-۲-۲ TBM های تک سپری

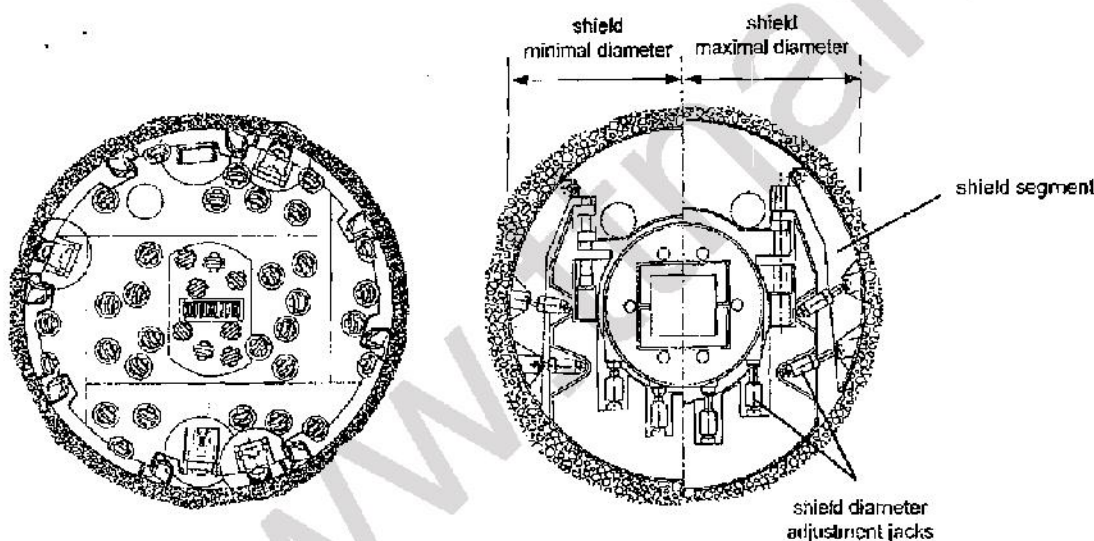
TBM های سپردار در شرایطی که سنگ ناپایدار است و احتمال ریزش زمین وجود دارد، کاربرد دارند. سپر برای محافظت و مهار سنگ و محافظت پرسنل و تجهیزات عمل می‌کند. پوشش از سگمنت‌های پیش ساخته بتنی ساخته می‌شود که توسط وسیله مخصوص در محل خود قرار داده شده و معمولاً به همدیگر پیچ می‌شوند.

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



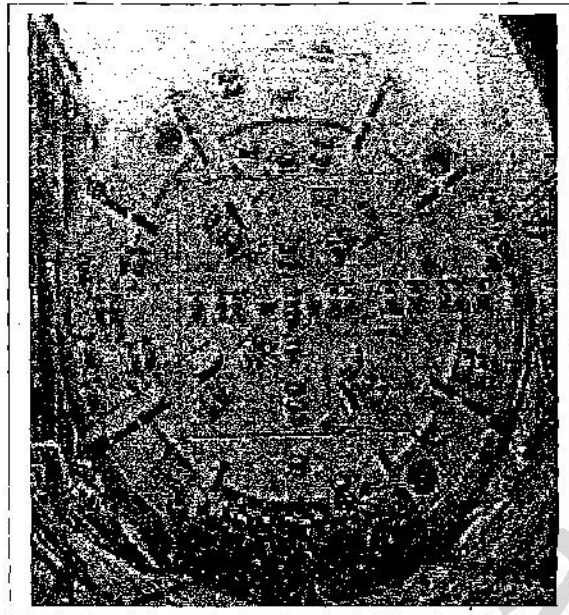
شکل ۳-۱۲- نمای از یک TBM تک سپری

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



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

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



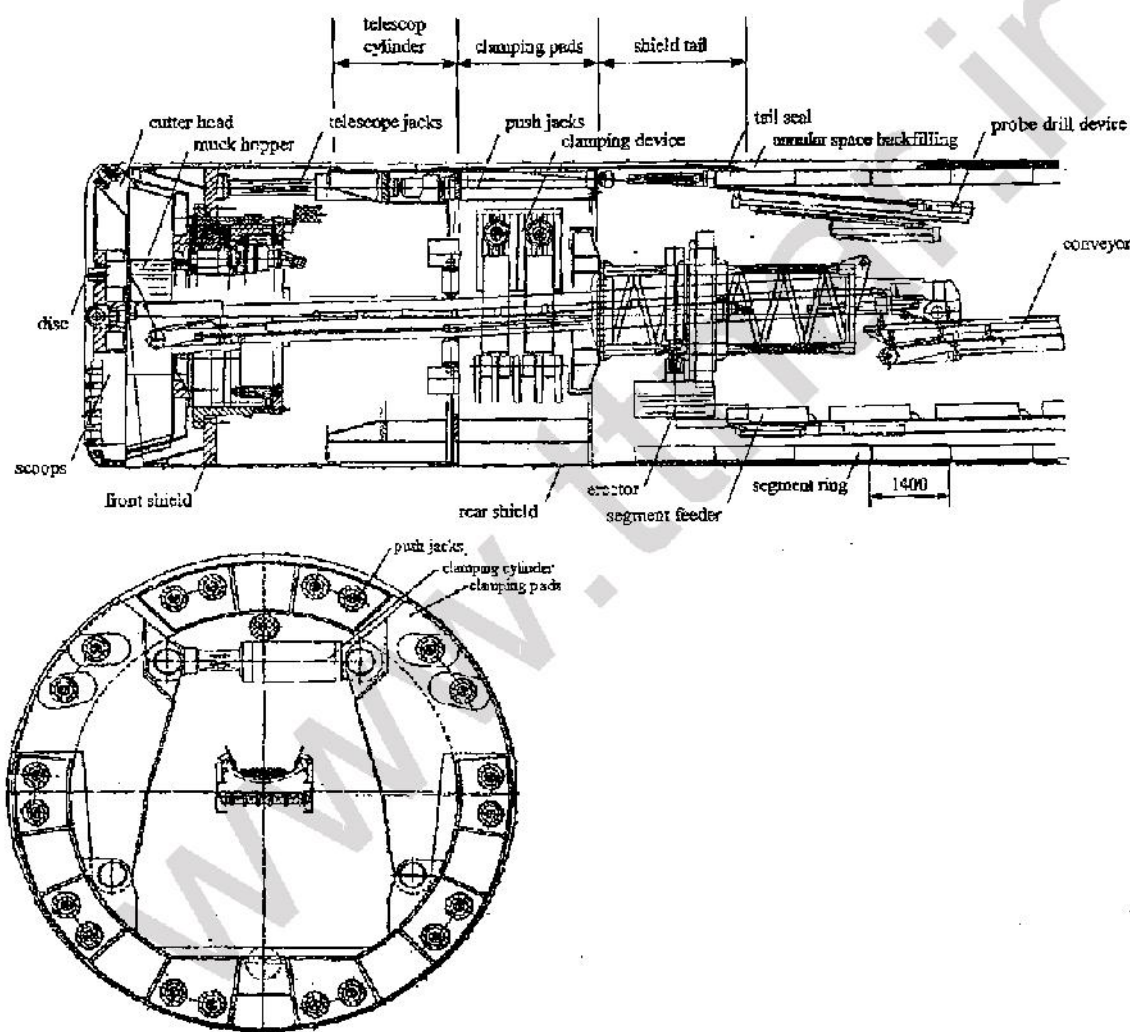
شکل ۳-۱۴- نمای یک TBM تک سپری مورد استفاده در یک تونل راه
و نیز یک تونل راه آهن به قطر ۱۱/۹ متر

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

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

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

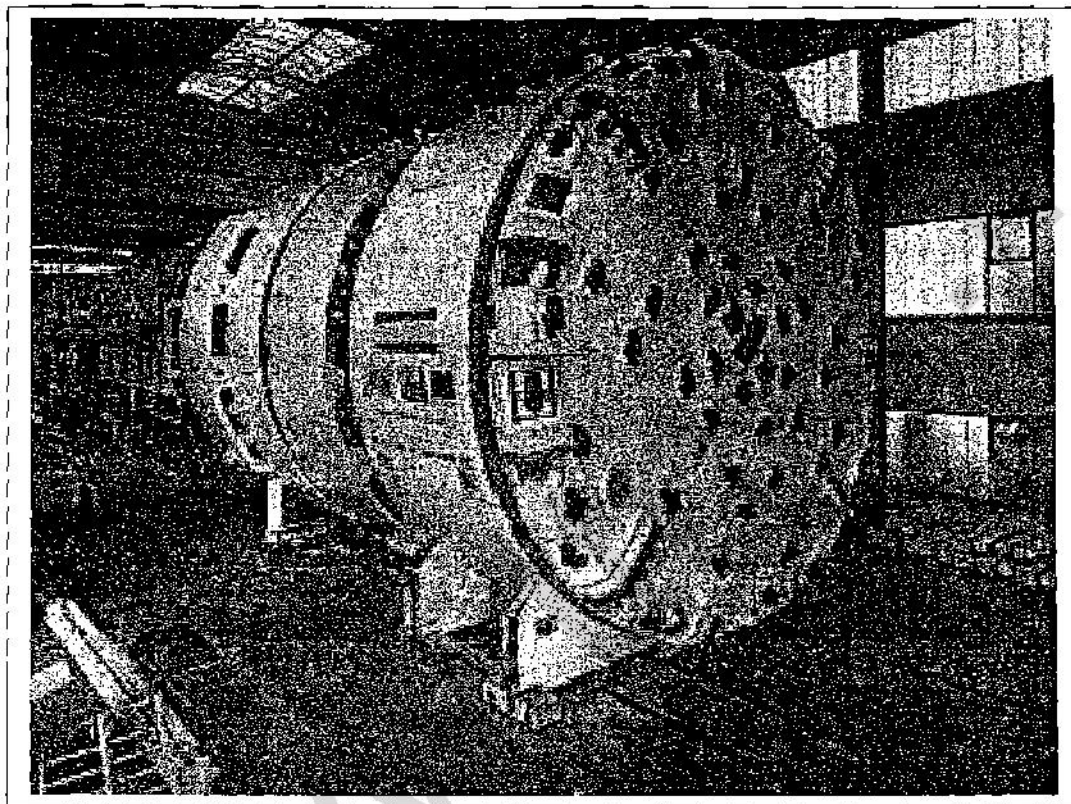
TBM های دوسپری قادرند همزمان با حفاری، عمل نصب سگمنت ها را نیز انجام دهند و عمل حفاری در اینگونه TBM ها فقط برای مدت زمان کوتاهی جهت جلو رفتن سپر عقبی بعد از هر کورس حفاری (boring stroke) متوقف می شود. در TBM های تک سپری، در حین نصب سگمنت ها، دستگاه قادر به حفاری نمی باشد. بنابراین، سرعت حفاری با یک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



شکل ۳-۱۵- نمای از یک TBM دوسپری

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

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



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

۳-۲-۳ انواع ابزار برش و کاربرد آنها

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

۱- ابزار برش کلنگی (pick) یا اسکینای (drag bit)

۲- ابزار برش دیسکی (disc)

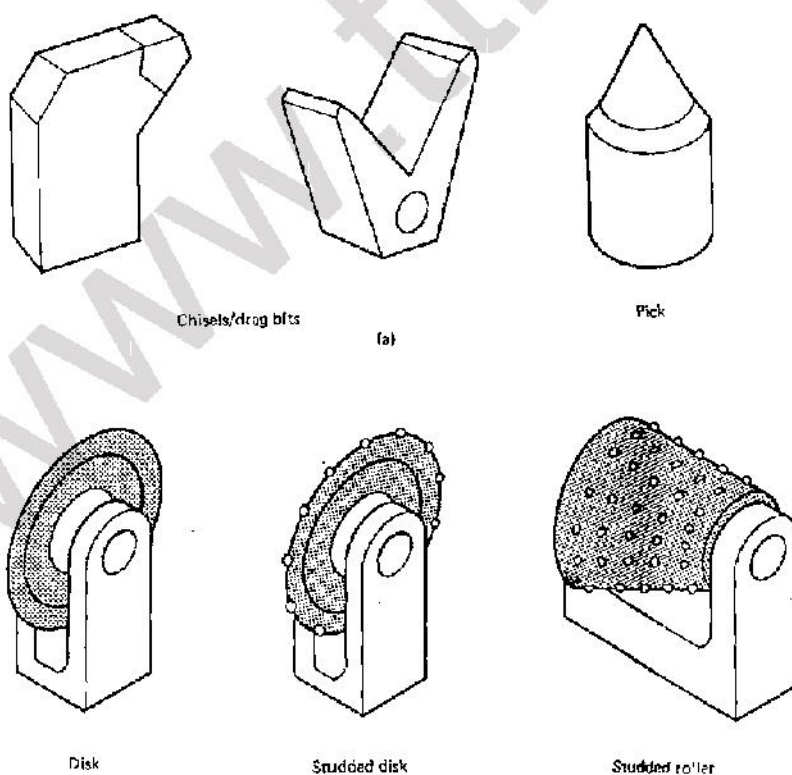
۳- ابزار برش غلتکی (roller)

ابزار برش کلنگی یا اسکنه‌ای:

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

ابزار برش دیسکی:

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



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

ابزاربرش غلتکی؛

ابزاربرش غلتشی دارای دو نوع اصلی هستند :

۱- نوع دندانهای (milled tooth type)

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

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

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

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

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

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

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

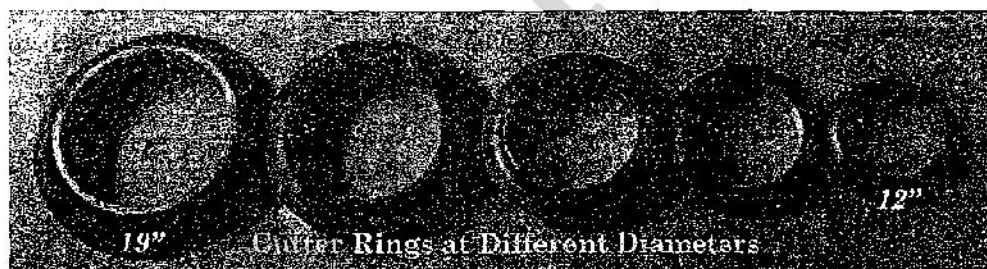
اصل اساسی که بازدهی خرد کردن سنگ بوسیله دستگاه را افزایش می دهد افزایش اندازه قطعات خرد شده است. یعنی ابزار برش باید طوری چیده شوند که بزرگترین اندازه قطعات خرد شده بدست آید. در یک TBM مخصوص سنگ سخت اگر بار هر کاتر افزایش داده شود، کاتر بیشتر در سنگ فرو می رود و با

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

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



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



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

۳-۲-۴ عملکرد TBM

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

نگهداری و پایداری زمین از مهمترین عوامل حاکم بر موفقیت یک پروژه تونلسازی هستند، ولی وقتی تونلسازی در سنگهای سخت انجام 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 جنبه ظرفیت مکانیکی، هیدرولیکی، توان و ساختاری بهبود یا افزایش یابد، یک عامل مهم، سرعت چرخش صفحه حفاری است. این مسئله به طور اساسی به ظرفیت تحمل بار ابزار برش (cutter bearing capacity) و شدت بارگذاری ضربه ای (shock loading) تحمل شده توسط ابزاربرش بستگی دارد که میتواند منجر به افزایش نرخ سایش و خسارت ابزاربرش شود.

نتایج حاصل از بررسیهایی که برای بالا بردن قدرت ابزاربرش جهت غلبه بر سنگهای سخت تر به عمل آمد، این بود که عوامل محدود کننده عبارتند از ظرفیت تحمل بار ابزاربرش و مصالح لبه ابزاربرش یا بخشی از ساختار ابزاربرش که در تماس با سنگ قرار می‌گیرد. در اوائل دهه ۱۹۷۰ دستگاههایی که طراحی شده بودند قادر به اعمال حداکثر حدود ۱۰ تن بار پیوسته بر روی هر ابزاربرش بودند. در ضمن بارهای ضربه‌ای حدود ۲/۵ تا ۳ برابر بار پیوسته غالباً بر هر ابزاربرش اعمال میشد، بهر حال، در دهه ۱۹۷۰ ابزاربرش از جنبه طراحی تا جایی توسعه یافتند که قادر به تحمل ۱۵ تا ۲۰ تن بارگذاری پیوسته باشند و نتیجه این پیشرفتهای افزایش بسیار زیاد نرخ نفوذ در سنگهای سخت در حین افزایش عمر ابزاربرش و در نتیجه کاهش هزینه های ابزاربرش بود. با بهبود ظرفیت تحمل بار ابزاربرش، محدودیت یا عامل محدود کننده باقیمانده، مواد لبه ابزاربرش بود. یک نکته مهم، توزیع حدود ۲۰ تن بار فشاری پشت ابزاربرش بر روی سطح تماسی از سنگ با کمتر از ۶ سانتیمتر مربع مساحت بود. این حقیقت را نیز باید در نظر گرفت که حداکثر بار تا ۳ برابر این مقدار نیز ممکن بود برسد. در نتیجه لازم بود که مقاومت فولاد ابزار برش فوق العاده بالا رود و در ضمن توانایی 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 ماده بدنه ابزاربرش نشاندۀ می‌شد. هر چند این تکه های کاربیدی مقاومت بسیار بالایی در برابر سایش از خود نشان می‌دادند، ولی از جنبه تحمل بارهای بسیار زیادی که ابزاربرش جدید باید تحمل می‌کردند، دچار محدودیت بودند. بهر حال، برای رفع این نقیصه و به منظور توزیع بهتر بارهای وارده، فاصله جاگذاری این تکه های کاربیدی کمتر و به هم نزدیکتر گردید، بدین ترتیب حفر تونل و سنگهای بسیار سخت (با مقاومت بیش از ۳۵۰ مگاپاسکال) با قطرهای بزرگ، از جنبه اقتصادی توجیه پذیر شد.

عملکرد TBM به وسیله پارامترهای زیر سنجیده میشود.

الف- سرعت نفوذ (penetration rate)

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

زمان حفاری / طول حفاری شده = PR

ب- بهره‌وری دستگاه (utilization)

درصدی از زمان شیفت که صرف حفاری می‌شود.

۱۰۰ × زمان شیفت / زمان حفاری دستگاه = U

ج- سرعت پیشروی (advance rate)

زمان شیفت / طول حفاری شده = AR

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

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

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

جدول ۳-۶- روش های مختلف تعیین سرعت نفوذ

روش	رابطه	ملاحظات
Roxborough & Phillips (1975)	$P = \left(\frac{1}{(D-P)} \right)^{0.333} \times \left(\frac{F_n}{4.UCS \times tg\left(\frac{\theta}{2}\right)} \right)^{0.666}$	UCS بین ۷۰ تا ۲۰۵ مگاپاسکال، مقاومت کششی بین ۵۵ تا ۱۳۸ مگاپاسکال، عرض لبه ابزار برش ۱۱.۴ تا ۱۹ میلی متر، D ۲۸۱ تا ۴۳۲ میلی متر
P نفوذ دیسک بر حسب D قطر ابزار برش بر حسب F_n نیروی عمودی متوسط روی هر ابزار برش بر حسب N ، θ زاویه لبه ابزار برش بر حسب درجه، UCS مقاومت فشاری تک محوره سنگ بر حسب MPa		
Graham (1976)	$P = \frac{3940 F_n}{UCS}$	
P نرخ نفوذ بر حسب F_n ، mm/Rev نیروی متوسط روی هر ابزار برش بر حسب UCS، kN مقاومت فشاری سنگ بر حسب kPa		
Farmer & Glossop (1980)	$P = \frac{624 F_n}{\sigma_{ff}}$	بر مبنای ۶ پروژه حاصل شده است
P نرخ نفوذ بر حسب F_n ، mm/Rev نیروی متوسط روی هر ابزار برش بر حسب σ_{ff} ، kN مقاومت کششی سنگ بر حسب kPa		
Cassinelli (1982)	$P = -0.0059 RSR + 1.59$	
P نرخ نفوذ بر حسب متر بر ساعت، RSR رده بندی Rock Structure Rating		
Bamford (1984)	$P = 0.535.S - 8.49 - 0.00344.T - 0.000823.N + 0.0137\phi$	لای سنگ با لایه بندی ۳۰ تا ۵۰ سانتی متر (پروژه Thompson در استرالیا)
S سختی چکش اشمیت، T نیروی محوری ماشین به تن، N شاخص نفوذ مخروطی بر حسب N/mm ، ϕ زاویه اصطکاک داخلی سنگ بر حسب درجه		

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

روش	رابطه	ملاحظات
Sanio (1985)	$\frac{P_0}{P_{90}} = \frac{I_{s,50,90}}{I_{s,50,0}}$	تأثیر لایه بندی بر نرخ نفوذ
P_0 نرخ نفوذ موازی لایه بندی، P_{90} نرخ نفوذ عمود بر لایه بندی، $I_{s,50,90}$ شاخص بارگذاری نقطه ای عمود بر لایه بندی، $I_{s,50,0}$ شاخص بارگذاری نقطه ای موازی لایه بندی		
Haworth et al. (1986)	$\beta_1 = \frac{\sigma_c}{\sigma_t}, \beta_2 = \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t}$ $P = 26.78 e^{-0.24\beta_1}$ $P = 4\beta_2 10^{10} e^{23.59\beta_2}$	نیروی محوری اعمال شده روی ابزار برش ۳.۱۶ کیلو نیوتن، و بر اساس داده های حاصل از آزمایش بر روی ماسه سنگ و مرمر بدست آمده اند.
β_1, β_2 تردی، σ_c مقاومت فشاری تک محوره، σ_t مقاومت کششی، P نرخ نفوذ بر حسب سانتی متر بر دقیقه		
Lislerud (1988)	$P = ib \times K_s \times K_a$	بر مبنای حفاری های انجام شده در سنگ های شیل، آهک، گنایس و بازالت
P نرخ نفوذ بر حسب mm/Rev ، ib نرخ نفوذ پایه بر حسب mm/Rev ، K_s ضریب اصلاح برای کلاس درزه ها و زاویه میان تونل و امتداد درزه ها، K_a ضریب اصلاح برای قطر ابزار برش		
Sundin & Wanstedt (1994)	$I_B = P_{BI} K_f$ $P = I_B F_n \times rpm \times 0.06$	گرانیت، میکاشیست و گنایس برای مقاومت فشاری ۶۵ تا ۲۰۰ مگاپاسکال؛ شاخص بارگذاری نقطه ای ۱ تا ۹؛ مگاپاسکال، شاخص سوشار ۱.۹ تا ۵.۹
I_B شاخص قابلیت حفر، P_{BI} شاخص نفوذ، K_f 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		

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

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

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

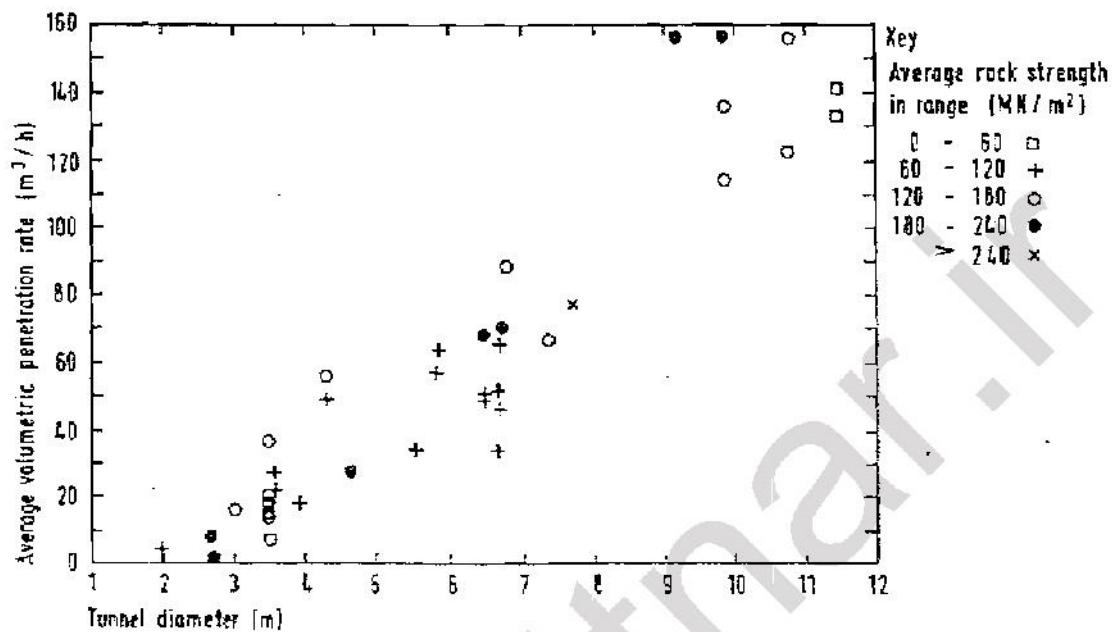
- حداکثر سرعت نفوذ لحظه‌ای (maximum instantaneous penetration rate) برابر ۷.۶۲ متر بر ساعت بود که مربوط به گرانودیوریت (granodiorite) با مقاومت فشاری حداکثر ۲۰۷ مگاپاسکال بود.
- مقدار میانگین تمام حداکثر سرعت‌های نفوذ لحظه‌ای برابر ۳.۸۸ متر در ساعت و
- مقدار میانگین تمام سرعت‌های نفوذ متوسط (average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

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

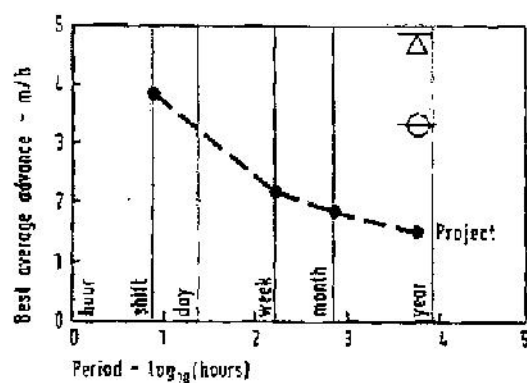
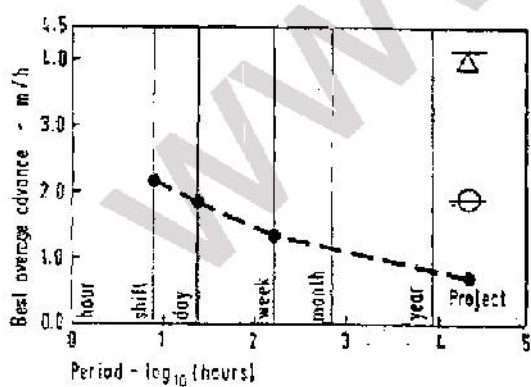
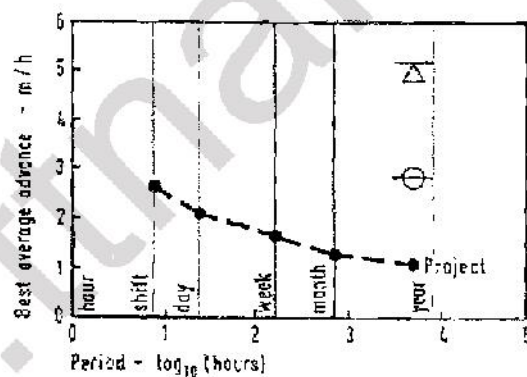
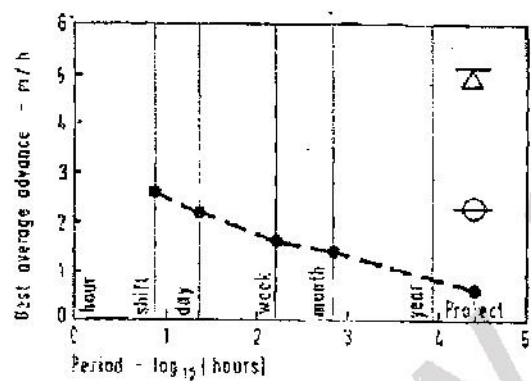
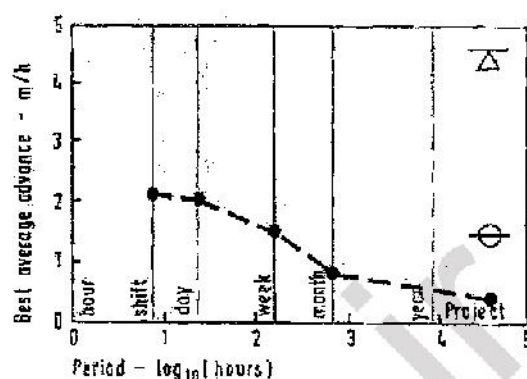
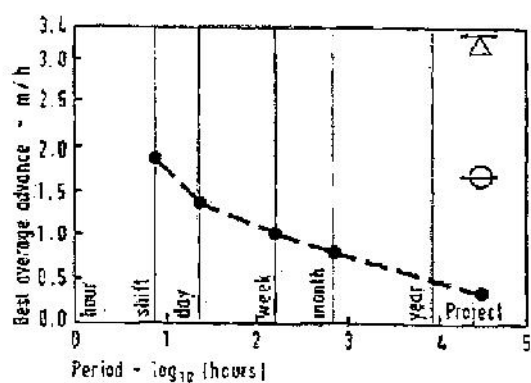
- بهترین پیشرفت روزانه، ۴.۱۵ متر در ساعت
- بهترین پیشرفت هفتگی، ۳.۰۴ متر در ساعت
- بهترین پیشرفت ماهانه، ۲.۶۸ متر در ساعت
- پیشرفت در طول پروژه، ۱.۰۹ متر در ساعت

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

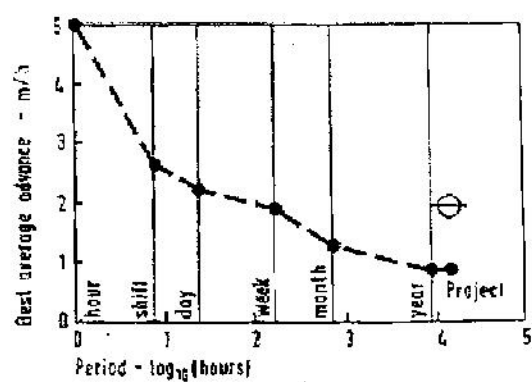
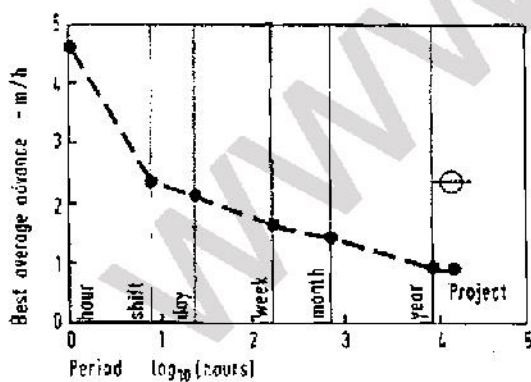
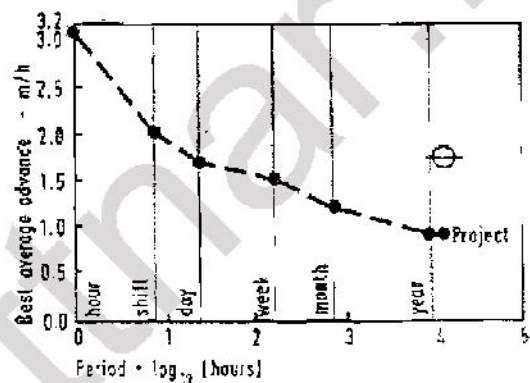
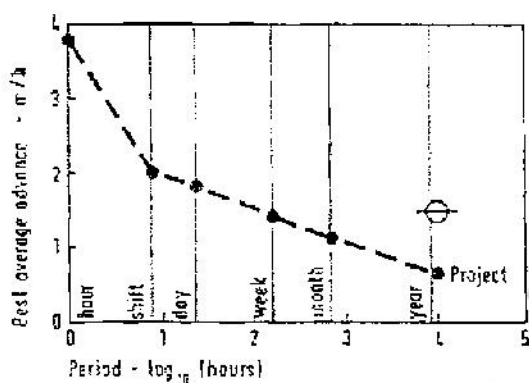
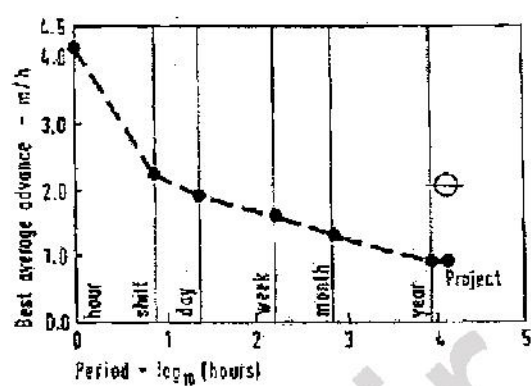
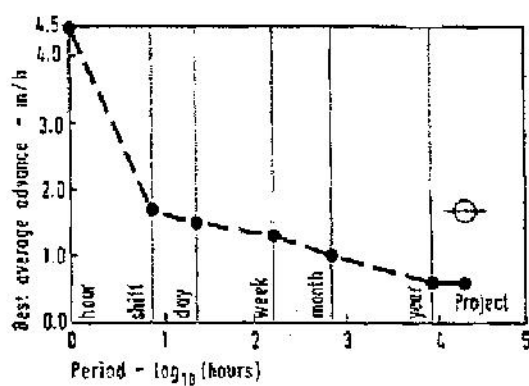
یکنواخت بود. در شکل ۳-۲۰ سرعت پیشروی در بازه‌های مختلف زمانی برای ۱۲ تا از پروژه‌های بررسی شده توسط CIRIA آورده شده‌است.



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



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



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

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

قبلا ملاحظه شد که شاخص Q بصورت زیر تعریف میشود:

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

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

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

که در آن RQD_0 مقدار RQD در امتداد حفر تونل می باشد. J_r, J_a, J_n 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):

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

و برای گسیختگی کششی (tensile failure):

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

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

CLI : شاخص عمر ابزار برش (cutter life index)

q : محتوی کوارتز بر حسب درصد

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

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

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

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

m از رابطه زیر حساب می شود:

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

m_1 - گرادیان اولیه

D : قطر TBM بر حسب متر

n : تخلخل بر حسب درصد

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

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

مثال عملی:

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

صفحه I- اطلاعات ورودی

الف- پایداری (و گرادیان اولیه m_1)

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

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

ب- Q_0 جهت دار شده (در جهت تونل سازی)

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

ناحیه	β°	RQD/J_n	J_r/J_u	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)

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

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	۱۴	۱.۲۵
۳- میکاشیست	۲.۶	۱۵۰	۴.۵	۲۱	۴	۱۹	۳
۴- گرانیت	۲.۷	۲۰۰	۴۴	۴۸	۸	---	---
				⊥ یا		⊥ یا	

د- Q_{TBM}

$$Q_{TBM} = Q_0 \times \frac{SIGMA}{F^{10}/20^9} \times \frac{20}{CLI} \times \frac{q}{20} \times \frac{\sigma_v}{5} \quad (\text{برش دهنده } \tau = 20 \text{ یا } 20^9 / F^{10} = 0.0054)$$

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

ز- گرانیدان (m)

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

ناحیه	m_l	$D(m)$	$n(\%)$	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

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

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

ه- زمان برای پیشروی طول L

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

حداکثر ۸۷۳۶

ساعت در سال فرض
میشود

ناحیه	$L(m)$	m	$\left(\frac{1}{1+m} \right)$	$T(hr)$	$T \times AR = L^*$	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
					$\sum T = ۵۲۳۹۳$ ساعت	۶ سال
					$\sum L = ۱۶۰۰۰m$	

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

و- عملکرد کلی

PR, ΣI , ΣT (متوسط وزنی) PR

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

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

نواحی	$\Sigma L(m)$	$\Sigma T(hr)$	\overline{PR}	\overline{AR}
۴، ۱، ۲، ۳	۱۶۰۰۰	۵۲۳۹۳	۶۳۶۰۰/۱۶۰۰۰=۳.۹۸	۷۲۸۰/۱۶۰۰۰=۰.۴۶

ی- سرعت پیشروی در انتهای پروژه

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

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

حفاری ایده آلی که برای فیلیت و شیبست پیش بینی شده است به وضوح امتیاز بزرگ حفاری با TBM را نشان می دهد. در این مثال، با ماسه سنگ و گرانیت، که حفاریشان دشوارتر است، در دو انتهای تونل برخورد می شود و می توان 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 تک سپری و دستگاه دو سپری، کدام نوع دستگاه برای تونل مورد نظر دارای کارایی بیشتری است. همانطور که قبلاً ذکر شد هر کدام از این TBM ها ویژگی های 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 می کند. این اطلاعات و پارامترها از طریق کارفرما یا پیمانکار در اختیار شرکت سازنده دستگاه قرار می گیرد. در بعضی موارد ممکن است افرادی از طرف شرکت های سازنده نیز از محل پروژه بازدید نمایند. از جمله پارامترهای موثر در انتخاب نوع TBM و طراحی آن عبارتند از:

الف - وضعیت زمین شناسی و ژئومکانیکی مسیر تونل؛

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

ب - هندسه تونل :

- قطر تونل
- شیب تونل
- طول تونل

ج - زمان پروژه

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

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

۲-۲-۳ مزایا و معایب TBM

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

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