

بخش دوم

نگهداری در معادن

ایجاد حفریات معدنی مختلف، وضعیت نیروهای مؤثر بر سنگها را تغییر می‌دهد و در این زمینه اغتشاشاتی را به وجود می‌آورد. اگرچه در بعضی موارد، وضعیت سنگها به گونه‌ای است که پس از احداث حفریات نیز همچنان پابرجا باقی می‌ماند اما در بسیاری موارد، اگر حفریات به حال خود رها شوند، پس از مدتی ریزش خواهند کرد. بنابراین باید به نحوی مانع ریزش و تخریب این حفریات شد که این فرایند را نگهداری می‌گوییم.

بدین ترتیب اولین قدم در زمینه طراحی و اجرای سیستم نگهداری تونلها، کارگاههای استخراج و سایر حفریات معدنی، تحلیل پایداری آنهاست. براساس این تحلیل مشخص خواهد شد که آیا حفریات ایجاد شده بدون نصب سیستم نگهداری پایدار می‌مانند و یا اینکه باید بلافاصله و یا مدتی پس از حفر، سیستم نگهداری را نصب کرد.

طی فصلهای این بخش، ابتدا مفاهیم اولیه موردنیاز در نگهداری را تشریح خواهیم کرد و پس از شرح رده‌بندی‌های مختلف سنگها از دیدگاه نگهداری، وضعیت تنش در اطراف حفریات را شرح خواهیم داد. در فصلهای بعدی این بخش مصالح لازم برای نگهداری را شرح خواهیم داد و سرانجام به شرح چگونگی نگهداری حفریات مختلف خواهیم پرداخت.

رده بندی توده های سنگی

۴-۱- آشنایی

معمولاً سنگها را از دو دیدگاه مختلف بررسی می کنند، یکی دیدگاه زمین شناسی است که طی آن سنگها به انواع آذرین، رسوبی و دگرگونی تقسیم می شوند. این تقسیم بندی براساس نحوه تشکیل سنگ و ترکیب کانی شناسی آن انجام می گیرد. دیدگاه دیگر، نگاه مهندسی به سنگهاست که طی آن صرف نظر از نوع سنگ، آن را به عنوان مصالح صنعتی در نظر می گیرند.

در این تقسیم بندی، سنگ از نظر توانایی نگهداری حفريات زیرزمینی مورد قضاوت قرار می گیرد. البته مسئله حفر سنگها نیز در همین دیدگاه بررسی می شود. در این فصل، روشهای مختلف تقسیم بندی سنگها را با توجه به توانایی آنها از نظر نگهداری تونلها و سایر حفريات زیرزمینی مورد بررسی قرار می دهیم.

۴-۲- رده بندی مهندسی

طرح رده بندی مهندسی سنگها، سابقه ای دیرینه دارد و به سال ۱۸۷۹ میلادی باز می گردد که در آن سال، ریترا^۱، نوعی طبقه بندی مهندسی سنگها را برای طراحی سیستم نگهداری تونلها، ارائه داد. پس از این رده بندی، رده بندی های دیگری در مورد توده های سنگی انجام گرفت که در زیر به اختصار آنها را بررسی می کنیم.

۴-۲-۱- رده بندی ترزاقی^۲: قدیمی ترین مرجع رده بندی مهندسی توده های سنگی برای طراحی سیستم نگهداری تونلها مقاله ای است که در سال ۱۹۴۶ میلادی توسط ترزاقی ارائه شد [۹]. در این طبقه بندی سنگها به انواع زیر تقسیم می شد [۹]:

الف - سنگ بکر: سنگ بکر سنگی است که فاقد درزه و ترکهای مویی باشد. بنابراین، شکستگی سنگ در قسمتهای سالم آن اتفاق می افتد. در اثر آتشباری در چنین سنگی، ممکن است ساعتها و حتی روزها پس از آتشباری، قطعاتی از سقف ریزش کند. این وضعیت به نام شرایط

۱- Ritter

۲- Terzaghi

ریزش^۱ نامیده می‌شود. در مورد سنگهای بکر سخت ممکن است وضعیت پوکیدن^۲ نیز دیده شود که طی آن قطعاتی از دیواره یا سقف تونل به طور ناگهانی جدا می‌شود و سقوط می‌کند [۹].

ب – سنگ لایه لایه^۳: چنین سنگی از لایه‌های مجزایی تشکیل شده که چسبندگی لایه‌ها ممکن است ناچیز باشد و لایه‌ها در امتداد صفحات لایه بندی به آسانی از هم جدا شوند. در صورتی که سنگ درزه‌های عرضی هم داشته باشد، در این امتداد نیز ضعیف خواهد بود. در چنین سنگی، وقوع شرایط ریزش امری عادی است [۹].

ج – سنگ نسبتاً درزه‌دار^۴: این سنگ دارای درزه‌ها و ترکهای مویی است اما قطعات سنگ سالم بین درزه‌ها به گونه‌ای در داخل یکدیگر تداخل کرده‌اند که به هنگام حفر تونل در آنها، نیازی به نگهداری دیواره‌های قائم نیست. در چنین سنگی، ممکن است هر دو پدیده ریزش و پوکیدن، رخ دهد.

د – سنگ قطعه‌ای^۵ و رگه‌دار^۶: این سنگ از قطعاتی تشکیل شده است که هر کدام از نظر شیمیایی، بکر یا تقریباً بکراند اما به طور کامل از هم مجزا هستند و قفل شدگی قطعات کامل نیست. دیواره‌های قائم تونلهایی که در این گونه سنگها احداث می‌شوند، ممکن است نیاز به نگهداری داشته باشند.

ه – سنگ خردشده^۷: چنین سنگی مرکب از قطعات متعددی است که هر کدام ممکن است بکر و سالم باشند و امکان جاری شدن این قطعات به داخل تونل وجود دارد. اگر ابعاد تمام یا قسمتی از این قطعات در حد ذرات ماسه ریز باشد و در مورد آنها پدیده سیمانی شدن دوباره اتفاق نیفتاده باشد، در این صورت در مواردی که این سنگها در زیر سطح ایستایی قرار گیرند، رفتار آنها مشابه رفتار ماسه‌های آبدار خواهد بود.

و – سنگ لهیده^۸: اگر در چنین سنگی تونل حفر شود، توده سنگ به آهستگی به داخل تونل حرکت می‌کند، بدون آنکه افزایش حجم آن محسوس باشد. شرایط لازم برای بروز این پدیده، وجود درصد بالایی از ذرات میکروسکوپی گروه کانیهای میکا و رس است که قابلیت تورم آنها کم باشد.

ز – سنگ آماس‌پذیر^۹: چنین سنگی، در اثر تورم ذرات، به داخل تونل جریان می‌یابد. این خاصیت محدود به سنگهایی است که حاوی کانیهای رسی از قبیل مونت موریلونیت^{۱۰} با قابلیت تورم بالا هستند.

۱ – Spalling condition

۲ – Moderately jointed

۳ – Crushed rock

۴ – Montmorillonite

۵ – Popping condition

۶ – Blocky

۷ – Squeezing rock

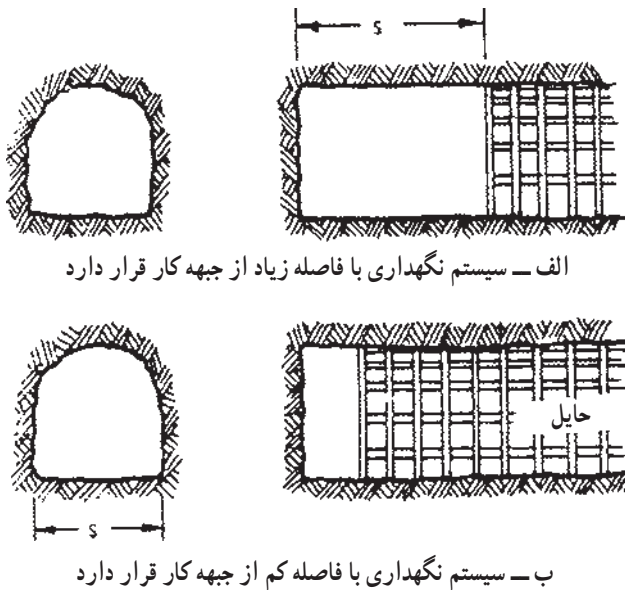
۸ – Stratified rock

۹ – Seamy

۱۰ – Swelling rock

مطالعه آزاد

۲-۲-۴- رده بندی بر مبنای زمان پابرجایی: در سال ۱۹۵۸ میلادی، لوفر^۱، رده بندی جدیدی بر مبنای زمان پابرجایی^۲ سنگها ارایه کرد. مقصود از زمان پابرجایی، زمانی است که تونلی که با دهانه فعال معین در داخل سنگ حفر شده است، بدون هیچگونه وسیله نگهداری پابرجا بماند و ریزش نکند. دهانه فعال تونل به عنوان فاصله بین دو دیواره تونل و یا فاصله بین جبهه کار و نزدیکترین وسیله نگهداری نصب شده در تونل (هر کدام که بزرگتر باشد)، تعریف می شود (شکل ۴-۱).

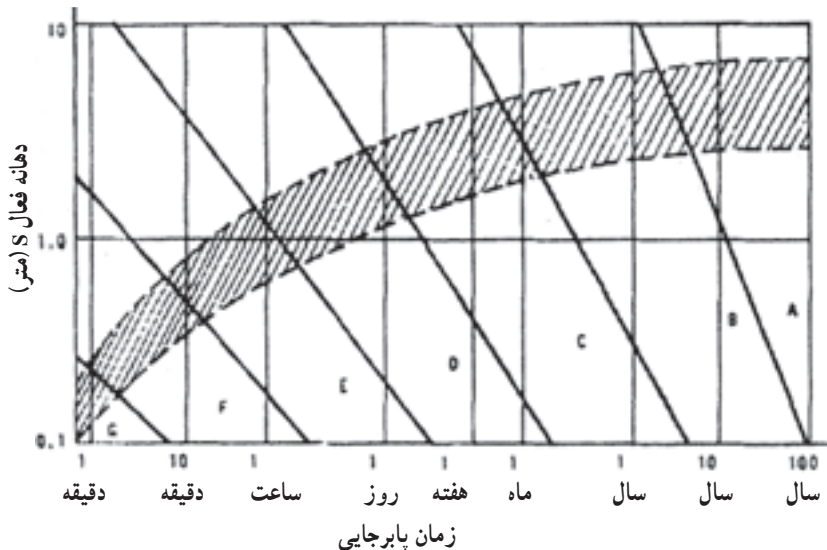


شکل ۴-۱- تعریف دهانه فعال [۱۰]

بسته به زمان پابرجایی و دهانه فعال تونل، سنگها در تقسیم بندی لوفر به ۷ گروه A تا G تقسیم می شوند. در این تقسیم بندی A سنگ خیلی خوب (معادل سنگ بکر در رده بندی ترزاقی) و G سنگ خیلی ضعیف (معادل سنگ لهیده یا سنگ آماس پذیر در رده بندی ترزاقی) است (شکل ۴-۲).

۱- Lauffer

۲- Stand - up time



شکل ۴-۲- رده بندی سنگها بر اساس زمان پابرجایی [۱۰]

رده بندی اولیه لوفر، بعدها توسط افراد زیادی تکمیل شد که از آن جمله می توان به تحقیقات پاشر^۱ و همکارانش در سال ۱۹۷۴ میلادی اشاره کرد. این تحقیقات، بخشی از نگرش عمومی تونل سازی موسوم به روش جدید اتریشی را تشکیل می دهد [۹].

اهمیت روش رده بندی بر مبنای زمان پابرجایی از این واقعیت منشأ می گیرد که هر چقدر دهانه فعال تونل زیادتر باشد، فرصت نصب سیستم نگهداری تونل کاهش می یابد. به عنوان مثال در حالی که یک تونل کوچک پیشاهنگ را عملاً می توان بدون نیاز به سیستم نگهداری به آسانی احداث کرد، در عین حال در همان سنگ، یک تونل با دهانه بزرگ ممکن است بلافاصله پس از حفر، نیاز به نصب سیستم نگهداری داشته باشد.

۴-۲-۳- رده بندی بر اساس شاخص کیفیت سنگ^۲ (RQD): رده بندی سنگها بر اساس شاخص کیفیت سنگ که به نام رده بندی RQD معروف است، در سال ۱۹۶۷ میلادی توسط دیر^۳ و همکارانش ارایه شد [۹]. شاخص RQD بر اساس وضعیت مغزه های حاصل از حفر گمانه های اکتشافی در سنگها، به صورت زیر تعریف می شود:

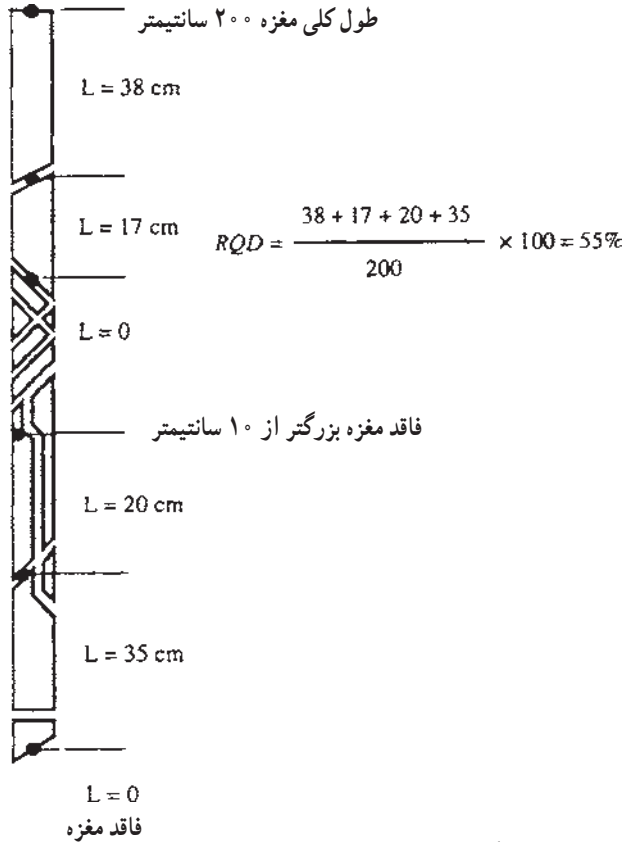
$$RQD = \frac{\text{جمع طول قطعات سالم مغزه های با طول } 10^\circ \text{ سانتیمتر یا بیشتر}}{\text{طول کلی گمانه}} \times 100 \quad (4-1)$$

۱- Pacher

۲- Rock Quality Designation

۳- Deere

در این رده بندی، گمانه باید به وسیله مته NX حداقل به قطر ۵۴/۷ میلی‌متر (۲/۱۵ اینچ) و به کمک مغزه گیرهای دو جداری حفر شده باشد [۹]. در شکل (۳-۴)، مثالی از نحوه محاسبه شاخص RQD نشان داده شده است.



شکل ۳-۴- مثالی از نحوه محاسبه شاخص RQD [۹]

طبق نظر پالم استروم^۱ (۱۹۸۲) در موردی که مغزه‌های سالم در دسترس نباشد اما در رخنمونهای سطحی و یا حفاریات اکتشافی، آثار شکستگی در سنگ مشخص باشد، شاخص RQD را می‌توان از روی تعداد ناپیوستگی‌های موجود در واحد حجم سنگ و براساس رابطه زیر تعریف کرد [۹]:

$$RQD = 115 - 3/3Jv \quad (2-4)$$

که در آن Jv تعداد کل درزه‌ها و ناپیوستگی‌های موجود در واحد طول در مورد تمام مجموعه درزه‌ها و شکستگی‌های موجود در سنگ است و به نام شمارش حجمی درزه‌های سنگ نامیده می‌شود. باید

^۱ Palmstrom

توجه داشت که در حالت کلی، شاخص RQD وابسته به جهت حفر گمانه است و امکان دارد که اندازه آن در امتدادهای مختلف، در حد قابل توجهی تغییر کند. در مواردی که تعداد درزه‌ها در امتدادهای مختلف متفاوت باشد، استفاده از رابطه ۴-۲، تا حد زیادی نقش امتداد را در تعیین شاخص RQD کلی سنگ، کاهش می‌دهد.

شاخص RQD برای بیان کیفیت سنگ به حالت برجا، بسیار مفید است و برای تعیین آن، باید درزه‌های حاصل از حفر گمانه و جابه‌جایی مغزه‌ها را شناسایی کرد و در محاسبه تعداد درزه‌ها در رابطه ۴-۲، آنها را کنار گذاشت تا شاخص کیفیت واقعی سنگ به دست آید. درزه‌های ناشی از آتشیاری در سنگها نیز مشمول این قانون هستند.

توصیه شده که بهتر است شاخص RQD برای هر دو متر از مغزه‌ها، به طور مجزا محاسبه شود [۱۰]. براساس شاخص RQD، سنگها را مطابق جدول (۴-۱) تقسیم بندی می‌کنند [۱۰].

جدول ۴-۱- تقسیم بندی کیفی سنگها براساس شاخص

RQD [۱۰]

کیفیت سنگ	شاخص RQD - درصد
خیلی ضعیف	کمتر از ۲۵
ضعیف	۲۵ تا ۵۰
مناسب	۵۰ تا ۷۵
خوب	۷۵ تا ۹۰
خیلی خوب	۹۰ تا ۱۰۰

با معلوم بودن شاخص RQD، با مراجعه به جدولها و نمودارها، می‌توان سیستم نگهداری لازم برای تونل را برآورد کرد.

۴-۳- رده بندی ژئومکانیکی (RMR)^۱

در سال ۱۹۷۶ میلادی، بینیاوسکی^۲ از مرکز مطالعات علمی و صنعتی آفریقای جنوبی (CSIR)^۳ طبقه بندی جدیدی از سنگها را بر مبنای ویژگیهای ژئومکانیکی آنها ارایه داد که به روش RMR یا

۱- Rock Mass Rating (RMR)

۲- Bieniawski

۳- South African Council for Scientific and Industrial Research

CSIR معروف است و به عنوان یکی از موفق‌ترین سیستم‌های رده‌بندی سنگها در مسائل تونل‌سازی و معدنی به کار می‌رود. بعدها، در سال ۱۹۸۹ میلادی، بیناوسکی رده‌بندی اولیه خود را اصلاح کرد و آنچه در زیر خواهد آمد، بر مبنای رده‌بندی تجدید نظر شده وی است.

در تقسیم بندی RMR، برای رده بندی سنگها از ۶ پارامتر زیر استفاده می‌شود [۹]:

الف - مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ

ب - شاخص RQD

ج - فاصله‌داری درزه‌ها

د - وضعیت ناپیوستگی‌های سنگ

ه - وضعیت آبهای زیرزمینی

ز - جهت یافتگی ناپیوستگی سنگ نسبت به امتداد تونل

در این رده بندی، توده سنگ از نظر ساختاری به چند ناحیه تقسیم شده و هر ناحیه به طور مجزا رده بندی می‌شود. مرز نواحی یاد شده با یک پدیده ساختاری مثلاً وجود یک گسل و یا تغییر محسوس در نوع سنگ، مشخص می‌شود. در بعضی موارد، تغییرات مهم و قابل توجه در وضعیت ناپیوستگیها در یک نوع سنگ واحد نیز سبب می‌شود که توده سنگ، به چند ناحیه کوچکتر تقسیم شود. برای اینکه ارزش عددی هر سنگ در رده بندی RMR مشخص شود، به ازای هر وضعیت از ۶ پارامتر اصلی یاد شده، نمره‌ای تعلق می‌گیرد که برای تعیین ارزش عددی آنها باید به جدولهایی که در این زمینه موجود است مراجعه کرد [۱۱]. پس از تعیین ارزش عددی هر یک از ۶ پارامتر یادشده، از مجموع آنها عددی حاصل می‌شود که شاخص RMR سنگ نام دارد.

مطالعه آزاد

در سال ۱۹۸۹ میلادی، بیناوسکی دستورالعمل‌هایی را برای انتخاب سیستم نگهداری تونلها براساس شاخص RMR منتشر ساخت. این دستورالعمل، در جدول ۲-۴ آمده است.

باید توجه داشت که این دستورالعمل برای تونلهای با شرایط زیر تنظیم شده است:

شکل: نعل اسبی

دهانه فعال: ۱۰ متر

روش حفاری: آتشیاری

تنش قائم مؤثر بر سنگها: کمتر از ۲۵MPa (عمق کمتر از ۹۰۰ متر از سطح زمین).

به عنوان مثال فرض می‌کنیم که شاخص RMR یک توده سنگی معادل ۵۹ باشد با مراجعه به جدول ۲-۴ با این پیشنهاد مواجه می‌شویم که تونل باید به صورت پله‌ای حفر شود و قسمت بالایی جبهه کار جلوتر از بقیه قسمت‌ها باشد و پله‌های بعدی به فاصله ۱/۵ تا ۳ متر از آن حفر شوند. پس از هر نوبت آتشیاری، باید سیستم نگهداری نصب شود و فاصله سیستم نگهداری تا جبهه کار تونل از حداکثر ۱۰ متر تجاوز نکند. در این مورد استفاده از پیچ سنگهای به قطر ۲۰ میلی‌متر و فاصله ۱/۵ تا ۲ متر در تاج و دیواره تونل توصیه شده است. همچنین استفاده از سیستم بتن پاشی به ضخامت ۵۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر در تاج و ضخامت ۳۰ میلی‌متر در دیواره‌ها توصیه شده است.

شاخص RMR معادل ۵۹، نشانگر آن است که سنگ در مرز دو رده سنگهای مساعد و خوب قرار دارد. بنابراین در مراحل اولیه طراحی، توصیه می‌شود که سیستم نگهداری تونل براساس رده مساعد انتخاب شود. پس از پیشروی مقداری از تونل، در صورتی که سیستم نگهداری انتخابی مناسب بود و هیچگونه مشکلی از نظر نگهداری پیش نیامد، به تدریج می‌توان سیستم نگهداری را مطابق سنگ خوب تعدیل کرد. از سوی دیگر، اگر مدت زمان استفاده از تونل کوتاه باشد، در این صورت پیشنهاد می‌شود که سیستم نگهداری براساس سنگ خوب انتخاب شود که فاصله‌دارتر و ارزان‌تر است.

۴-۴- رده بندی براساس شاخص کیفیت تونل سازی Q

بارتون^۱ و همکارانش از انستیتو ژئوتکنیک نروژ (NGI)^۲ بر مبنای ارزیابی تعداد زیادی از حفريات زیرزمینی، شاخصی موسوم به شاخص کیفیت تونل سازی^۳ را ارایه کردند که به نام شاخص Q معروف است. این رده بندی برای طراحی سیستم نگهداری تونلها به کار می‌رود. شاخص Q با رابطه ریاضی زیر تعریف می‌شود و اندازه عددی آن که به صورت مقیاس لگاریتمی تغییر می‌کند، بین ۰/۰۰۱ تا ۱۰۰۰ در تغییر است [۹]:

۱- Barton

۲- Norwegian Geotechnical Institute (NGI)

۳- Tunnelling Quality Index

شاخص RMR	نوع سنگ	سیستم حفاری	پیچ سنگ به قطر ۲۰ میلی‌متر و محکم شده به وسیله دو غاب سیمان	بتن پاشی (شاتکریت)	قابهای فولادی
۸۱ تا ۱۰۰	I خیلی خوب	ماشینهای تمام مقطع با ۳ متر پیشروی در هر نوبت	در حالت کلی نیازی به نصب سیستم نگهداری نیست و در بعضی موارد پیچ سنگهای منفرد		
۶۱ تا ۸۰	II خوب	ماشینهای تمام مقطع با پیشروی ۱ تا ۱/۵ متر در هر نوبت به فاصله ۲۰ متری از جبهه کار سیستم نگهداری دایم نصب شود.	به طور موضعی در قسمت تاج تونل پیچ سنگهایی به طول ۳ متر و به فاصله ۲/۵ متر و گاه نیز همراه با توری فلزی نصب شود.	در موارد لزوم ضخامت ۵۰ میلی‌متر در قسمت تاج	لازم نیست
۴۱ تا ۶۰	III نسبتاً خوب	تونل به صورت پله‌ای حفر شود و پله قسمت فوقانی ۱/۵ تا ۳ متر جلوتر باشد. پس از هر نوبت آتشیاری سیستم نگهداری موقت نصب شود. به فاصله ۱۰ متری از جبهه کار سیستم نگهداری نصب شود	شبکه پیچ سنگهای منظم به طول ۴ متر و فاصله ۱/۵ تا ۲ متر در قسمت تاج و دیواره در قسمت تاج شبکه فلزی نیز نصب شود.	ضخامت ۵۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر در قسمت تاج و ۳۰ میلی‌متر در دیواره‌ها	لازم نیست
۲۱ تا ۴۰	IV ضعیف	تونل به صورت پله‌ای حفر شود و پله قسمت فوقانی ۱ تا ۱/۵ متر جلوتر باشد. فاصله سیستم نگهداری دایم تا جبهه کار حداکثر ۱۰ متر	شبکه پیچ سنگهای منظم به طول ۴ تا ۵ متر و به فاصله ۱ تا ۱/۵ متر در تاج و دیواره همراه با توری فلزی	ضخامت ۱۰۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر در تاج و ۱۰۰ میلی‌متر در دیواره‌ها	قابهای سبک تا متوسط فولادی به فاصله ۱/۵ متر در موارد لزوم
کمتر از ۲۰	V خیلی ضعیف	به صورت گالری‌های چندگانه حفر شود که فاصله جبهه کار آنها ۵/۵ تا ۱/۵ متر باشد. همراه با حفاری، سیستم نگهداری نیز نصب شود. بلافاصله پس از آتشیاری عملیات بتن پاشی انجام گیرد	شبکه منظم پیچ سنگها به طول ۵ تا ۶ متر و به فاصله ۱ تا ۱/۵ متر در تاج و دیواره یا توری فلزی	ضخامت ۱۵۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر در تاج و ۱۵۰ میلی‌متر در دیواره‌ها و ضخامت ۵۰ میلی‌متر در جبهه کار	قابهای متوسط تا سنگین به فاصله ۷۵ سانتیمتر همراه با لارده‌های فلزی

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (4-4)$$

که در آن :

RQD = شاخص RQD سنگ

J_n = ضریب مربوط به تعداد درزه‌ها

J_r = ضریب مربوط به زبری درزه‌ها

J_a = ضریب مربوط به دگرسانی درزه‌ها

J_w = ضریب مربوط به کاهش آب درزه‌ها

SRF = ضریب مربوط به کاهش تنش

برای تعیین شاخص Q در مورد هر سنگ، ابتدا باید مقادیر عددی هر یک از ضرایب را از جدولهایی که در این زمینه وجود دارد به دست آورد و در رابطه 4-4 قرار داد تا شاخص Q سنگ به دست آید [۱۱].

برای اینکه بتوان از روی شاخص Q، سیستم نگهداری مناسب را برای تونل برگزید، بارتون و همکارانش پارامتر دیگری موسوم به بعد معادل (De) را به شرح زیر تعریف کردند :

$$De = \frac{\text{دهانه، ارتفاع و یا قطر تونل (برحسب متر)}}{\text{نسبت نگهداری تونل ESR}} \quad (4-5)$$

نسبت نگهداری تونل^۲ (ESR) به نحوه استفاده از تونل و نیز اینکه تا چه درجه‌ای از ناپایداری تونل قابل قبول است، بستگی دارد. اندازه ضریب ESR در وضعیت‌های مختلف در جدول 4-3 درج شده است.

با معلوم بودن شاخص Q و بعد معادل، با مراجعه به نمودارهایی که در این مورد تهیه شده است، می‌توان وضعیت نگهداری تونل را ارزیابی کرد. در شکل 4-4 نمودار اولیه بارتون و در شکل 4-5 نمودار اصلاح شده آن در سال ۱۹۹۳ میلادی نشان داده شده است.

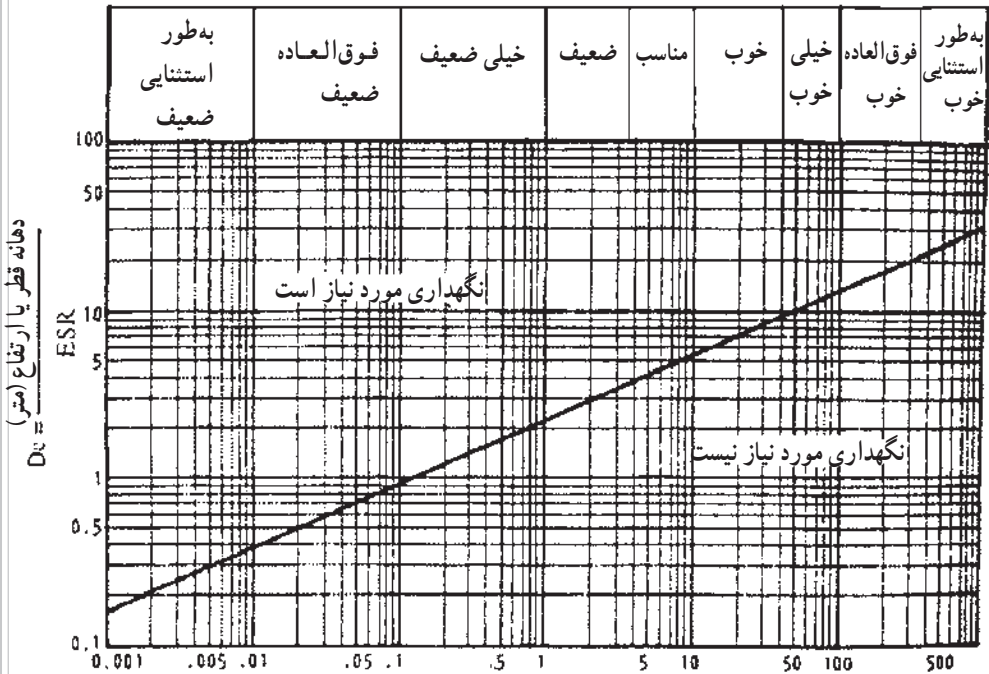
برای روشن شدن نحوه استفاده از شاخص Q در ارزیابی سیستم نگهداری به شرح مثالی در این زمینه می‌پردازیم. بدین منظور فرض می‌کنیم که شاخص RQD

۱- Equivalent dimension

۲- Excavation Support Ratio (ESR)

سنگها معادل ۹۰ درصد و بقیه مشخصه‌ها به شرح زیر باشد :

$$J_n = 4 \quad J_r = 3 \quad J_a = 1 \quad J_w = 1 \quad SRF = 15$$



$$Q = \frac{ROD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

شکل ۴-۴- رابطه بین حداکثر بعد معادل De یک تونل بدون نصب وسیله نگهداری و ضریب Q [۱۰]

با جایگذاری این مقادیر در رابطه ۴-۴ خواهیم داشت :

$$Q = \frac{90}{4} \times \frac{3}{1} \times \frac{1}{15} = 4.5$$

با مراجعه به جدول ۴-۳، ضریب ESR معادل ۱/۶ به دست می‌آید. بنابراین بعد

معادل خواهد شد :

$$De = \frac{15}{1/6} = 9/4$$

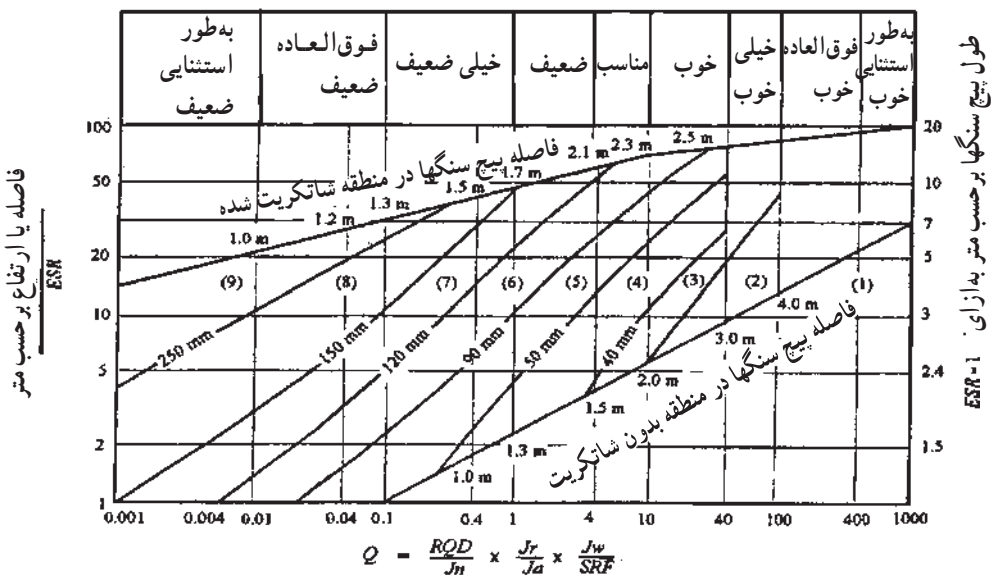
اکنون با مراجعه به شکل ۴-۵، با نقل مقادیر $De = 9/4$ و $Q = 4.5$ ، جایگاه

این سنگ در منطقه ۴ نمودار مشخص می‌شود که نگهداری آن مستلزم استفاده از پیچ

سنگ به فواصل ۲/۳ متر و ۴۰ تا ۵۰ سانتیمتر شاتکریت معمولی است.

جدول ۴-۳- اندازه عددی ضریب RMR در وضعیت‌های مختلف [۹ و ۱۰]

اندازه عددی ESR	حفریات زیرزمینی	رده
۵ تا ۳	تونلهای معدنی موقت	الف
۱/۶	تونلهای معدنی دائمی، تونلهای آبرسانی به نیروگاههای برق آبی (به استثنای تونلهای تحت فشار)، تونلهای پیشاهنگ، تونلهای دنباله رو، تونلهای پیشاهنگ حفریات بزرگ	ب
۱/۳	انبارهای زیرزمینی، تصفیه خانه‌های زیرزمینی، تونلهای فرعی راه و یا راه آهن، تونلهای دسترسی	ج
۱	نیروگاههای برقی زیرزمینی، تونلهای اصلی راه و یا راه آهن، پناهگاههای عمومی زیرزمینی، ورودی تقاطع‌های زیرزمینی	د
۰/۸	نیروگاههای هسته‌ای زیرزمینی، ایستگاههای راه آهن، مراکز عمومی و ورزشی زیرزمینی، کارخانجات زیرزمینی	هـ



شکل ۴-۵- برآورد رده نگهداری تونلها براساس شاخص Q و حداکثر بعد معادل [۹]

- ۱- بدون سیستم نگهداری
- ۲- پیچ سنگ نقطه‌ای
- ۳- پیچ سنگ منظم
- ۴- پیچ سنگ منظم همراه با ۴۰ تا ۱۰۰ میلیمتر شاتکریت غیر مسلح
- ۵- پیچ سنگ همراه با شاتکریت مسلح به ضخامت ۵۰ تا ۹۰ میلیمتر
- ۶- پیچ سنگ همراه با شاتکریت مسلح به ضخامت ۹۰ تا ۱۲۰ میلیمتر
- ۷- پیچ سنگ همراه با شاتکریت مسلح به ضخامت ۱۲۰ تا ۱۵۰ میلیمتر
- ۸- شاتکریت مسلح به ضخامت بیش از ۱۵۰ میلیمتر همراه با پیچ سنگ
- ۹- دیوارسازی بتنی