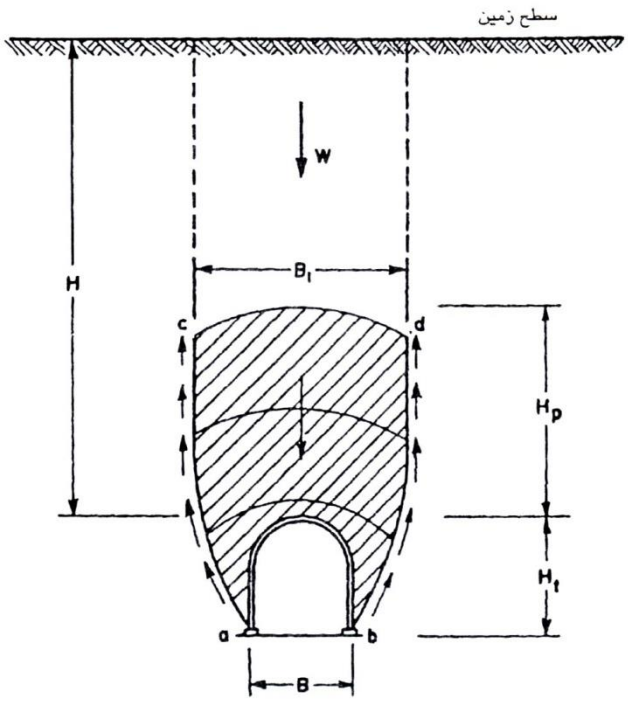
طراحی شاتکریت

3-1- مقدمه

روشهای طراحی براساس تجربیات عملی بر روی پروژه های مشابه با پروژه مورد نظر، بنا شده است.روشهای طبقه بندی توده سنگ، ستون فقرات نگرش روشهای طراحی را تشکیل می دهد وبه طور وسیع درمطالعات مهندسی سنگ به کارمی رود. در بسیاری از پروژه ها طبقه بندی سنگها به عنوان تنها مبنای طراحی سازه های زیرزمینی تلقی می شود.دراکثر پروژه های تونلسازی ،از سیستم های طبقه بندی استفاده می کنند.مشهورترین و متداول ترین روش مورد استفاده،طبقه بندی ترزاقی براساس بارسنگ که است درسال 1946 میلادی توسط وی ارائه شد. از آن زمان به بعد این طبقه بندی توسط دیر و همکارانش (1970 میلادی) اصلاح و سیستم های طبقه بندی جدید سنگ پیشنهاد شد.این سیستمها،رهنمودهای نوینی را درتکنولوژی های نگهداری مثل پیچ سنگ و شاتکریت،در پروژه های مختلف مهندسی مانند تونلها ، فضاهای بزرگ زیرزمینی ، معادن، شیب های سنگی و نظایر آنها ارائه کرده است.امروزه طبقه بندی های مختلف توده سنگ به طورموفقیت آمیزی در سراسر جهان به کار می رود. ازجمله آنها روشهای طبقه بندی ترزاقی،RSR،RMR وQ می باشد .

3-2-تعیین سیستم نگهداری براساس رده بندی بارسنگ ترزاقی

درسال1946 میلادی ترزاقی اولین روش منطقی ارزیابی بارسنگ را به منظورطراحی سیستم نگهداری تونل با استفاده از قابهای فولادی ، ارائه کرد.این امر پیشرفت بسیار مهمی بود زیرا سیستم نگهداری با استفاده از قابهای فولادی در تونل سنگی طی مدت 50سال پیش از آن تاریخ،به طور وسیعی مورد استفاده قرار می گرفت.بایستی توجه داشت اگر چه این سیستم برای هدف اولیه خود یعنی تخمین بارهای موثر بر قابهای فولادی مناسب است اما در مورد روشهای جدید تونلسازی و از آن جمله استفاده از شاتکریت و پیچ سنگ ، مناسب نیست. درسال 1970 میلادی ، سسیل(Cecil) پس از بررسیهای بسیار به این نتیجه رسید که طبقه بندی ترزاقی برای دستیابی به یک ارزیابی واقعی از کیفیت سنگ بسیار کلی است و اطلاعات کمّی در مورد خصوصیات توده سنگ به دست نمی دهد. به همین خاطر برای شاتکریت مناسب نیست.



شکل3-1- سیمای ساده ای بارسنگ تونل براساس رده بندی ترزاقی

3-3- تعیین سیستم نگهداری براساس رده بندی ساختار سنگ RSR(Rock Structure Rating)

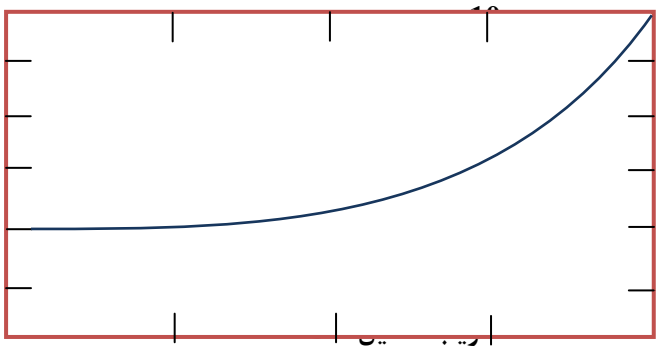
این رده بندی برای طراحی و انتخاب سیستم نگهداری فولادی در تونلهای سنگی مناسب است. از سوی دیگر،برای انجام این رده بندی بایستی سه مشخصه جمع آوری مقدماتی داده ها ، مطالعات امکان سنجی و بررسی تفصیلی ، ویژگیهای ساختگاهی سنگها را تعیین کرد. مراحل کار در این سیستم ، به شرح زیر است:

الف- مسیر تونل به چند بخش که از نظر وضعیت زمین شناختی مشابه اند و سیستم نگهداری آنها کمابیش یکسان است،تقسیم می شود. بدیهی است مادام که ضرورت تغییر سیستم نگهداری پیش نیاید، که این امر مستلزم تغییر وضعیت ژئوتکنیکی بخشهای مختلف است، باید از یک سیستم نگهداری استفاده کرد.

ب- در مورد هر یک از بخشها، داده های لازم برای رده بندی توده سنگ جمع آوری می شود.

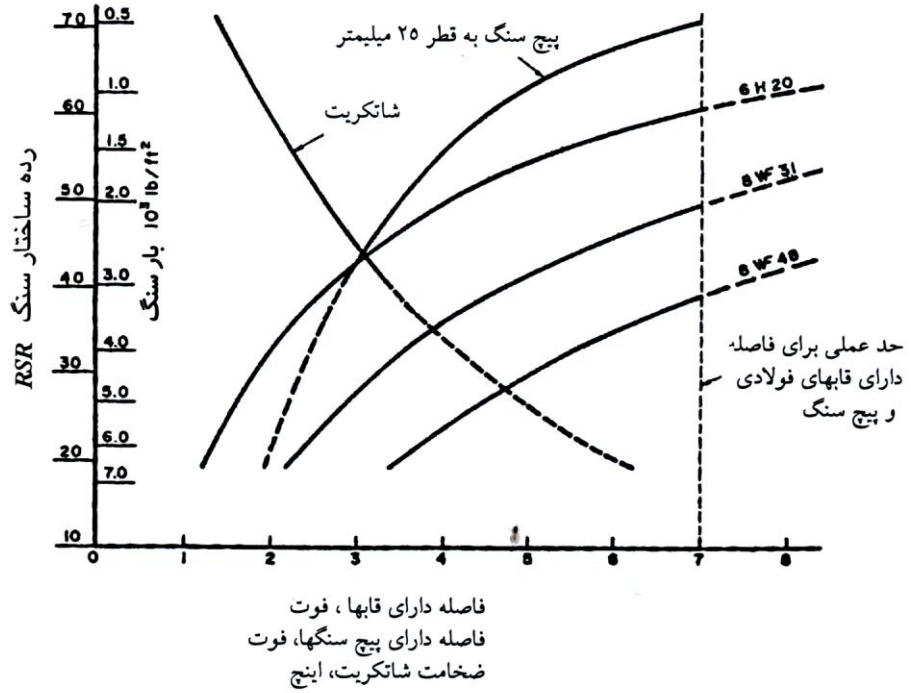
ج- با جمع آوری داده ها، مشخصه های فوق هر بخش و از مجموع آنها شاخص RSR هر بخش محاسبه می شود.

د- در صورتی که تونل با ماشین حفر شود، با استفاده ازشکل زیر تعدیلRSR بدست می آید.



شکل 3-2- تعیین ضریب تعدیل با استفاده ازقطرتونل

ه- با استفاده از نمودار فوق و شکل زیر،سیستم نگهداری مناسب برای هر بخش از تونل انتخاب می شود.



چنین نمودارهایی برای تونلهای دایره ای و نعل اسبی قابل استفاده اند.

3-4- تعیین سیستم نگهداری براساس رده بندی ژئومکانیکی RMR

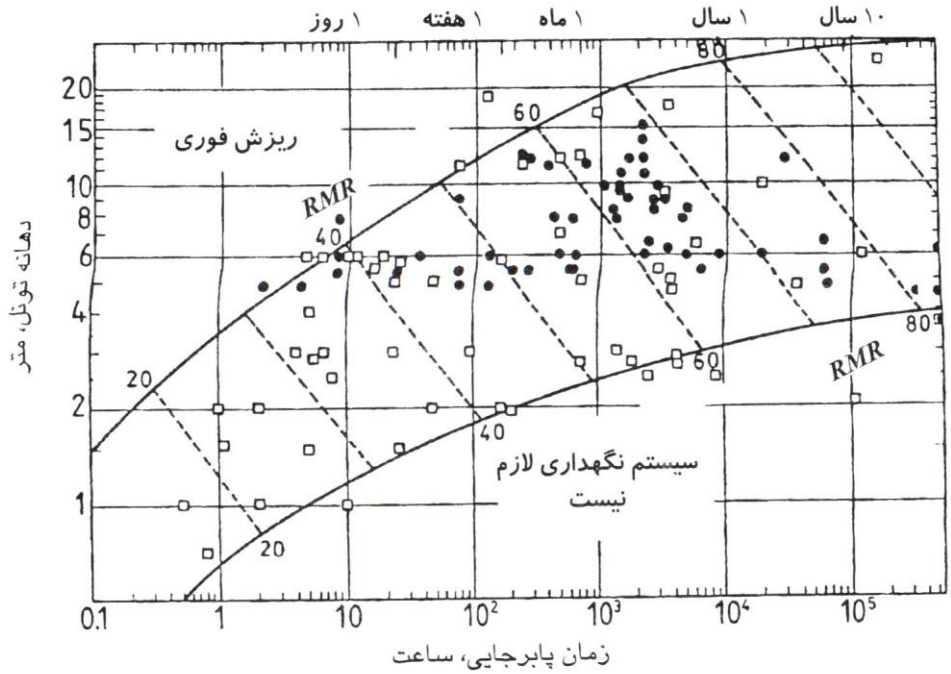
با استفاده از رده بندی ژئومکانیکی که توسط بینیاوسکی (1973) عرضه شد،می توان با معلوم بـودن RMR و دهانـه تونل ، زمان پابرجایی،ملزومات سیستم نگهداری ، مدول تغییر شکل توده سنگ برجا و چسبندگی و اصطکاک یک توده سنگ را تعیین کرد که مراتب به شرح زیر است:

الف – مسیر تونل را به گونه ای به بخشهای مختلف تقسیم می کنند که هر بخش از لحاظ وضعیت زمین شناختی کمابیش یکنواخت و سیستم نگهداری لازم برای آنها نیز یکسان باشد.

ب- در مورد هر بخش ، اطلاعات لازم برای رده بندی RMR جمع آوری می شود.

ج- با توجه به روابط و جداول که شرح آنها در زیر آمده است،شاخص RMR هر بخش تعیین می شود.

د- با استفاده ازشکل3-3،زمان پابرجایی تونلها محاسبه می شود.



شکل3-3- رابطه بین شاخص RMRو زمان پابرجایی تونلها. در این شکل • نشانگر نتایج حاصل از ریزش سقف معادن،علامت □نمایانگر ریزش سقف تونلها و منحنی های تراز نشانگرمحدوده کاربرد است.

ه- برای مقایسه،فشار سیستم نگهداری از رابطه زیر که درسال1983توسط اونال(Unal)ارائه شد،محاسبه می شود.

$$P=\gamma B\left(\frac{100-RMR}{100}\right)=\gamma h \qquad 1\text{-}3$$

$$h=B\left(\frac{100-RMR}{100}\right) \qquad 2\text{-}3$$

که درآن:

P= فشار موثر برسیستم نگهداری بر حسبKN

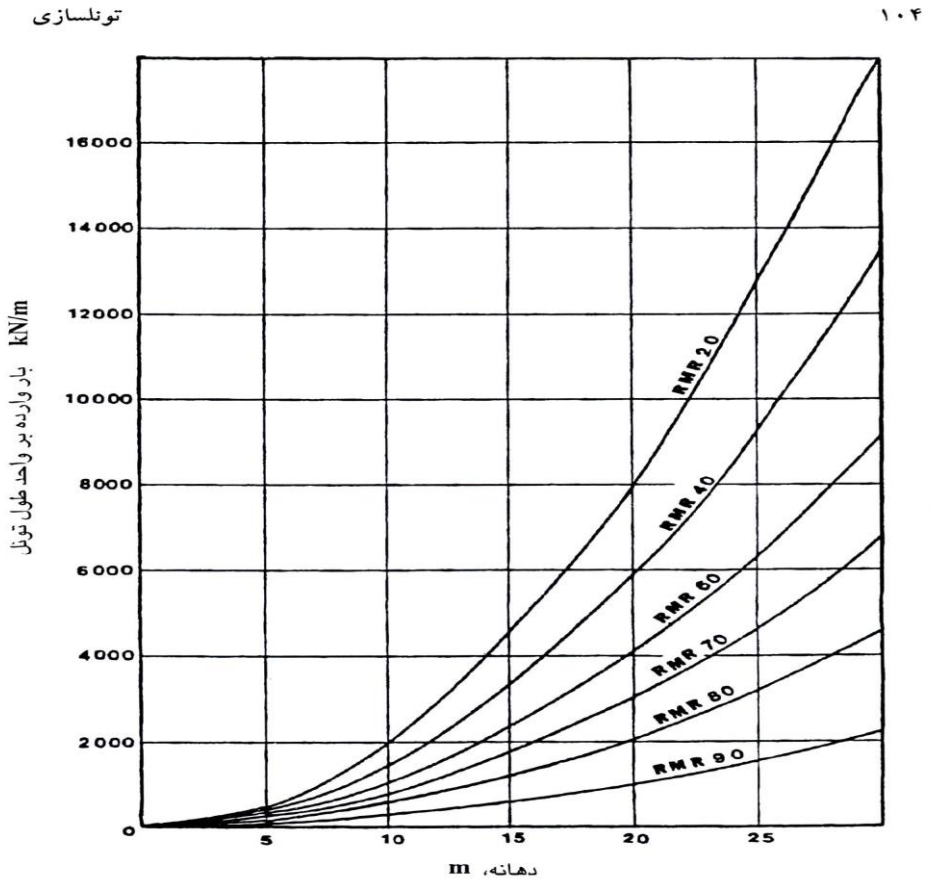
h= ارتفاع بارسنگ برحسب متر

B=عرض تونل برحسب متر

γ=وزن مخصوص سنگ بر حسبkg/m3

و- درمورد بخشهای از تونل که توجه ویژه ضرورت دارد ، برنامه رفتارسنجی ارائه می شود.

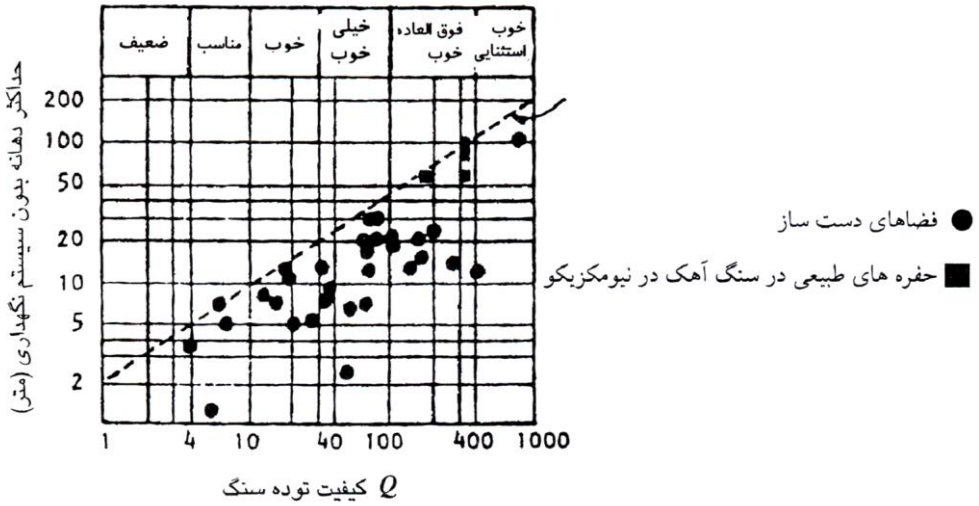
درشکل زیرتغییرات بارسنگ درمورد سنگهای مختلف وبه عنوان تابعی ازدهانه سقف تونل براساس رابطه3-1 و شکل3-4 نشان داده شده است.



شکل3-4- تغییرات بارسنگ به عنوان تابعی از دهانه سقف در سنگهای مختلف در رده بندی RMR

3-5- تعیین سیستم نگهداری براساس رده بندی Q

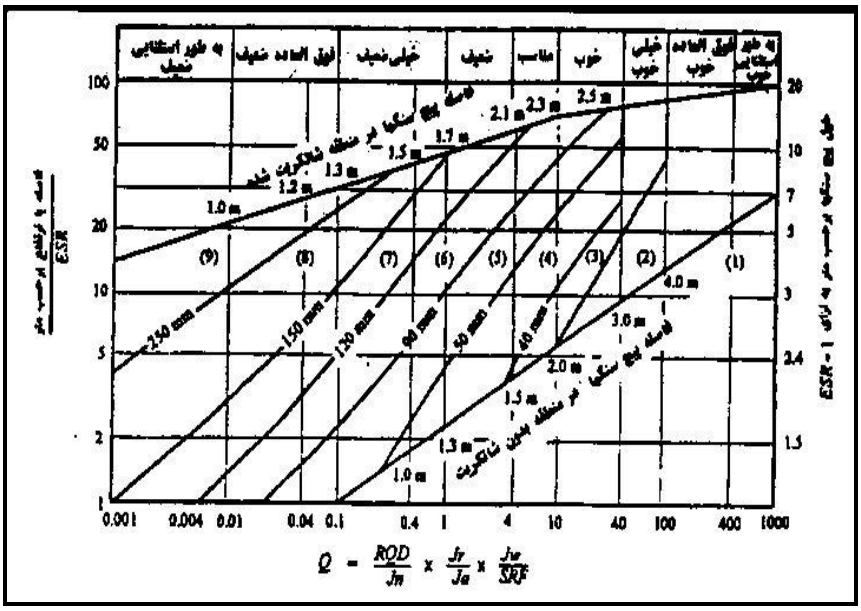
رابطه بین شاخص Q و بعد معادل یک تونل،سیستم نگهداری مناسب را به دست می دهد.بارتن مجموعه ای از30مورد ازحفریات بدون سیستم نگهداری را که در توده سنگهای مختلف احداث شده اند،جمع آوری و تدوین کرده که دهانه این حفریات برحسب شاخص Q در شکل5 نشان داده شده است.



شکل3-5- حفریات اجراء شده در توده سنگهای با شاخص Q مختلف بدون نصب سیستم نگهداری

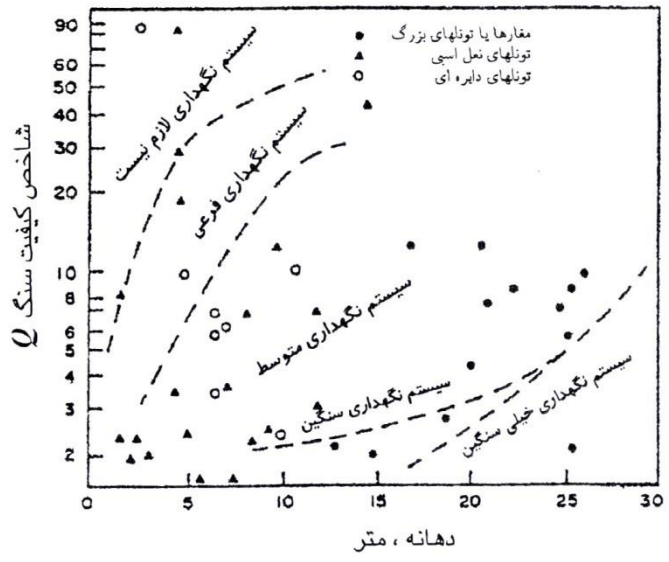
درسال 1993 میلادی،بارتن و گریمستد(Girmstad) استفاده از الیاف فولادی برای تقویت شاتکریت مورد استفاده در نگهداری حفریات زیرزمینی را مورد مطالعه قراردادند و با تلفیق نمودار انتخاب سیستم نگهداری براساس Q که در شکل3-5 توسط بارتن ارائه شد،و مطالعات جدید، نمودارهای جدیدی را ارائه کردند که در شکل های3-6و3-7 آمده است.مطابق شکل،بسته به ابعاد تونل و اندازه Q،نمودار به 9 ناحیه تقسیم می شود که سیستم نگهداری مناسب برای هرناحیه،درزیرشکل درج شده است.

به عنوان مثال به ازای De=9.4 و Q=4.5،ناحیه4 برای نگهداری فضای زیرزمینی پیشنهاد می شودکه براساس آن،پیچ سنگ با آرایش2.3m و شاتکریت بدون تقویت به ضخامت 40 تا50 میلی متر پیشنهاد شده است.



شکل3-6- نواحی مختلف تخمین سیستم نگهداری براساس شاخص Q

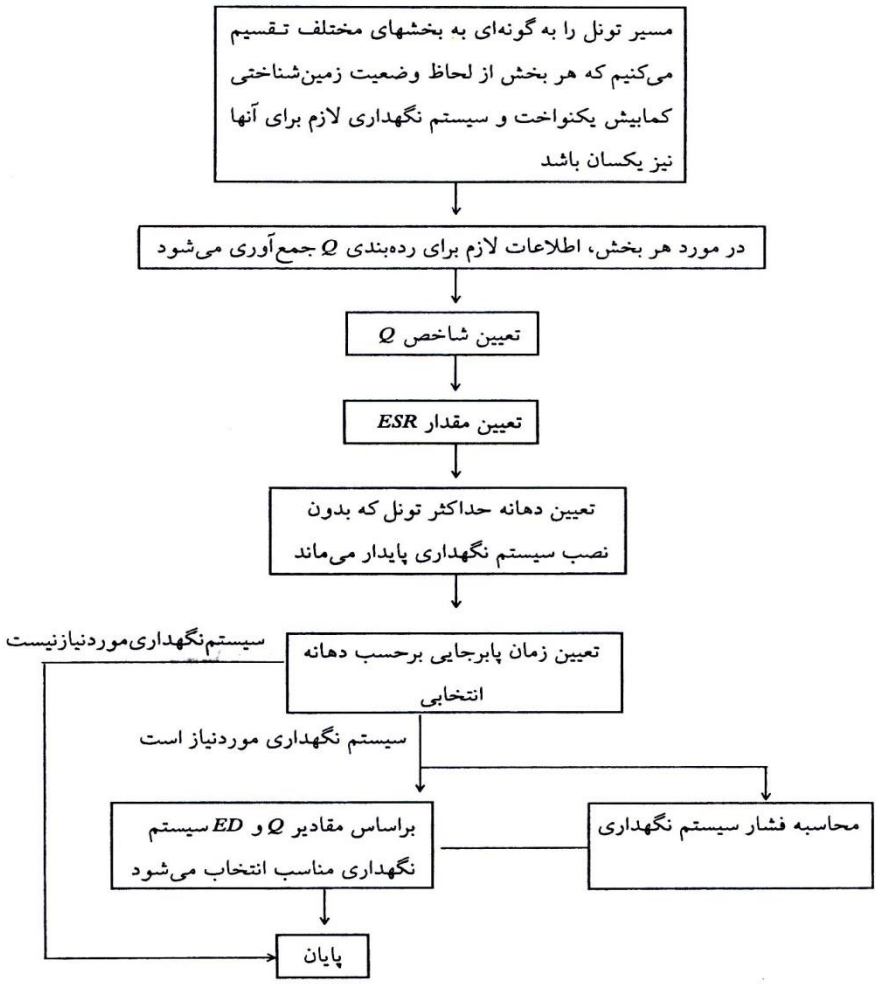
1- بدون سیستم نگهداری
2- پیچ سنگ نقطه ای
3- پیچ سنگ منظم
4- پیچ سنگ منظم همراه با 40تا100 میلیمتر شاتکریت غیرمسلح
5-پیچ سنگ همراه با شاتکریت مسلح به ضخامت50-90mm
6- پیچ سنگ همراه با شاتکریت مسلح به ضخامت90-120mm
7- پیچ سنگ همراه با شاتکریت مسلح به ضخامت120-150mm
8 - شاتکریت مسلح به ضخامت بیش از150mm همراه با پیچ سنگ
9- دیوارسازی بتنی



شکل3-7- انتخاب سیستم نگهداری مناسب برای تونلها براساس شاخص Q

مراحل طراحی انتخاب سیستم نگهداری براساس رده بندی Q، در جدول 3-1 نشان داده شده است.

جدول3-1- مراحل انتخاب سیستم نگهداری تونلها براساس شاخص Q



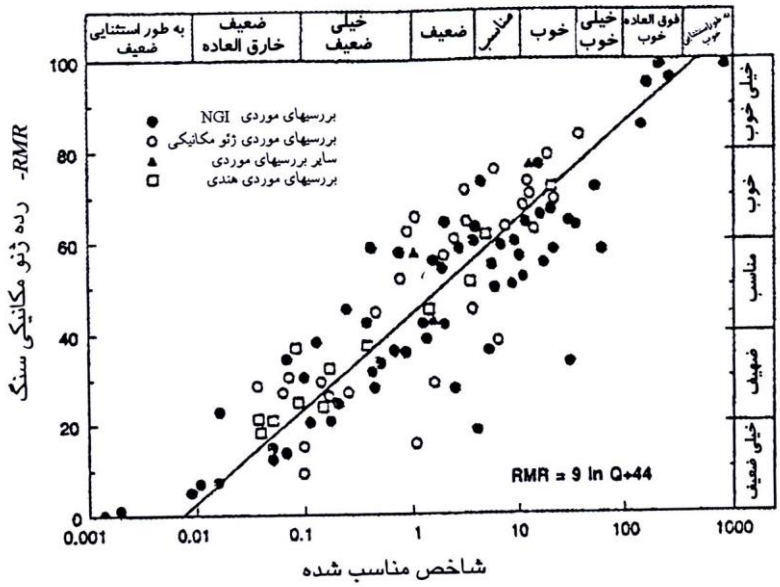
3-6- ارتباط بین رده بندی های مختلف

برای تبدیل شاخص های مختلف رده بندی به یکدیگر، تلاشهایی انجام گرفته و براساس آنها یک رابطه تجربی بین مقادیر QوRMR ارائه شده است. از کل 117 بررسی موردی که مطالعه شده،68مورد در اسکاندیناوی،28 مورد مورد در آفریقای جنوبی و 21 مورد دیگر در ایالات متحده، کانادا ،استرالیا و اروپا بوده است. رابطه بین QوRMR در مورد تونلهای راه توسط بینیاوسکی در سال 1976 به شرح ذیل است.

$$RMR = 9\ln Q + 44 \qquad 3\text{-}3$$

درمورد تونلهای معدنی،آباد و همکارانش (1983)، 187 راهروی معادن زغال سنگ را در اسپانیا مورد تحلیل قرار دادند و به نتیجه زیر رسیدند:

$$RMR = 10.5\ln Q + 42 \qquad 4\text{-}3$$



شکل3-8- ارتباط بین RMR وQ براساس تجربیات بینیاوسکی

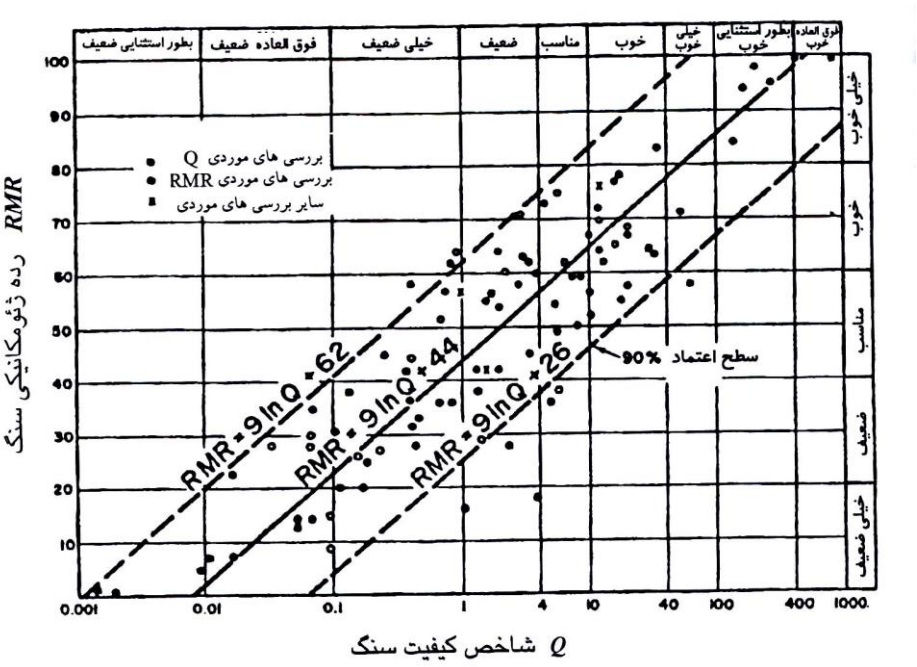
روتلج(Rutledge) در سال 1978،نتایج زیر را در مورد تبدیل سیستم های مختلف رده بندی ارائه کرد:

$$RMR = 13.5\ln Q+43 \qquad 5\text{-}3$$

$$RMR = 0.77\ln Q+12.4 \qquad 6\text{-}3$$

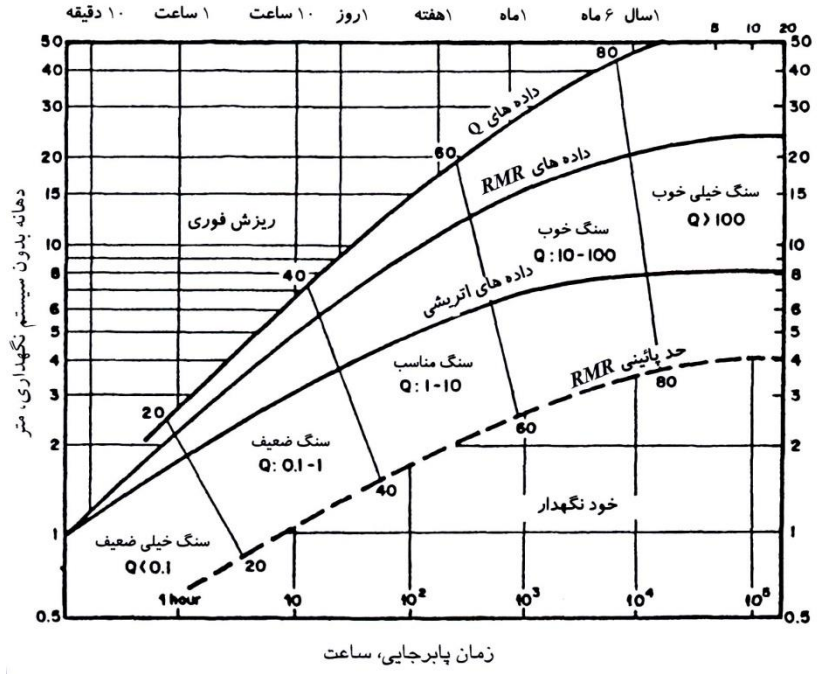
$$RMR = 13.3\ln Q+46.5 \qquad 7\text{-}3$$

رابطه ترسیمی بین**RMR وQ** براساس نتایج آماری در شکل 3-9 نشان داده شده است.



شکل3-9- رابطه RMR وQ

ازنقطه نظر زمان پابرجایی نیز سیستمهای مختلف رده بندی مقایسه شده اند که نتایج درشکل 3-10آمـده اسـت. بـه طوری که از شکل پیداست، رده بندی ژئومکانیکی(RMR) نسبت به Q محافظه کارانه است.



شکل3-10-مقایسه زمانهای پابرجایی پیش بینی شده برای دهانه های تونل فاقد سیستم نگهداری براساس سیستمهای رده بندی RMR و Q در اطریش

3-7-بررسی سه نمونه در مورد طرح سیستم نگهداری تونلها با شاتکریت

نمونه اول- تونل مورد بررسی ، یک تونل انتقال آب در یکی از شهرهای ایالات متحده امریکا است که هدف ازاحداث آن،انتقال آب سرریزی ازیک رودخانه است. قطرتونل 6.7متر و طول آن 2800متراست. زمین مورد نظرسنگی بوده و مرکب از شیل و بازالت با حداکثرارتفاع روباره 61مترمی باشد.

برای بررسی وضعیت مسیرتونل،29گمانه حفرشد و بر روی نمونه های حاصل ازاین گمانه ها،آزمایشهای مکانیک سنگ وژئوتکنیک انجام گرفت که نتایج درجدول3-2 ارائه شده است.

جدول3-2- ویژگیهای مکانیکی توده سنگ در تونل مورد بررسی

نوع سنگ	مقاومت فشاری تک محوری Mpa			مدول الاستیسیته Gpa		
	حداقل	حداکثر	میانگین	حداقل	حداکثر	میانگین
شیل	22.4	90.3	53.5	۱.۳۸	34.5	14.5
بازالت	38.2	94.8	70.8	6.14	68.9	31.9
ماسه سنگ	64.5	65.8	65.1	-	-	-

مطالعاتی که درمورد تنشهای برجا انجام گرفت،تنش افقی را معادل 3.1 ±0.9Mpa و تنش قائم برای عمق 36.6متری را برابر0.91 Mpa به دست داد وبنابراین نسبت تنشهای افقی به قائم آمد:

$$\frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \frac{3.1}{0.9} = 3.4$$

پس از بررسی نتایج آزمایشات برای حفر تونل،سه روش زیر پیشنهاد شد:

الف – چالزنی و آتشباری با پوشش بتنی درجا

ب – حفاری مکانیزه با پوشش بتنی درجای تقویت شده

ج – حفاری مکانیزه با پوشش بتنی پیش ساخته

براساس این اطلاعات ، بارسنگ و سیستم نگهداری پیشنهادی براساس سیستم های مختلف رده بندی پیش بینی شد که نتایج سیستم ترزاقی در جدول 3-3 و مقایسه روشهای مختلف در جدول3-4 آمده است.

جدول3-3- محاسبه بارسنگ و طراحی سیستم نگهداری تونل براساس روش ترزاقی

وضعیت سنگ	طول ناحیه متر	سیستم چالزنی و آتشباری: به قطر ۸ متر قطر تمام شده ۶.۷ متر		حفاری مکانیزه به قطر ۷.۳ متر قطر تمام شده ۶.۷ متر		
		بارسنگ t/m^2	سیستم‌نگهداری موقت	بارسنگ t/m^2	سیستم‌نگهداری موقت	سیستم‌نگهداری دائمی
بهترین کیفیت متوسط: توده‌ای نسبتاً درزه‌دار $RQD > ۸۰$	۲۴۰۰	۱۱/۸	پیچ‌سنگ به‌طول ۳/۳ متر و فاصله ۱/۴ متر	۵/۴	پیچ‌سنگ‌موضعی به‌طول ۳ متر و فاصله ۱/۸ متر، در موارد لزوم شاتکریت به ضخامت ۵۰میلیمتر	بتن مسلح پیش‌ساخته به ضخامت ۳۳۰ میلیمتر
بدترین‌کیفیت متوسط: خیلی رگه‌ای و بلوکی $RQD=۴۰$	۲۴۰	۲۳/۷	پیچ‌سنگ‌به‌طول ۳/۳ متروفاصله ۰/۶متروشاتکریت به‌ضخامت۲۵ میلیمتر	۱۵	پیچ‌سنگ‌به‌طول ۳ متر وبه‌فاصله ۰/۹ تا ۱/۵ متر، در موارد لزوم شاتکریت‌به‌ضخامت ۵۰ میلیمتر	مثل بالا
زون گسلی: به‌کلی خردشده $RQD=۳۰$	۹۰	۵۱/۶	تیرآهن‌نمره ۸ به فاصله ۰/۶ تا ۱/۲ متر، شاتکریت به ضخامت ۷۵ میلیمتر	۳۷/۶	پیچ‌سنگ‌به‌طول ۳۳متروبه‌فاصله ۰/۹ متر، شاتکریت به ضخامت ۷۵ میلیمتر	مثل بالا

جدول3-4- مقایسه سیستمهای نگهداری پیشنهادی تونل به روشهای مختلف

وضعیت سنگ	سیستم نگهداری پیشنهادی			
	روش ترزاقی	روش RSR	روش RMR	روش Q
بهترین‌وضعیت متوسط:	بارسنگ $۱۱/۸\ t/m^2$ بتن‌مسلح به ضخامت ۳۵۵ میلیمتر به اضافه ۲۰۰ میلیمتر اضافی در مناطق پیش‌شکستگی سیستم‌نگهداری موقت: پیچ‌سنگ به طول ۳/۳ متروفاصله ۱/۳ متر، شاتکریت‌به ضخامت ۲۵ میلیمتر	$RSR = ۷۶$ سیستم‌نگهدای دائم: N/A سیستم‌نگهداری‌موقت: لازم نیست	$RMR = ۷۲$ پیچ‌سنگ موضعی در سقف‌به‌طول ۳ متر و فاصله ۲/۴متر همراه با توری فلزی و شاتکریت به ضخامت ۵۰ میلیمتر	$Q = ۲۰$ بارسنگ: $۱۱ t/m^2$ پیچ‌سنگ‌غیرکششی نقطه‌ای به طول ۲/۷ متر و فاصله ۱/۵ تا ۱/۸ متر
بدترین‌وضعیت متوسط: ایستگاههای ۲۳ تا ۳۱	بارسنگ $۲۳/۷\ t/m^2$ بتن‌مسلح به ضخامت ۳۸۰ میلیمتر به اضافه ۲۰۰ میلیمتر اضافی در مناطق پیش‌شکستگی سیستم‌نگهداری موقت: پیچ‌سنگ به طول ۳/۳ متروفاصله ۱/۳ متر، شاتکریت‌به ضخامت ۵۰ میلیمتر	$RSR = ۲۶$ سیستم‌نگهدای دائم: N/A سیستم‌نگهداری‌موقت: قابهای فولادی‌نمره ۸ به‌فاصله ۰/۶متر	$RMR = ۳۷$ پیچ‌سنگ منظم به طول ۳/۶ متر و فاصله ۱/۵ متر، همراه با توری‌فلزی وشاتکریت‌به‌ضخامت ۱۲۷ میلیمتر	$Q = ۲/۲$ بارسنگ: $۱۱/۸ t/m^2$ پیچ‌سنگ‌غیرکششی به طول ۲/۷ متر و فاصله ۰/۹ متر همراه با شاتکریت به ضخامت ۲۵ تا ۵۰ میلیمتر، سیستم نگهداری اولیه: پیچ‌سنگ‌نقطه‌ای
زون گسلی ناحیه ۳	بارسنگ $۵۱/۶\ t/m^2$ بتن‌مسلح به ضخامت ۵۶۰ میلیمتر به اضافه ۲۰۰ میلیمتر اضافی در مناطق پیش‌شکستگی سیستم‌نگهداری موقت:قابهای‌فولادی ساخته‌شده‌ازتیرآهن نمره ۸ به فاصله ۰/۶ تا ۱/۲ شاتکریت به ضخامت ۷۵ میلیمتر	$RSR = ۲۳$ سیستم‌نگهدای دائم: N/A سیستم‌نگهداری‌موقت: قابهای فولادی‌نمره ۸ به‌فاصله ۰/۶متر	$RMR = ۱۶$ قابهای فولادی به فاصله ۰/۷۵ متر، پیچ‌سنگ به طول ۴/۵ متر همراه با توری‌فلزی‌وشاتکریت به ضخامت ۲۰۰ میلیمتر	$Q = ۰/۱۴$ بارسنگ: $۲۹ t/m^2$ بتن‌مسلح به‌ضخامت ۲۰۰ تا ۴۰۰ میلیمتر همراه با پیچ‌سنگهای کششی به طول ۲/۷ متر و فاصله ۰/۹ متر سیستم‌نگهداری‌اولیه شاتکریت به ضخامت ۱۵۰ تا ۲۵۰ میلیمتر همراه با توری فلزی

مقایسه جدول های 3-3و3-4 نشانگر آن است که روش ترزاقی کلی ترین سیستم نگهداری را که در مقایسه با سیستمهای دیگر رده بندی بیش ازحد معمول به نظرمی رسد،توصیه می کند.این امر را می توان ناشی از سه عامل زیر دانست:

الف- طراحی سیستم نگهداری دائمی را نمی توان برای سیستم نگهداری موقت درنظرگرفت.

ب- اصلاحات روش ترزاقی که توسط دیرو همکارانش انجام گرفته براساس تکنولوژی 1969 بنا شده که اکنون از رده خارج شده است.

ج- در روش ترزاقی،از توانایی سنگ برای نگهداری خودش استفاده درستی نمی شود.روش ترزاقی از توصیفات کیفی توده سنگ(همچون بلوکی و لایه ای) بهره می برد و از تمامی اطلاعات کمی حاصل از اکتشافات کارگاهی استفاده نمی کند.

برای ارزیابی سیستم نگهداری طراحی شده واستفاده از آن درطراحی ورفتارسنجی،سیستم ابزاربندی تونل طراحی شد.بدین منظور، ده بخش آزمایشی درقسمتهایی ازتونل که وضعیت های زمین شناختی متفاوتی داشتند، مورد انتخاب قرارگرفت.دراین بخشهای آزمایشی،تجهیزاتی همچون کشیدگی سنج های سطحی ،همگرایی سنج و تنجش سنجهای سطحی، نصب شد.علاوه براین اندازه گیریها، تنش درجا هم مورد ارزیابی قرارگرفت. قطعات بتنی پیش ساخته که برای بدترین شرایط زمین(15درصد از طول تونل)طراحی شده بود،درسراسر تونل مورد استفاده قرارگرفت که در نتیجه،سیستم نگهداری برای بخشهای اصلی تونل،قوی تراز سیستم مورد نیاز بود. هدف از اجرای برنامه ابزاربندی درتونل،اعتبار بخشیدن به فرضیات طراحی و مرتب کردن محاسبات برای طراحی های بعدی بود.

حدود 72 متر از اول تونل با روش آتشباری حفر و به کمک آن محفظه U شکل مونتاژ دستگاه حفاری با مقطع تقریبی 7.9*7.9 متر آماده شد. نگهداری سقف تونل در بخشی که به روش آتشباری حفر شد،به وسیله پیچ سنگهای تمام تزریقی 3متری به فواصل تقریبی 1.2 تا1.5 متر همراه با شاتکریت ، تامین شد.

بعد از خاتمه عملیات چالزنی و آتشباری ، ماشین حفر مکانیزه تمام مقطع(TBM)در محفظه حفاری شده مونتاژ شد و پیشروی تونل به کمک ماشین TBM ادامه یافت. TBM مورد استفاده در تونل،ساخت شرکت رابینز و قطر تاج حفار آن 7.4متر بود. نگهداری موقت و پوشش نهایی به وسیله حلقه های بتنی پیش ساخته 4قسمتی انجام گرفت.ضخامت این قطعات بتنی 22.9سانتیمتر و پهنای آنها1.8متربود.در اثر نصب یک حلقه کامل،قطرداخلی تمام شده تونل 6.7متر می شد.اکنون به شرح جزئیات طراحی سیستم نگهداری بخشی از تونل می پردازیم:

3-7-1-رده بندی توده سنگ

باتوجه به مشخصات فیزیکی و مکانیکی، توده سنگ درسیستم های مختلف تقسیم بندی شد که نتیجه درجدول 3-5آمده است.

جدول3-5- رده بندی توده سنگ مسیر تونل

سیستم رده بندی	مقدارعددی	نتیجه
ترزاقی	-	نسبتا" بلوکی و لایه ای
RSR	61	-
RMR	51	توده سنگ نسبتا" خوب
Q	9	توده سنگ نسبتا" خوب

3-7-2-محاسبه بارسنگ

این مورد درسیستم های مختلف محاسبه شد که نتیجه درجدول3-6نشان داده شده است.قطرحفاری درسیستم آتشباری 0.6+7.4 متر و درسیستم حفاری مکانیزه 7.4متربود.جرم مخصوص شیل نیز،2660kg/m3درنظرگرفته شده است.

جدول3-6- محاسبه بارسنگ درسیستمهای مختلف

روش	آتشباری	TBM
ترزاقی	$h_p = 0/35C = 0/7B = 0/7 \times 8/0 = 5/6\ m$ بارسنگ $P=\gamma h_p=0/146MPa=0/9t/ft^2$	$h_p = 0/45B = 3/3m$ $P=0/09Mpa=1/52t/ft^2$
$RSR = 61$	$P=0/067MPa=0/7kip/ft^2$	$RSR=69/5$ $P=0/034MPa=0/7kip/ft^2$
$RMR = 51$	$h_p = \frac{100-51}{100} B = 3/92\ m$ $P = \gamma h_t = 0/102MPa$	$RMR = 74$ $P = 0/049\ Mpa$
$Q = 9$	$P = \frac{2}{J_r} Q^{-\frac{1}{3}} = \frac{2}{1/5} (9)^{-\frac{1}{3}} = 0/64kg/cm^2$ $= 0/0628MPa$ یا $P = \frac{2J^{\frac{1}{2}}}{3J_r} n\, Q^{-\frac{1}{3}} = \frac{2\sqrt{6}}{31/5} (9)^{-\frac{1}{3}}$ $= 0/52\ kg/cm^2 = 0/0513\ MPa$	$Q = 54$ $P = 0/0321\ MPa$

3-7-3-تعیین زمان پابرجایی و حداکثر دهانه خود نگهدارتونل

حاصل بررسی های این مورد،در جدول3-7 درج شده است.

جدول3-7- حداکثر دهانه خود پایدار تونل در سیستمهای مختلف

دهانه	روش RMR=51	روش Q=9(ERS=1.6)
دهانه خودنگهدار(باتوجه به شکل3و5)	2.4m	8m
حداکثردهانه(باتوجه به شکل3و5 که	10.5m	8m
زمان پابرجایی	100ساعت	

3-7-4-سیستم نگهداری پیشنهادی

سیستم نگهداری پیشنهادی برای تونل براساس سیستمهای مختلف درجدول3-8 آمده است.

جدول3-8- سیستم نگهداری پیشنهادی برای تونل براساس سیستم های مختلف

روش	سیستم نگهداری
ترزاقی	**چالزنی و آتشباری- قابهای فولادی سبک تا متوسط به فاصله1.5متر- آستری بتنی**
RSR	**چالزنی وآتشباری- قابهای 6H25 به فاصله 2متربه اضافه پوشش نهایی**
RMR	**چالزنی وآتشباری- سیستم منظم پیچ سنگ به طول 3.5متر و فاصله1.5متر،به اضافه 50تا100میلی متر شاتکریت درسقف و30میلی متردردیوارها**
Q	**چالزنی وآتشباری – پیچ سنگ به طول 3متر و فاصله1.5مترو شاتکریت به ضخامت 50میلیمتر**

نمونه دوم- تونلی به قطر 6متر در توده سنگ کوارتزیتی نسبتاً هوازده حفر می شود. پارامترهای طبقه بندی به شرح زیر تعیین شده است.

مشخصه	مقدار	امتیاز در سیستم RMR
1-مقاومت ماده سنگ	**125Mpa**	**12**
1- RQD	**٪90 - ٪80**	**17**
2- فاصله ناپیوستگی	**0.3-1 m**	**12**
3- وضعیت نا پیوستگی ها: درزه ها پیوسته–سطوح کمی زبرجدایش یک میلیمتر،دیواره سنگ به شدت هوازده بدون آکننده		**20**
4- آب زیرزمینی	**جریان متوسط(سنگ مرطوب)**	**7**
RMRپایه ای توده سنگ		**68**
5- تعیین جهات درزه	**خوب**	**-5**
RMR نهایی توده سنگ		**63**

با توجه به طبقه بندی توده سنگ در سیستم RQD که بین 75تا90 خوب محسوب می شود.بنابراین توده سنگ در رده سنگ خوب قرارداد .

پس از مشخص شدن شاخصRMR سنگ، با مراجعه به شکلهای 3-3 و3-4 می توان سیستم نگهداری مناسب را برگزید.

الف- مطابق شکل3-3 زمان پابرجایی برای RMR=63 و دهانه 6متری ، در حدود6ماه به دست می آید.موقع استفاده از نمودار شکل 3-3 باید به نکات زیر توجه کرد:

- در اثر تقاطع خط نظیرRMR معین با دهانه تونل مورد نظر،مدت زمان پابرجایی به دست می آید.

- در اثر تقاطع خط نظیر RMR معین با مرز بالایی خط در یک توده سنگ معلوم،حداکثر دهانه ممکن حاصل می شود. حفر هر دهانه بزرگتر از آن،ریزش آنی سقف را درپی دارد.

-در اثر تقاطع خط نظیرRMR معین با مرزپائینی ، حداکثر دهانه ای که بدون نصب سیستم نگهداری به صورت دایمی پابرجا است،به دست می آید.

ب – براساس جدول3-9،سیستم نگهداری درتاج تونل،پیچ سنگهایی به طول3متروفاصله داری2.5متربا شاتکریت به ضخامت50میلیمترهمراه با توری سیمی توصیه می شود(پیچ سنگها ازنوع تمام تزریقی وقطر 20میلیمتر).

جدول3-9- دستورالعمل انتخاب سیستم نگهداری برای تونلهایی با دهانه فعال10متر براساس شاخصRMR

شاخص RMR	نوع سنگ	سیستم حفاری	پیچ سنگ به قطر20میلیمتر و محکم شده به وسیله دوغاب سیمان	بتن پاش(شاتکریت)	قاب های فولادی
81تا100	I خیلی خوب	ماشین های تمام مقطع با 3متر پیشروی درهر نوبت	در حالت کلی نیازی به نصب سیستم نگهداری نیست و در بعضی موارد پیچ سنگ های منفرد		
61 تا 81	II خوب	ماشین های تمام مقطع با پیشروی1تا1.5متردرهرنوبت به فاصله 20متری ازجبهه کارسیستم نگهداری دائم نصب شود	به طور موضعی در قسمت تاج تونل پیچ سنگ هایی به طول 3متر و به فاصله 2.5متر و گاه نیز همراه با توری فلزی نصب شود	در موارد لزوم ضخامت 50میلیمتر در قسمت تاج	لازم نیست
41 تا61	III نسبتاً خوب	تونل به صورت پله ای حفر شود و پله قسمت فوقانی 1.5تا3متر جلوتر باشد.پس از هر نوبت آتشباری سیستم نگهداری موقت نصب شود.به فاصله10متری از جبهه کار سیستم نگهداری نصب شود	شبکه پیچ سنگ های منظم به طول 4متر . فاصله1.5تا2متر در قسمت تاج و دیواره . در قسمت تاج شبکه فلزی نیز نصب شود.	ضخامت 50 تا 100 میلیمتر در قسمت تاج وضخامت 30میلیمتر در دیواره ها	لازم نیست
21 تا 40	IV ضعیف	تونل به صورت پله ای حفر شود و پله قسمت فوقانی 1 تا 1.5 متر جلوتر باشد. فاصله سیستم نگهداری دائم تا جبهه کار حداکثر 10متر	شبکه پیچ سنگ های منظم به طول 4 تا 5 متر و به فاصله 1 تا 1.5 متر در تاج و دیواره همراه با توری فلزی	ضخامت 100 تا 150 میلیمتر در تاج و 100 میلیمتر در دیواره ها	قاب های سبک تا متوسط فولادی به فاصله 1.5متر در موارد لزوم
کمتر از 20	V خیلی ضعیف	به صورت گالری های چندگانه حفر شود که فاصله جبهه کار آنها 0.5 تا1.5	شبکه منظم پیچ سنگ ها به طول 5 تا 6 متر و به فاصله 1 تا 1.5	ضخامت 150 تا 200میلیمتر در تاج و 150 میلیمتر در	قاب های متوسط تا سنگین به فاصله 75 سانتیمتر همراه با پایه

		متر باشد.همراه با حفاری،سیستم نگهداری نیز نصب شود. بلافاصله پس از آتشباری عملیات بتن پاشی انجام گیرد.	متر در تاج و دیواره یا توری فلزی	دیواره ها و به ضخامت **50** میلیمتر در جبهه کار	های فلزی

نمونه سوم- تونل آبی به قطر9متر در توده سنگ فیلیتی با مشخصات زیر حفر می شود،سیستم نگهداری مناسب را طراحی کنید.

دسته درزه1: صاف و صفحه ای $J_r = 1$

کلریتی شده $J_a = 4$

15 درزه در هر متر

دسته درزه2: صاف و موج دار $J_r = 2$

دیواره اندکی هوازده $J_a = 2$

5 درزه در هر متر

بنابراین:

$J_v = 5+15 = 20$

$RQD = 115-3.3J_v = 115-3.3*20 = 50\%$

$J_n = 4$

حداقل جریان آب $J_w = 1$

مقاومت فشاری تک محوری فیلیت $\sigma_c = 40$ Mpa

تنش اصلی ماکزیمم $\sigma_1 = 3$ Mpa

تنش اصلی مینیمم $\sigma_3 = 1$ Mpa

بنابراین:

تنش متوسط $\frac{\sigma_C}{\sigma_1} = 13.3$ $\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = 3$

درنتیجه مقدار SRF= 1(ضریب کاهش تنش) بدست می آید.

$$Q = \frac{ROD}{J_n} * \frac{j_r}{J_a} * \frac{j_w}{SRF} = \frac{50}{4} * \frac{1}{4} * \frac{1}{1} = 3.1$$

پس سنگ ضعیف است.

تخمین نگهداری : ESR =1.6 و B=9m

$$ED=\frac{B}{ESR}$$ ED =1.6

به ازای Q=3.1 و ED=5.6، رده نگهداری21در جدول3-10 پیچ سنگهایی به طول13متر و فاصله داری2.1-6.5متر با شاتکریت به ضخامت20 تا30میلیمتر توصیه می شود(پیچ سنگها ازنوع تزریقی و قطر 20میلیمتر).

جدول3-10- سیستم نگهداری پیشنهادی برای سنگهای با کیفیت متوسط وسست 10>Q>1

سیستم نگهداری	Span/ESR (m)	P^{b} (kg/cm^{2})	Span/ESR (m)	پارامترهای شرطی J_r/J_n	RQD/J_n	Q	رده سیستم نگهداری
sb(utg)	۹-۳/۵	۱/۰			>۳۰	۱۰-۴	۱۷
B(utg)۱-۱/۵m					۱۰≥ ≤۳۰		
B(utg)۱-۱/۵m+S۲-۳m			≥۶		<۱۰		
S۲-۳m			<۶		<۱۰		
B(tg)۱-۱/۵m+cls	۱۵-۷	۱/۰	≥۱۰		>۵	۱۰-۴	۱۸
B(tg)۱-۱/۵m+cls			<۱۰		>۵		
B(tg)۱-۱/۵m+S۲-۳cm			≥۱۰		≤۵		
B(tg)۱-۱/۵m+S۲-۳cm			<۱۰		≤۵		
B(tg)۱-۳m+S(mr)۱۰-۱۵cm	۲۹-۱۲	۱/۰	≥۲۰			۱۰-۴	۱۹
B(tg)۱-۱/۵m+S(mr)۵-۱۰cm			<۲۰				
B(tg)۱-۳m+S(mr)۲۰-۲۵cm	۵۲-۲۴	۱/۰	≥۳۵			۱۰-۴	۲۰
B(tg)۱-۳m+S(mr)۱۰-۲۰cm			<۳۵				
B(tg)۱m+S۲-۳cm	۶/۵-۲/۱	۱/۵		≤۰/۷۵	≥۱۲/۵	۴-۱	۲۱
S۲/۵-۵cm				<۰/۷۵	<۱۲/۵		
B(utg)۱m				>۰/۷۵			
B(utg)۱m+clm	۱۱/۵-۲/۵	۱/۵		>۱/۰	۱۰< <۳۰	۴-۱	۲۲
S۲/۵-۷/۵cm				>۱/۰	≤۱۰		
B(utg)۱m+S(mr)۲/۵-۵m				≤۱/۰	<۳۰		
B(utg)1m					≥۳۰		
B(tg)۱-۱/۵m+S(mr)۱۰-۱۵cm	۲۴-۸	۱/۵	≥۱۵			۴-۱	۲۳
B(tg)۱-۱/۵m+S(mr)۵-۱۰cm			<۱۵				
B(tg)۱-۱/۵m+S(mr)۱۵-۳۰cm	۴۶-۱۸	۱/۵	≥۳۰			۴-۱	۲۴
B(tg)۱-۱/۵m+S(mr)۱۰-۱۵cm			<۳۰				

3-8- استفاده از شاتکریت به عنوان وسیله نگهداری سازه های زیرزمینی

بطوری که قبلا نیز گفتیم، درحفریات زیرزمینی، شاتکریت اساساً به عنوان وسیله نگهداری مورد استفاده قرارمی گیرد و به ویژه در تونلهای سنگی به طور گسترده ای اجرا می شود.

در طراحی سیستم های نگهداری، سه نوع فشار وارده بر سیستم در نظر گرفته می شود کـه عبـارت اسـت از فشـار سست شدگی(loosening)،فشارآماسی یاتورمی(swelling) وفشارخالص زمین(genuine ground pressure) است.

فشار سست شدگی یا موضعی، ناشی از وزن مواد در محل تاج قوس تونل یا فضای زیر زمینی است که بـر اثـر سسـت شدگی بر روی پوشش اثر می کنند. این نوع فشار، به ویژه در سنگ های ترک دار، به طور گسترده ای وجود دارد ودر طول مدت ایستایی سازه این فشار افزایش می یابد. طول این زمان با عرض دهانه تونل رابطه عکس دارد.

نا پایداری ناشی از سست شدگی سنگ درزه دار با سه نوع مکانیزم شکست زیر اتفاق می افتد:

الف ـ لغزش قطعات سنگ حاصل از برش سنگ از میان قسمتهای سالم یا لیز خوردن در امتداد صفحات نا پیوستگی.

ب ـ جدایی قطعات سنگ دراثر کشش یا دوران

ج ـ ترکیبی از دو حالت لغزش و جدایش

حرکت بخش سست شونده معمولا در طول درزه ها یا نا پیوستگی های دیگر سنگ روی می دهد. نیـروی اولیـه لازم برای جلوگیری ازسقوط ناچیز است اما در اکثر موارد پس ازآغاز جابجایی، در صدد رفع آن بر می آیند.

عوامل مؤثر دراین نوع ناپایداری(سست شدگی) به شرح زیر است:

- ـ خواص توده سنگ
- ـ مشخصات ناپیوستگی های سنگ مثل مواد آکننده درزه ها
- ـ وضعیت آبهای زیرزمینی
- ـ نحوۀ ترکیب ناپیوستگی ها ومناطق ضعیف ازنظرزمین ساختاری
- ـ میزان تنشهای افقی و قائم در توده سنگ بکر
- ـ شکل حفره زیرزمینی
- ـ نسبت فاصله درزه ها به دهانه حفره
- ـ تغییرات هر یک ازعوامل یاد شده نسبت به زمان
- ـ روش حفاری

تغییرات هر یک ازاین عوامل ممکن است موجب ناپایداری سازه شود. فشارهای تورمی در نتیجه افزایش میزان رطوبت در زمینهایی است که دارای مواد منبسط شونده مانند کانیهای رسی فعال هستند. این پدیده ممکن است بدون ایجاد ناحیه پلاستیک در اطراف حفره روی دهد. ازآن جا که توان سنگ برای جذب آب به تنشهای موجود وابسته است، لذا اندازه فشار تورمی به تنش های زمین ارتباط دارد. فشار تورمی به عواملی همچون مشخصات زمین شناسی(میزان ونوع کانیها)، زمان اجرای پوشش و سختی پوشش بستگی دارد. تورم نیز ممکن است سبب ایجاد سست شدگی درمحدوده فضای زیرزمینی شود.

اگر سنگهای اطراف تونل از نوع نرم و سالم باشند، طبقات به داخل حفره فشرده می شوند و پس از تغییر شکل، احتمالاً به وضعیّت تعادل می رسند. اگر سنگ به شدت تحت تنش باشد، ممکن است این وضع تعادلی حاصل نشود. از سوی دیگر، در سنگهای ترد در صورت بزرگتر بودن تنشهای مماسی، غالباً سنگ به صورت قطعات مسطح ازسطح حفره کنده می شوند.

در صورتی که قبل ازخاتمه تغییر مکانهای شعاعی در تونل، پوشش اجرا شود، فشاری از طرف سنگهای فراگیر بر شاتکریت وارد خواهد شد که مقدار این فشار، به زمان اجرای پوشش، انعطاف پذیری تکیه گاه و گستردگی ناحیه پلاستیک اطراف تونل بستگی دارد. بنابراین فشار زمین ممکن است باعث پوسته پوسته شدن دیواره شود. اگر ازشاتکریت بطور صحیح استفاده شود، علاوه براینکه برتنش های زمین فائق می آید، می تواند به عنوان پوشش حفاظ ازنفوذ آب یا هوا وتخریب سنگ نیزجلوگیری کند.

3-9ـ عملکرد تکیه گاهی شاتکریت در سازه های زیرزمینی

عمده ترین عاملی که باعث استفاده فراوان شاتکریت در نگهداری سازه های سنگی زیرزمینی شده، قابلیت چسبندگی آن به هر نوع سنگ و گیرش وسخت شدگی سریع آن است. محققین زیادی این موضوع را بررسی کرده اند که نتایج تحقیقات آنها را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

الف- اگر شاتکریت با فشار بر روی درز و ترکها و ناهمواریهای سطوح سنگی پاشیده شود، مانند یک ملات سبب یکپارچگی سطح مورد اجرا می شود.

ب- شکافهای سنگ محل تاثیر تنشهای متمرکز و جزو نقاط ضعیف آن محسوب می شوند. پر کردن این ترکها با بتن زودگیر سبب می شود که قسمتهای زاویه دار سنگ به صورت گرد در آید و در نتیجه، تنش های متمرکز کاهش یابد وازحرکات مخرب جلوگیری به عمل آید.

ج- از آنجا که شاتکریت با اکثر سنگها به خوبی می چسبد، لذا لایه نازکی از آن به شکل سطحی مقاوم در جهت تقویت سطوح ضعیف عمل می کند. با این روش، ترکیبی از سنگ و سطح تقویت شده به وجود می آید که بار وارده را به کمک مقاومتهای چسبندگی و برشی، به سنگهای پایدارمجاورمنتقل می سازد. مقاومت برشی مناسب شاتکریت سبب می شود که بخوبی ازسقوط قطعات سست سنگ جلوگیری به عمل آید.

د- در صورت سست بودن اتصال سنگ و پوشش، لایه نازک و یکپارچه ای ازشاتکریت به صورت یک غشاء در خمش و کشش کار می کند.

ه- در اتصال بلوکهای سنگی به وسیله مهاری ها ، دیده شده است که با کاهش فاصله بلوکها، در مورد یک نوع مهاری با شکل و اندازه مشخص، تنشهای وارده بر آن کاهش می یابد . سنگ و شاتکریت را می توان به صورت یک تکیه گاه توأم که به طور پیوسته محیط تونل را احاطه کرده اند در نظر گرفت (با فاصله صفر بین بلوکها). به علت پایین بودن نسبی تنش گسترده در لایه شاتکریت، این لایه قادر به تحمل بار نسبتاً زیاد از ناحیه سنگ است. بعلاوه، با گسترش سطح تماس آن با سنگ در جهت طول تونل، ظرفیت تحمل بار این پوشش به مراتب بیشتر می شود.

و- شاتکریت از نشت آب از خلل و فرج سنگ جلوگیری می کند و در نتیجه از خروج ذرات آکننده ترکها ممانعت به عمل می آورد. در تونلسازی با روش سنتی حفاری و آتشباری، معمولا آب موجود در سنگها به وسیله گاز ناشی از انفجار پس زده می شود. اگر قبل از آنکه آب مزبور مجدداً به سطح سنگ برگردد، شاتکریت اجرا شود، اثر عایق بندی آن بیشتر خواهد بود. همچنین پوشش سریع سنگ عریان، سبب حفاظت آن در مقابل هوازدگی می شود.

ز- در ساعات اولیه، شاتکریت کمی به حالت تسلیم در می آید اما پس از چندی که فشارهای سست شدگی افزایش می یابد، سخت می شود. در شرایط تعادل، قوس فشار در بالای تونل ثابت شده و گسترش آن متوقف می شود. به این ترتیب، سنگ به صورت تکیه گاهی مستقل باید قسمتی از بارهای وارده از ناحیه بالای تونل را تحمل کند. یک لایه نازک شاتکریت که بلافاصله پس از حفاری پاشیده می شود،به شکل پوسته ای مناسب ، سنگ ضعیف را به وضعیت پایداری می رساند.

ح- شاتکریت به صورت پیوسته و لایه ای ضخیم (حداقل15سانتیمتر)از نظر سازه ای به صورت یک حلقه بسته (تونلهای دایره ای) یا قوسی گیردارعمل می کند.

به طور خلاصه میتوان گفت که شاتکریت بر خلاف سیستمهای نگهداری فلزی، بار وارده را به کف تونل منتقل نمی کند بلکه به توده سنگ کمک می کند تا بارهای وارده را تحمل کند.

3-10- کاربرد شاتکریت به عنوان سیستم نگهداری سازه های زیرزمینی

در صنعت تونلسازی ، از شاتکریت معمولا به عنوان سیستم نگهداری موقت استفاده می شود اما می توان آن را به عنوان سیستم نگهداری دائم نیز به کار برد. در حالت موقت ، برای پوشش سنگ تازه حفاری شده در خلال زمان پا برجایی بکار می رود. اگر طول این زمان کوتاه باشد و حفاری به صورت سنتی به روش چالزنی و آتشبازی انجام گیرد، وجود مواد آتشبازی شده مانع انجام این کار خواهد شد، ولی عملیات اجرایی را می توان از روی مواد باقیمانده از آتشبازی یا سکوی متحرک ، انجام داد. در سالهای اخیر به علت وجود تجهیزات بتن پاشی از راه دور، شاتکریت، موارد کاربرد بیشتری پیدا کرده است. این نوع وسایل برای کارگر بتن پاش ایمنی بیشتری دربر دارد. همانگونه که گفتیم، اجرای شاتکریت را نمی توان بلافاصله پس از آتشبازی آغاز کرد زیرا ابتدا باید سطح کاررا آماده ساخت. این مرحله که معمولا شامل لق گیری و پاکسازی سطح است ، یکی از مواردی است که در چسبندگی سنگ و شاتکریت تأثیربسیار دارد.

امکان کاربرد شاتکریت درسطوح ناصاف و انواع مقاطع حفاری شده، برتری آن را نسبت به سایر سیستمهای نگهداری مثل قابهای فولادی وقطعات بتنی پیش ساخته، نشان می دهد. شاتکریت را می توان همراه با پیچ سنگ، شبکه سیمی و یا هردو، مورد استفاده قرار داد. در شرایط خاصی که زمین سست باشد، می توان از شاتکریت و تکیه گاه های فلزی تواٌماً استفاده کرد. در واقع استفاده از شاتکریت تنها، به عنوان وسیله نگهداری اصلی، در بسیاری از موارد توصیه نمی شود.

حداقل ضخامت یک لایه شاتکریت به عنوان پوشش تکیه گاهی 5 سانتیمتر است. در استفاده از شاتکریت به صورت لایه های متعدد، می توان توری فلزی را ما بین دو لایه یا داخل لایه ها قرار داد. استفاده ازتوری فلزی در سیستم نگهداری، باعث افزایش انعطاف پذیری شاتکریت می شود و از جدایی شاتکریت و سنگ و در نتیجه ریزش آن جلوگیری می کند. گاه ازشاتکریت برای تقویت موضعی سیستم نگهداری استفاده می شود. به عنوان مثالی در این مورد، می توان استفاده از آن درزمینهای سست شونده و تحت تنش بیش از حد، در گذر از گسل ها، دیواره و قوس ها درزمینهایی با کیفیت متوسط را ذکر کرد. در معادن می توان از شاتکریت برای پایدارسازی و تقویت پایه های معدنی با نسبت ارتفاع به عرض بیش از دو ، استفاده کرد.

برای ترمیم خرابی در پشت جبهه ای که سقف آن ریزش کرده یا در شرف ریزش است نیز می توان از شاتکریت استفاده کرد. قبل از ریزش شاتکریت، سنگ را استحکام می بخشد وآن را بصورت بلوکی یکپارچه در می آورد.اگر ریزش روی داده باشد، برای جلوگیری ازگسترش می توان اجرای شاتکریت را از محلی ایمن شروع کرد.استفاده ازشاتکریت به عنوان سیستم نگهداری دائمی، مستلزم مسلح کردن آن به وسیله وسایلی نظیر پیچ سنگ ، میلگرد ، توری فلزی یا الیاف فولادی است.

3-11- طراحی تجربی شاتکریت در سازه های زیرزمینی

طراحی سیستم نگهداری حفاری های زیرزمینی به وسیله شاتکریت کار بسیار دقیقی است، با این وجود ، مهندسین مجرب به خوبی از عهده این کار برمی آیند. دربسیاری از موارد ازشاتکریت به عنوان آخرین راه حل به منظور نگهداری سنگهای لق شده دراطراف یک تونل استفاده شده ودرعین نا باوری ، این کار بسیار مؤثر بوده و از ریزش سنگ جلوگیری کرده است.

اندر کنش پیچیده بین توده سنگ سست اطراف حفاری های زیرزمینی و یک لایه شاتکریت با یک ضخامت متغیر و با خواصی که با سخت شدن آن تغییر می کند، گاه با تحلیلهای تئوری آن متفاوت است. در سالهای اخیر با تحولاتی که در زمینه تحلیلهای عددی و کاربرد کامپیوتر بوجود آمده می توان به تحلیلهای واقعی دست یافت و رفتار واقعی اندر کنش سیستم نگهداری – شاتکریت را تحلیل کرد. تحلیل روشنتر و واقع بینانه ترازرفتارشاتکرت، نیاز به سالها تجربه در زمینه استفاده و تحلیل نتایج حاصله از این برنامه ها دارد. از آنجا که شاتکریت به ندرت به تنهایی به عنوان سیستم نگهداری بکار می رود و معمولا همراه با پیچ سنگ، کابلهای مهاری، قابهای فلزی و دیگر وسایل نگهداری مورد استفاده قرارمی گیرد، تحلیل نگهداری با شاتکریت پیچیده تر می شود.

جدول 1-5 آخرین تجربیات محققین در این زمینه را نشان می دهد که طی آن، قوانین تجربی رابا تجربیات علمی خود تلفیق کرده اند. این جدول تنها باید به عنوان یک راهنمای کلی در مورد انتخاب نوع و ضخامت شاتکریت در شرایط مختلف مد نظر قرار گیرد. شاتکریت نمی تواند از تغییر شکل سنگ به ویژه در شرایطی که تنش بالا باشد جلوگیری کند، اما در کنترل تغییر شکل ، به ویژه زمانی که همراه با پیچ سنگ ، داول یا کابل مهاری و یا وسایلی از جمله الیاف فولادی بکار رود، نقش مهمی ایفا می کند. در مواردی که پیچ سنگ یا کابل مهاری بعد از شاتکریت اولیه

نصب شود،شاتکریت بسیار مؤثر خواهد بود. این امرسبب می شود که بارهای صفحات فشار بر روی سطح بزرگ واقع در زیر توده سنگ، توزیع شود.

3-12- طراحی تحلیل شاتکریت در سازه های زیرزمینی

در روش تحلیلی ، شاتکریت همانند یک عضو سازه ای در نظر گرفته می شود و به منظور ساده کردن مسئله ، فرضیاتی را در نظر قرار می دهند. این فرضیات عبارتند از:

الف – تونل دارای مقطع دایره کامل است(حفاری به وسیله ماشین یا با استفاده ازآتشباری خیلی دقیق).

ب- ضخامت شاتکریت یکنواخت وبا محیط تونل بطورکامل درتماس است(استوانه جدارنازک وبسته).

ج – مقاومت پوشش شاتکریت تنها باید درحدی باشد که بتواند ازافزایش فشارسست شدگی یا گسترش منطقه پلاستیک جلوگیری کند.

د- نیروهای وارده بر پوشش شاتکریت درکلیه جهات یکنواخت وبرابرهستند. این نیروها ، تنها بارهایی هستند که پوشش باید درمقابل آنها مقاومت کند.

برای طراحی تحلیلی شاتکریت،چندین روش تحلیل سازه ای با توجه به فرضیات یاد شده توسط افراد مختلف ارائه شده است که درزیر به شرح دو روش می پردازیم:

1- روش دیروهمکاران

دیر (Deere) ضخامت شاتکریت را بر مبنای نیروی محوری لازم برای مقابله با فشار سنگ ، به صورت استوانه جدار نازک محاسبه کرد. در این روش ضخامت لازم از فرمول زیر بدست می آید:

$$t = \frac{p_i r}{\sigma_{all}}$$

که در آن :

t= ضخامت شاتکریت (cm)

P_i = فشار یکنواخت مؤثر بر تونل (kg/cm^2)

r = شعاع تونل (cm)

σ_{all} = تنش مجاز شاتکریت (kg/cm^2)

تنش مجاز شاتکریت ، به عنوان درصدی از مقاومت فشاری تک محوری آن با توجه به ضریب اطمینان، در نظر گرفته می شود.

2- روش هور

هور(Heuer) در سال 1974 روش دیگری را برای محاسبه ضخامت شاتکریت برمبنای طراحی سازه های بتنی با استفاده از مقاومت نهایی پیشنهاد کرد. این روش برای مواردی که ضخامت پوشش شاتکریت بیش از 15 سانتیمتر باشد، قابل کاربرد است .

نیروی محوری شاتکریت از رابطه زیر حاصل می شود :

$$T = P_i r$$

که در آن:

p_i = میانگین فشار شعاعی که به وسیله تکیه گاه تحمل می شود (kg/cm2)

r = شعاع انحنای تونل (cm)

حداکثر نیروی محوری T_U که به وسیله لایه شاتکریت تحمل می شود از رابطه زیر به دست می آید:

$$T_U = (LF) .T$$

که در آن LF عبارت از ضریب باری است که در محاسبات معمولی بتن مسلح اعمال می شود . مقدار این ضریب بین 1/4 برای بار مرده تا 1/9 برای نیروهای زلزله متغییر است .

از طرف دیگر، حداکثر ظرفیت شاتکریت در واحد طول تونل برابر است با:

$$T_U = (0/85\, \phi'\ \sigma_c)\, t_e$$

که در آن :

ϕ' = ضریب کاهش باربری که اندازه آن برای اعضای خمش 0/9، برای ستونهای دور پیچی شده 0/75 و برای بتن غیر مسلح 0/65 است .

σ_c = مقاومت فشاری تک محوری شاتکریت (kg/cm^2)

t_e = ضخامت مؤثر لایه شاتکریت (cm)

با ترکیب معادلات یاد شده ، نتیجه زیر به دست می اید:

$$t_e = \frac{LF}{0.85\phi'} \frac{p_i r}{\sigma_c} \qquad (5-2)$$

در این روش، مقدار($\frac{LF}{0.85\phi'}$) ضریب اطمینان واقعی برای مقاومت شاتکریت است.هور پیشنهاد کرده است که در طراحی تکیه گاه موقت، این مقدار برابر 2 و برای تکیه گاه دائمی 2/5 تا 3 در نظر گرفته شود .

به هر حال، ضخامتی که از رابطه زیر به دست می آید،از ضخامت اسمی شاتکریت که به سبب تغییرات جزئی و بی نظمی های سطح حفاری شده ایجاد می شود، کمتر است . بنابراین برای در نظر گرفتن این مسئله، ضخامت اسمی را از رابطه زیر محاسبه می کنند:

$$t_n = t_e + (5 \sim 10\ cm)$$

و یا :

$$t_n = (5 \sim 10\ cm) + sf\ (\frac{p_i r}{\sigma_{all}})$$

اگر چه در این روش ضرایب تجربی ϕ' وLF وارد می شوند اما می توان آن را روشی تحلیلی در نظر گرفت. با بررسی روش طرح سازه ای شاتکریت ، می بینیم که مهمترین مجهول طراحی، تخمین فشار داخلی زمین است و دقت طراحی شاتکریت به دقت برآورد آن بستگی دارد. بطور خلاصه ، با استفاده از مقدار محاسبه شده برای p_i و فرض اینکه پوشش بصورت حلقه ای فشاری عمل می کند و در وضعیتهای فشاری – برشی گسیخته می شود ، ضخامت لازم شاتکریت به دست می آید.

ضخامت مؤثر پوشش شاتکریت از رابطه زیر تعیین می شود :

$$t = sf(\frac{p_i r}{\sigma_c})$$

که در آن:

P_i = فشار داخلی

r = شعاع تونل

σ_c = مقاومت فشاری تک محوری شاتکریت

Sf = ضریب اطمینان که مقدارش در حدود 2 تا 3 است .

همانطور که در صفحه قبل اشاره شد.این ضخامت ها ، تنها شامل آن قسمتی از پوشش می شود که حلقه ای نسبتا صاف و مدور را تشکیل می دهد. بنابراین، به منظور پر کردن ناصافی های داخلی اطراف تونل، باید مقداری به آن اضافه شود .

3-13- طرح موردی شاتکریت

با توجه به توضیحاتی که در قسمت قبل در مورد طراحی شاتکریت مطرح شد حال نسبت به طراحی هر یک از سه نمونه با استفاده از الیاف فولادی و شبکه فلزی می پردازیم.

الف – طرح سیستم نگهداری شاتکریت با شبکه فلزی

ضخامت شاتکریت(cm) $t= \frac{D}{150}(65-RSR)$

D قطر تونل برحسب متر

RSR شاخص ساختارسنگ

- نوع میلگرد **10*10@6ø** جهت مش بندی محل شاتکریت .

ب – طرح سیستم نگهداری شاتکریت با الیاف فولادی

ضخامت شاتکریت(cm)

$$t_n= sf \ \frac{p_i r}{\sigma_c} + (5 \ \sim 10 \text{ cm})$$

P_i = فشار داخلی

r = شعاع تونل

σ_c = مقاومت فشاری تک محوری شاتکریت

Sf = ضریب اطمینان که مقدارش در حدود 2 تا 3 است .

و در نهایت نتایج طراحی هر دو روش در جدول3-11 ارائه شده است.

جدول 3-11- نتایج طرح شاتکریت سنتی و الیافی برای موارد بررسی شده در فصل دوم

ردیف	شرح	قطر تونل(m)	طول تونل(m)	طرح شاتکریت سنتی		طرح شاتکریت الیافی
				ضخامت(cm)	نوع میلگرد	ضخامت(cm)
1	نمونه اول	6.7	2800	13	ø6@10*10	10
2	" دوم	6	1650	12	ø6@10*10	8
3	" سوم	9	1400	15	ø6@10*10	12

با توجه به جدول 3-11 مقدار مصالح مصرفی و قیمت واحد یک متر طول تونل درهر دو روش در جـدول 3-12 و 3-13 محاسبه گردیده است.

جدول 3-12- مقدار مصالح مصرفی در واحد طول تونل در روش شاتکریت سنتی

ردیف	قطر تونل(m)	ضخامت شاتکریت(cm)	سیمان (t/m)	میلگرد ø6 (kg/m)	ماسه (t/m)	آب (kg/m)	قیمت واحد طول تونل (ریال)
1	6	10	1	180	4.7	406	5.314.350
2	6.7	13	1.1	210	5.7	500	7.714.664
3	9	15	1.3	270	8.9	760	11.957.286

جدول 3-13- نتایج مقدار مصالح مصرفی در واحد طول تونل در روش شاتکریت الیافی

ردیف	قطر تونل(m)	ضخامت شاتکریت(cm)	سیمان (t/m)	الیاف (kg/m)	ماسه (t/m)	آب (kg/m)	قیمت واحد مترتونل (ریال)
1	6	8	0.63	90.4	2.5	270	2.755.805
2	6.7	10	0.88	126.3	3.5	379	3.846.644
3	9	12	1.3	203	5.5	610	6.200.561