اصول مهندسی تونل

جلسهٔ هفتم

رده بندی توده سنگ

Karl Terzaghi: Founder of Modern Geotechnology. Photo courtesy of The MIT Museum

Principles of Tunnel Engineering

رده بندی توده سنگ

- برآورد وضعیت و پایداری توده سنگ لازمهٔ طراحی تونل است.
- با استفاده از یک سیستم رده بندی می توان یک ایدهٔ کلی از وضعیت توده سنگ و پایداری آن بدست آورد.
- در ساده ترین حالت یک سیستم رده بندی می تواند به عنوان یک لیست کنترل (Check list) جهت فراهم نمودن الزامات طراحی بکار رود.

- رده بندی توده سنگ را نمی توان جایگزین روش های طراحی دقیق کرد، بلکه این روش ها ابزاری اولیه برای رسیدن به طراحی های دقیق تر به شمار می روند.

رده بندی توده سنگ

رده بندی ریتر (Ritter): در سال ۱۸۷۹ نوعی طبقه بندی مهندسی برای طراحی سیستم نگهداری تونل ارائه داد.

رده بندی ترزاقی (Terzaghi): قدیمی ترین مرجع رده بندی توده سنگ توسط ایشان در سال ۱۹۴۶ ارائه شده است. ایشان بار وارده بر سیستم نگهداری تونل را توسط طبقه بندی توصیفی سنگها برآورد می کرد. هدف این رده بندی برآورد بار وارده بر قاب های فولادی از طرف زمین است. این روش زمینهٔ پیدایش سایر روش های رده بندی را فراهم کرد.

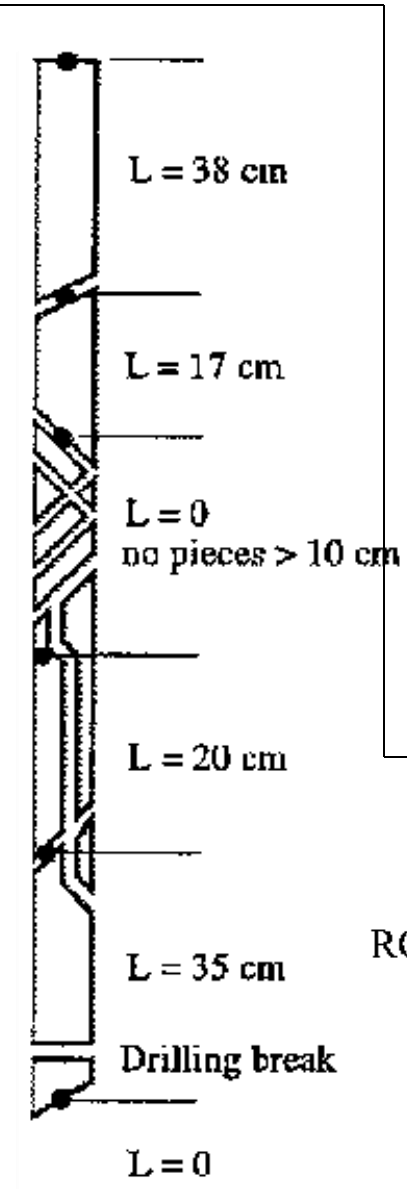
رده بندی بر مبنای زمان پابرجایی: این رده بندی در سال ۱۹۵۸ توسط لوفر (Lauffer) ارائه شد. مقصود از زمان پابرجایی، مدت زمانی است که تونلی با دهانهٔ فعال معین در داخل سنگ حفر شده است، پابرجا بماند و بدون نگهداری ریزش نکند. دهانهٔ فعال تونل یا عرض و قطر تونل بوده و یا فاصلهٔ آخرین نگهداری تا سینه کار (هرکدام که بزرگتر است) می باشد. این رده بندی در سال ۱۹۷۴ توسط پاچر (Pacher) تکمیل شد و امروزه به لوفر-پاچر معروف است.

رده بندی توده سنگ

رده بندی شاخص کیفیت سنگ (RQD): این رده بندی در سال ۱۹۶۷ توسط دیر (Deer) و همکارنش ارائه شد. شاخص RQD بر اساس وضعیت مغزه های NX (۵۴/۷ میلیمتر) بدست آمده طی حفاری گمانه های اکتشافی محاسبه می شود.

طبق نظر پالمستروم (Palmstrom) (۱۹۸۲) چنانچه مغزه در دست نباشد، می توان با شمارش درزه هایی که در رخنمون های حفریات نمایان شده است RQD را محاسبه کرد.

چنانچه مقدار RQD بزرگتر از ٪۷۵ بدست آید توده سنگ مقاوم بوده و چنانچه RQD کمتر از ٪۵۰ باشد توده سنگ ضعیف است



Total length of core run = 200 cms

$$RQD = \frac{\sum \text{Length of core pieces} > 10\text{ cm length}}{\text{Total length of core run}} \times 100\%$$

$$RQD = \frac{38 - 17 - 20 - 35}{200} \times 100\% = 55\%$$

رابطهٔ پالمستروم

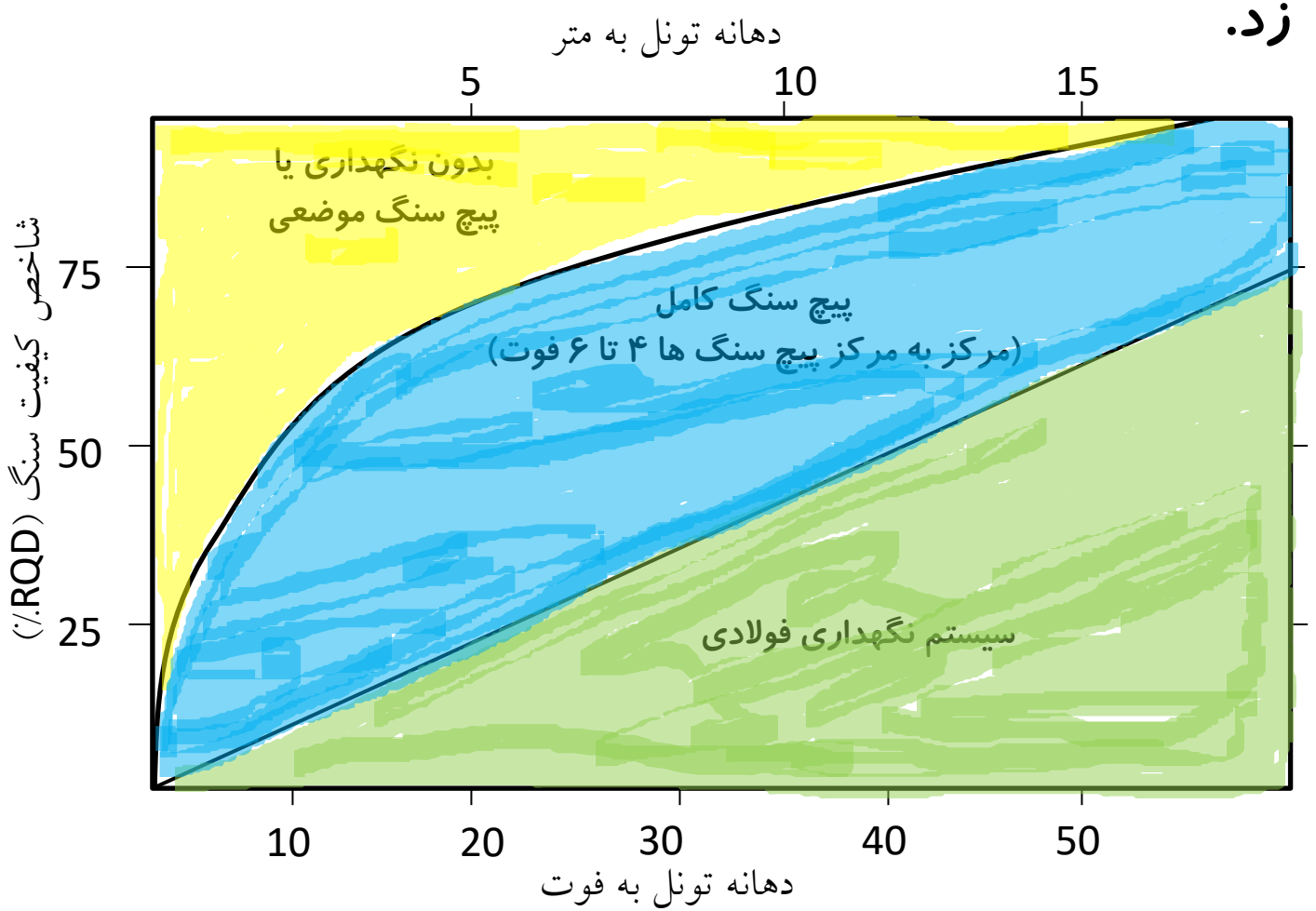
$$RQD = 115 - 3.3\, J_v$$

J_v تعداد درزه های موجود در واحد طول

رده بندی توده سنگ

رده بندی شاخص کیفیت سنگ (RQD): با معلوم بودن شاخص RQD با مراجعه به جداول و نمودارها می توان سیستم نگهداری لازم برای تونل را تخمین زد.

RQD (%)	Rock Mass Quality
<25	Very Poor
25-50	Poor
50-75	Fair
75-90	Good
90-100	Excellent



رده بندی توده سنگ

رده بندی بر اساس ساختار توده سنگ (RSR): این رده بندی در سال ۱۹۷۲ توسط ویکهام (Wickham) و همکارانش ارائه شد. اگرچه این روش در ابتدا برای طراحی شاتکریت (بتن پاشی) ارائه شد، ولی بعدها برای طراحی فولادی تونل های کوچک نیز مورد استفاده قرار گرفت. شاخص RSR به صورت زیر تعریف شد:

$$RSR = A + B + C$$

A مربوط به زمین شناسی توده سنگ بوده و به نوع سنگ، مقاومت سنگ، ساختار توده سنگ می باشد

B با توجه به وضعیت ناپیوستگی ها نسبت به امتداد تونل از قبیل فاصله داری درزه ها، امتداد و شیب درزه ها تعیین می شود.

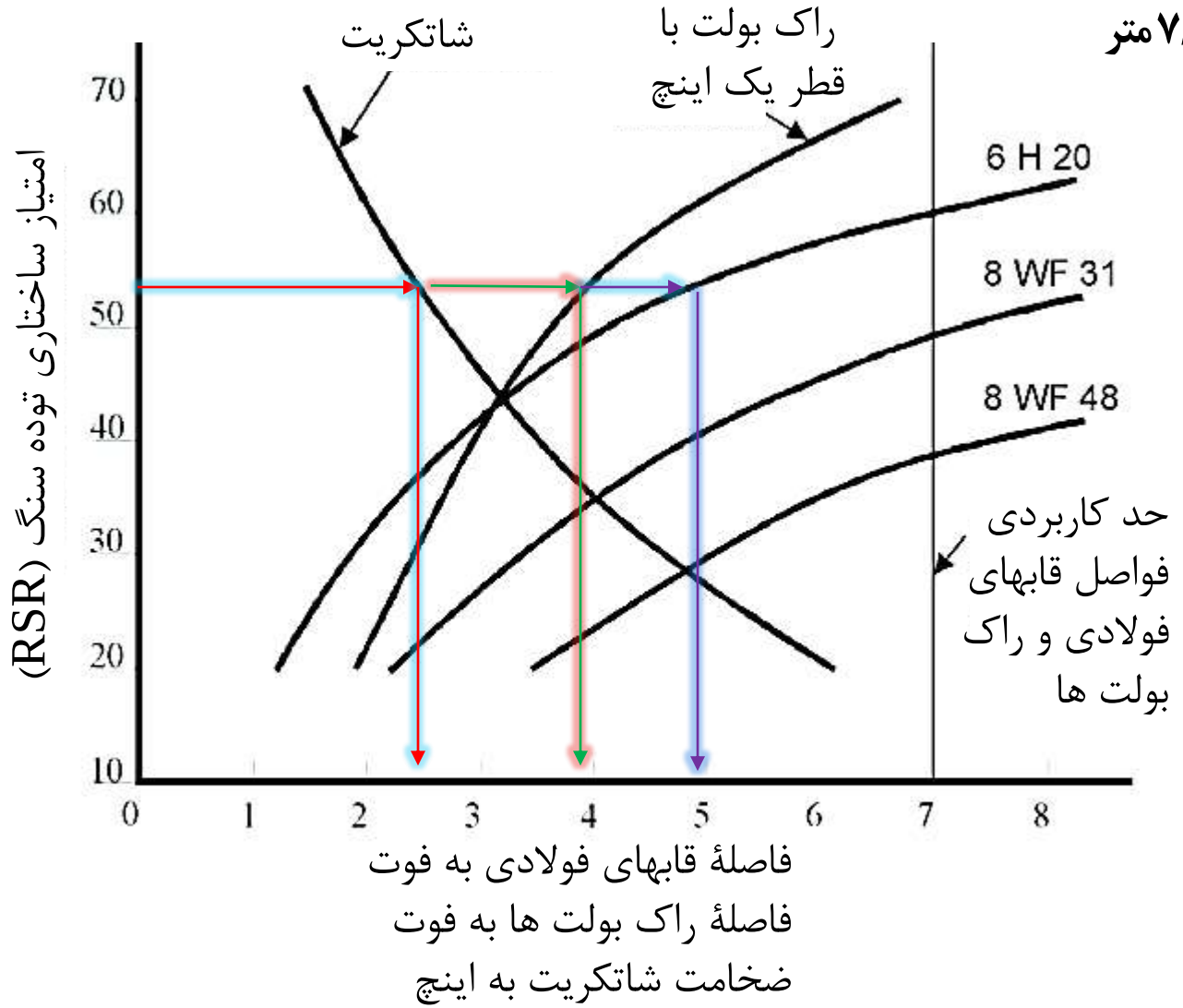
C اولاً بستگی به A و B داشته و دوماً مشخص کنندهٔ وضعیت جریان آبهای زیر زمینی است (حجم آب به ازای طول معینی از تونل)

مقدار RSR به کمک جداول تعیین ضرایب A و B و C بدست می آید و به کمک نمودارهایی مقدار نگهداری مورد نیاز برای تونل با عرض مشخص ارائه می شود.

رده بندی توده سنگ

رده بندی بر اساس ساختار توده سنگ (RSR):

تخمین نگهداری برای تونل به قطر ۷/۳ متر



رده بندی توده سنگ

رده بندی ژئومکانیکی (RMR):

در سال ۱۹۷۶ توسط بنیاوسکی (Bieniawski) ارائه شد که به رده بندی CSIRO نیز معروف است. این رده بندی از موفق ترین روش های رده بندی است. در این رده بندی از ۶ پارامتر زیر استفاده شده است:

الف- مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ

ب- شاخص RQD

ج- فاصله داری درزه

د- وضعیت ناپیوستگی های توده سنگ

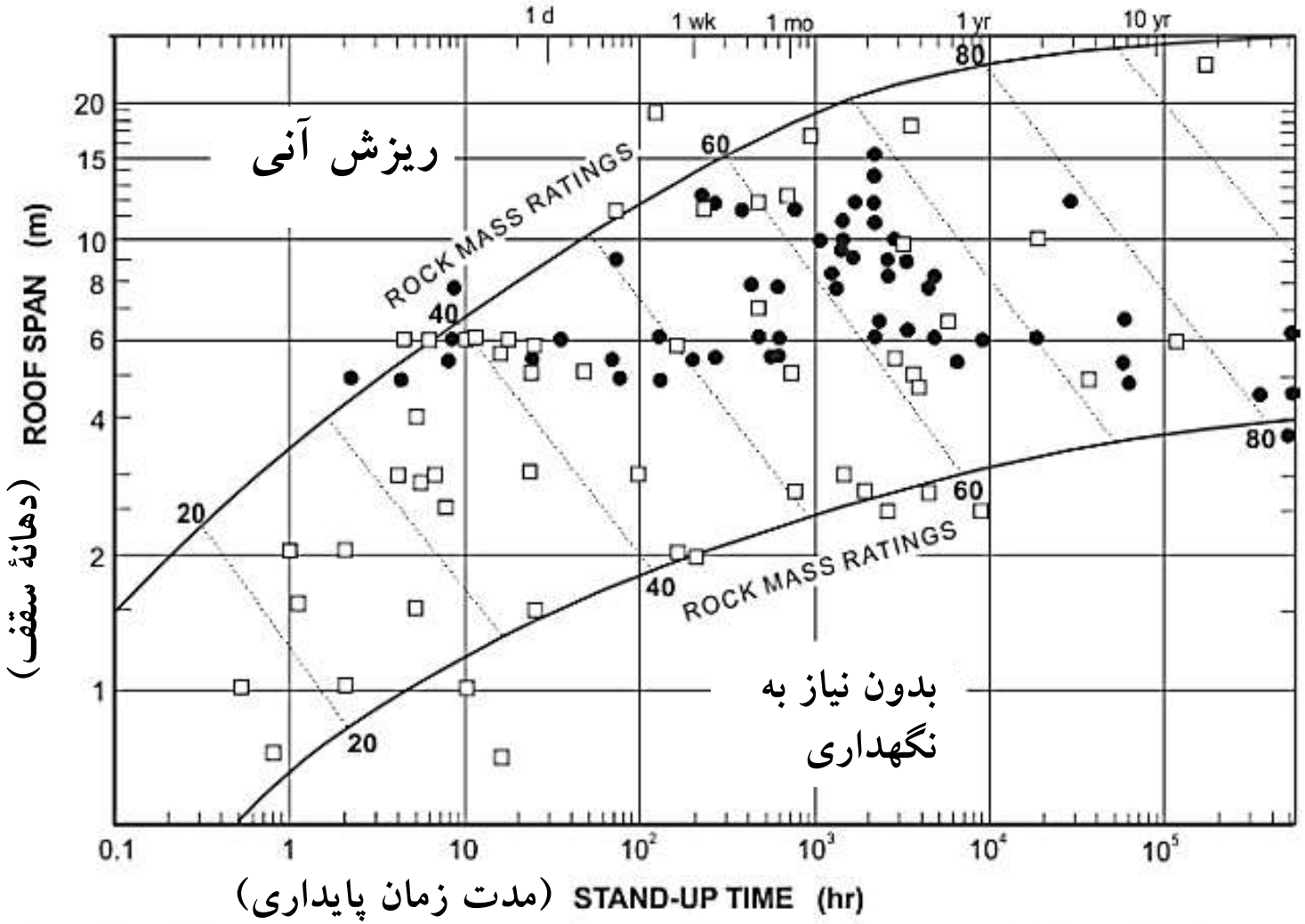
ه- وضعیت آبهای زیرزمینی

در این روش به ازای هر وضعیت از ۶ پارامتر یاد شده نمره یا امتیازی تعلق می گیرد که جزئیات آن در جداول مربوط قید شده است.

$$RMR = J_{A1}+J_{A2}+J_{A3}+J_{A4}+J_{A5}+J_{B}$$

رده بندی توده سنگ

رده بندی ژئومکانیکی (RMR): خطوط منحنی نشان دهندهٔ محدودهٔ کاربرد روش هستند



RMR classification of rock masses. (Contour lines indicate limits of applicability) (Bieniawski, 1989)

رده بندی توده سنگ

رده بندی ژئومکانیکی (RMR): پارامترهای رده بندی و امتیاز آنها

PARAMETER			Range of values // ratings						
1	Strength of intact rock material	Point-load strength index	> 10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	For this low range uniaxial compr. strength is preferred		
		Uniaxial com-pressive strength	> 250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 1 MPa
		RATING	**15**	**12**	**7**	**4**	**2**	**1**	**0**
2	Drill core quality RQD		90 - 100%	75 - 90%	50 - 75%	25 - 50%	< 25%		
		RATING	**20**	**17**	**13**	**8**	**5**		
3	Spacing of discontinuities		> 2 m	0.6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
		RATING	**20**	**15**	**10**	**8**	**5**		
4	Condition of discon-tinuities	Length, persistence	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m		
		Rating	**6**	**4**	**2**	**1**	**0**		
		Separation	none	< 0.1 mm	0.1 - 1 mm	1 - 5 mm	> 5 mm		
		Rating	**6**	**5**	**4**	**1**	**0**		
		Roughness	very rough	rough	slightly rough	smooth	slickensided		
		Rating	**6**	**5**	**3**	**1**	**0**		
		Infilling (gouge)	none	Hard filling		Soft filling			
			-	< 5 mm	> 5 mm	< 5 mm	> 5 mm		
		Rating	**6**	**4**	**2**	**2**	**0**		
		Weathering	unweathered	slightly w.	moderately w.	highly w.	decomposed		
		Rating	**6**	**5**	**3**	**1**	**0**		
5	Ground water	Inflow per 10 m tunnel length	none	< 10 litres/min	10 - 25 litres/min	25 - 125 litres/min	> 125 litres /min		
		p_w / $\sigma 1$	0	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		General conditions	completely dry	damp	wet	dripping	flowing		
		RATING	**15**	**10**	**7**	**4**	**0**		

p_w = joint water pressure; $\sigma 1$ = major principal stress

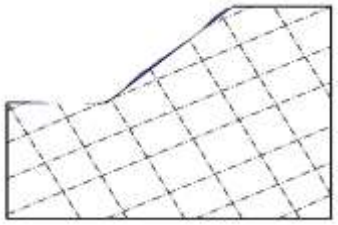
پارامتر			دامنه مقادیر					
۱	مقاومت سنگ سالم	شاخص مقاومت بار نقطه‌ای	0< (MPa)	10-4	4-2	2-1		برای این مقادیر کم آزمایش فشاری تک‌محوره بهتر است
		مقاومت فشاری تک‌محوره	250< (MPa)	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1	<1
	امتیاز		۱۵	۱۲	۷	٤	۲	۱	۰
۲	کیفیت مغزه (RQD)		90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%		>25%	
	امتیاز		۲۰	۱۷	۱۲	۸		۲	
۳	فاصلهٔ ناپیوستگی‌ها		2< (m)	0.6-2	0.2-0.6	0.06-0.2		<0.06	
	امتیاز		۲۰	۱۵	۱۰	۸		۵	
٤	وضعیت درزه‌ها		دارای سطح بسیار زبر غیر ممتد، بدون باز شدگی و بدون هوازدگی سطوح درزه	سطح درزه‌ها اندکی زبر عرض درزه‌ها کم‌تر از ۱mm سطوح درزه‌ها اندکی	سطح درزه‌ها اندکی زبر عرض درزه‌ها کم‌تر از ۱ mm، سطوح درزه‌ها شدیداً هوازده	سطح درزه‌ها صاف و صیقلی با ضخامت مواد پرکننده کمتر از ۵mm و با عرض درزه‌ها بین ۵ ـ ۱ mm		مواد پرکننده نرم با ضخامت کم‌تر از ۵mm یا پهنای دهانهٔ درزه‌ها بزرگ‌تر از ۵mm هستند	
	امتیاز		۳۰	۲۵	۲۰	۱۰		۰	
۵	آب زیرزمینی	جریان آب در ۱۰ متر از طول تونل	بدون جریان (لیتر بر دقیقه)	10<	10-25	25-125		>125	
		نسبت فشار آب در درزه بر تنش اصلی حداکثر	0	0.1<	0.1-0.2	0.2-5		>0.5	
		وضعیت عمومی	کاملاً خشک	تقریباً خشک	مرطوب	آب تراوش دارد		آب جریان دارد	
	امتیاز		۱۵	۱۰	۷	٤		۰	

رده بندی توده سنگ

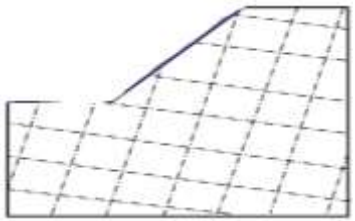
رده بندی ژئومکانیکی (RMR): امتیاز جهت گیری ناپیوستگی ها

امتداد و شیب		خیلی مناسب	مناسب	متوسط	نامناسب	خیلی نامناسب
امتیاز	تونل ها و معادن	۰	-۲	-۵	-۱۰	-۱۲
	فونداسیون (پی)	۰	-۲	-۷	-۱۵	-۲۵
	شیروانی ها	۰	-۵	-۲۵	-۵۰	-۶۰

امتداد عمود بر محور تونل				امتداد ناپیوستگی ها موازی محور تونل		زاویی شیب ۰°-۲۰° بدون توجه به امتداد تونل
زاویه شیب هم جهت با پیشروی		زاویه شیب خلاف جهت پیشروی				
زاویهٔ میل ۴۵°-۹۰°	زاویهٔ میل ۲۰°-۴۵°	زاویهٔ میل ۴۵°-۹۰°	زاویهٔ میل ۲۰°-۴۵°	زاویهٔ میل ۴۵°-۹۰°	زاویهٔ میل ۲۰°-۴۵°	
خیلی مناسب	مناسب	متوسط	نامناسب	خیلی نامناسب	متوسط	متوسط



شیروانی نامساعد



شیروانی مساعد

رده بندی توده سنگ

رده بندی ژئومکانیکی (RMR)

مجموع امتیاز بدست آمده و ردهٔ توده سنگ

Rating	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20
Class No.	I	II	III	IV	V
Description	VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR

معنی ردهٔ توده سنگ

Class No.	I	II	III	IV	V
Average stand-up time	10 years for 15 m span	6 months for 8 m span	1 week for 5 m span	10 hours for 2.5 m span	30 minutes for 1 m span
Cohesion of the rock mass	> 400 kPa	300 - 400 kPa	200 - 300 kPa	100 - 200 kPa	< 100 kPa
Friction angle of the rock mass	$< 45^{o}$	$35 - 45^{o}$	$25 - 35^{o}$	$15 - 25^{o}$	$< 15^{o}$

رده بندی توده سنگ

رده بندی ژئومکانیکی (RMR): راهنمای نگهداری تونل در روش RMR

Rock mass class	Excavation	Support		
		Rock bolts (20 mm diam., fully bonded)	*Shotcrete*	*Steel sets*
1. Very good rock RMR: 81-100	Full face: 3 m advance	Generally no support required except for occasional spot bolting		
2. Good rock RMR: 61-80	Full face: 1.0-1.5 m advance; Complete support 20 m from face	Locally bolts in crown, 3 m long, spaced 2.5 m with occasional wire mesh	50 mm in crown where required	None
3. Fair rock RMR: 41-60	Top heading and bench: 1.5-3 m advance in top heading; Commence support after each blast; Commence support 10 m from face	Systematic bolts 4 m long, spaced 1.5-2 m in crown and walls with wire mesh in crown	50-100 mm in crown, and 30 mm in sides	None
4. Poor rock RMR: 21-40	Top heading and bench: 1.0-1.5 m advance in top heading; Install support concurrently with excavation - 10 m from face	Systematic bolts 4-5 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh	100-150 mm in crown and 100 mm in sides	Light ribs spaced 1.5 m where required
5. Very poor rock RMR < 21	Multiple drifts: 0.5-1.5 m advance in top heading; Install support concurrently with excavation; shotcrete as soon as possible after blasting	Systematic bolts 5-6 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh. Bolt invert	150-200 mm in crown, 150 mm in sides, and 50 mm on face	Medium to heavy ribs spaced 0.75 m with steel lagging and forepoling if required. Close invert

الزامات استفاده از این دستورالعمل:

تونل نعل اسبی

عرض تونل کمتر از ۱۰ متر

تنش عمودی کمتر از ۲۵ مگاپاسکال

روش حفاری انفجار

رده بندی توده سنگ

رده بندی شاخص کیفیت تونل سازی (Q):

توسط بارتن (Barton) در نروژ ارائه شد که به رده بندی NGI نیز معروف است. این رده بندی برای طراحی سیستم نگهداری تونل ها بکار می رود. مقدار Q از ۰/۰۰۱ تا ۱۰۰۰ به صورت لگاریتمی تغییر می کند. در این رده بندی از ۶ پارامتر زیر استفاده شده است:

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

ساختار توده سنگ و ابعاد بلوک

مقاومت برشی درزه ها

تنش فعال

RQD– شاخص RQD توده سنگ

J_n– ضریب تعداد درزه ها

J_r– ضریب زبری درزه ها

J_a– ضریب دگرسانی درزه ها

SRF– ضریب کاهش تنش

در این روش نیز به ازای هر وضعیت از ۶ پارامتر یاد شده نمره یا امتیازی تعلق می گیرد که جزئیات آن در جداول مربوط قید شده است.

رده بندی توده سنگ

رده بندی شاخص کیفیت تونل سازی (Q):

مقادیر Q و کیفیت توده سنگ

Q-value and rock mass quality

Q-value	Class	Rock mass quality
400 ~ 1000	A	Exceptionally Good
100 ~ 400	A	Extremely Good
40 ~ 100	A	Very Good
10 ~ 40	B	Good
4 ~ 10	C	Fair
1 ~ 4	D	Poor
0.1 ~ 1	E	Very Poor
0.01 ~ 0.1	F	Extremely Poor
0.001 ~ 0.01	G	Exceptionally Poor

رده بندی توده سنگ

رده بندی شاخص کیفیت تونل سازی (Q):

بارتن وهمکارانش پارامتر دیگری موسوم به بعد معادل (Equivalent Dimension) (DE) به شرح زیر تعریف کردند:

$$DE = \frac{\text{دهانه ، ارتفاع و یا قطر تونل بر حسب متر}}{ESR \text{ نسبت نگهداری تونل}}$$

مقدار ESR به نحوهٔ استفاده از تونل و نیز اینکه تا چه درجه ای از ناپایداری تونل قابل قبول است، بستگی دارد.

Excavation category		*ESR*
A	Temporary mine openings.	3-5
B	Permanent mine openings, water tunnels for hydro power (excluding high pressure penstocks), pilot tunnels, drifts and headings for large excavations.	1.6
C	Storage rooms, water treatment plants, minor road and railway tunnels, surge chambers, access tunnels.	1.3
D	Power stations, major road and railway tunnels, civil defence chambers, portal intersections.	1.0
E	Underground nuclear power stations, railway stations, sports and public facilities, factories.	0.8

رده بندی توده سنگ

رده بندی شاخص کیفیت تونل سازی (Q):

با معلوم بودن شاخص Q و De و با مراجعه به نمودارهای مربوط می توان وضعیت نگهداری تونل را برآورد کرد.

طول راک بولت (L) مناسب با رابطه زیر تخمین زده می شود

$$L = 2 + \frac{0.15B}{ESR}$$

حداکثر دهانه پایدار تونل

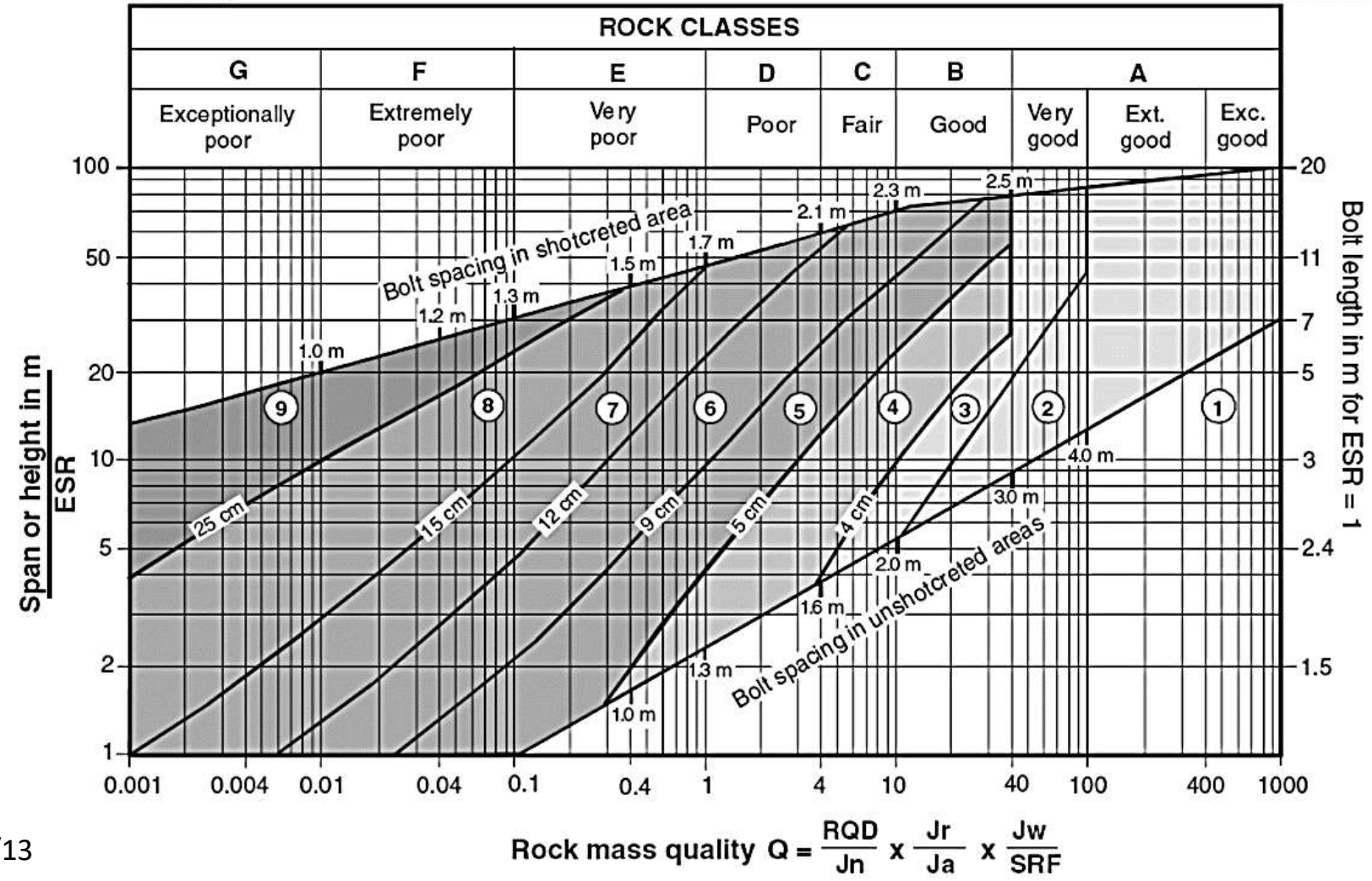
$$Maximum\ span\ (unsupported) = 2\,ESR\,Q^{0.4}$$

مقدار بار سقف که نگهداری باید تحمل کند

$$P_{roof} = \frac{2\sqrt{Jn}\,Q^{-\frac{1}{3}}}{3Jr}$$

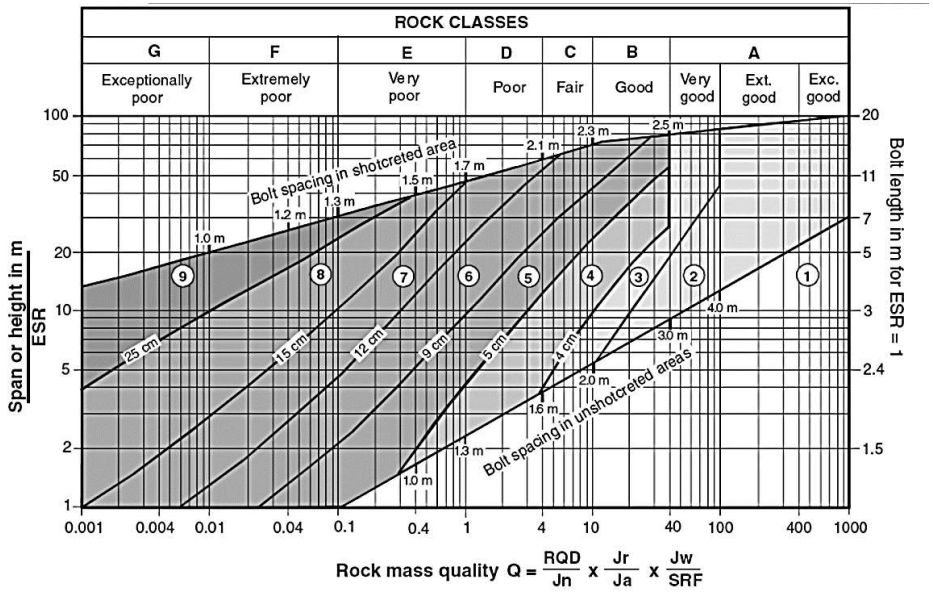
رده بندی توده سنگ

رده بندی شاخص کیفیت تونل سازی (Q): با معلوم بودن شاخص Q و De و با مراجعه به نمودارهای مربوط می توان وضعیت نگهداری تونل را برآورد کرد.



رده بندی توده سنگ

رده بندی شاخص کیفیت تونل سازی (Q): با معلوم بودن شاخص Q و De و با مراجعه به نمودارهای مربوط می توان وضعیت نگهداری تونل را برآورد کرد.



REINFORCEMENT CATEGORIES:

1) Unsupported
2) Spot bolting
3) Systematic bolting
4) Systematic bolting, (and unreinforced shotcrete, 4 - 10 cm)
5) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 5 - 9 cm
6) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 9 - 12 cm
7) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 12 - 15 cm
8) Fibre reinforced shotcrete, > 15 cm, reinforced ribs of shotcrete and bolting
9) Cast concrete lining

مقایسهٔ سیستم های مختلف رده بندی توده سنگ

متداول ترین سیستم ها، رده بندی RMR و Q هستند. این دو سیستم شباهت زیادی باهم دارند و اختلافات آنها اغلب مربوط به وزن آماری متفاوتی است که به پارامترها داده شده است.

– در RMR مقاومت فشاری سنگ مستقیماً دخالت دارد ولی در Q اینطور نیست و مقاومت برجای توده سنگ بطور غیر مستقیم وارد شده است.

– پارامتر تنش در رده بندی Q وجود دارد ولی در رده بندی RMR در نظر گرفته نشده است.

برای تبدیل مقادیر عددی دو سیستم به هم رابطه ای توسط بنیاوسکی ارائه شده است:

$$RMR = 9 \ln Q + 24$$

از بذل توجه شما سپاسگذارم