نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی
Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)
tuse.shahroodut.ac.ir
دوره‌ی ۹- شماره‌ی۲/تابستان ۱۳۹۹

بازنگری کارایی شاخص کیفی سنگ (*RQD*) در سیستم رده‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ (مطالعه موردی تونل البرز)

پژوهشی

حامد فرج الهی[۱]؛ محمدحسین خسروی[۲*]؛ محمد محمدی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد؛ دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، *h.farajollahi@ut.ac.ir*

۲- استادیار؛ دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، *mh.khosravi@ut.ac.ir*

۳- دانشجوی دکتری؛ موسسه فناوری سلطنتی *KTH*، استکهلم، سوئد، *mohammadisalmasi@gmail.com*

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۸/۱۰/۰۹؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۹/۰۴/۲۵

شماره صفحات: ۱۳۷ تا ۱۴۸

شناسه دیجیتال (*DOI*): *10.22044/tuse.2020.9245.1384*

واژگان کلیدی

سیستم رده‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ (*RMR*)

شاخص کیفی سنگ (*RQD*)

فاصله‌داری شکستگی‌ها (*FS*)

تناوب شکستگی (*FF*)

تونل البرز

چکیده

سیستم‌های رده‌بندی توده‌سنگ به‌عنوان بخش اصلی روش‌های تجربی طراحی نقشی کلیدی در صنعت تونلسازی بازی می‌کنند. سیستم رده‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ (*RMR*)، به‌عنوان یکی از رایج‌ترین سیستم‌ها در سال ۱۹۷۳ توسط بنیاوسکی ارایه و پس از بکارگیری در شرایط مختلف، توسط محققان توسعه داده شد. به دلیل حساسیت بالا در توصیف درست از رفتار توده‌سنگ، نیاز به بررسی دقیق‌تر پارامترهای ورودی این سیستم‌ها احساس می‌شود. در سال‌های اخیر، بررسی کارایی *RQD* یکی از موضوعات مهم مورد بحث است. به دلیل نواقص عنوان شده برای *RQD* و همچنین هم‌پوشانی آن با پارامتر فاصله‌داری شکستگی‌ها (*FS*)، استفاده از پارامتر تناوب شکستگی (*FF*)، به‌عنوان جایگزین مطرح شده است. بر اساس این پارامتر در سال ۲۰۱۳، نسخه جدیدی از *RMR* تحت عنوان *RMR13* ارایه شد. در این مقاله به بررسی کارایی پارامتر *FF* و مقایسه نتایج استفاده از آن در *RMR13* با نتایج *RMR89*، بر اساس بخشی از داده‌های تونل البرز در آزادراه تهران- شمال پرداخته شده است. اختلاف نتایج به‌دست آمده برای دو روش حدود ۲ درصد است که با توجه به ماهیت تجربی *RMR*، نشانگر نتایج قابل قبول برای روش *RMR13* است؛ بنابراین با توجه به ایرادات مطرح شده برای *RQD*، استفاده از *RMR13* در پروژه‌های جدید پیشنهاد می‌شود که برخلاف پروژه‌های قدیمی، تاریخچه مطالعات آن‌ها بر اساس *RQD* نیست.

۱- پیش‌گفتار

با ملاحظه سه روش اصلی برای طراحی حفاری در سنگ، یعنی روش‌های تحلیلی (شامل روش‌های عددی، مدل‌سازی‌های فیزیکی، شبیه‌سازی و ...)، مشاهده‌ای (بر اساس پایش حرکات واقعی زمین) و تجربی (بر اساس نتایج پروژه‌های انجام شده) که در پروژه‌های معدنی و عمرانی بکار گرفته می‌شوند، شکل امروزی رده‌بندی‌های توده‌سنگ، به‌عنوان بخش مهمی از روش بسیار رایج در تونل‌سازی، یعنی روش‌های تجربی را تشکیل می‌دهد. با این‌حال این رده‌بندی‌ها به‌عنوان جایگزین برای روش‌های تحلیلی یا مشاهدات صحرایی یا اندازه‌گیری‌ها و قضاوت مهندسی نیستند (*Bieniawski, 1989*).

* تهران: تقاطع خیابان کارگر شمالی و اتوبان شهید گمنام (چهارراه امیر آباد)؛ روبروی کوچه نهم؛ ساختمان شماره ۲؛ پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران؛ دانشکده مهندسی معدن؛ کدپستی: ۱۴۳۹۹۵۷۱۳۱؛ شماره‌ی تلفن: ۸۲۰۸۴۳۹۸-۰۲۱؛ دورنگار: ۸۸۰۰۸۸۳۸-۰۲۱

سیستم رده‌بندی بار ترزاقی، اولین سیستم ارایه شده بود که بطور موفقیت‌آمیز برای تونل‌های دارای سیستم نگهداری قاب فلزی استفاده می‌شد (*Terzaghi, 1946*). سیستم رده‌بندی لافر بر پایه کارهای استینی در سال ۱۹۵۰، با معرفی مفهوم زمان خودایستایی دهانه فعال در تونل پرداخت (*Lauffer, 1958*). دییر و همکارانش، شاخص کیفی سنگ (*RQD*) را معرفی کردند که یک روش ساده و عملی برای توصیف کیفیت مغزه گرفته شده از سنگ در چال‌ها بود (*Deere, et al., 1966*). مفهوم رده‌بندی ساختاری سنگ *RSR* (*Rock Structure Rating*) توسط ویکهام و همکارانش در ایالات متحده در سال‌های ۱۹۷۲ و ۱۹۷۴ توسعه داده شد (*Wickham & Tiedemann, 1974*) و اولین سیستمی بود که اهمیت وزنی پارامترهای مورد استفاده در رده‌بندی توده‌سنگ را در نظر گرفت.

رده‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ (*RMR*) توسط بنیاوسکی (*Bieniawski, 1973*) و سیستم *Q* توسط بارتون و همکارانش (*Barton, et al., 1974*) ارایه شدند که بطور مستقل توسعه یافتند و هر دو از داده‌های کمّی برای اندازه‌گیری مقاوم‌سازی مدرن تونل مثل، شاتکریت و پیچ‌سنگ استفاده می‌کنند.

از جمله سیستم‌های توسعه یافته بر مبنای سیستم *RMR*، می‌توان به سیستم رده‌بندی معدنی توده‌سنگ *MRMR* (*Mining Rock Mass Rating*) که با در نظر گرفتن تعدیل‌های متناسب با کاربرد سیستم، توسط لابشر ارایه شده است (*Laubscher, 1990*)، سیستم رده‌بندی کیفی توده‌سنگ *RMQR* (*Rock Mass Quality Rating*) که با هدف توصیف خصوصیات ژئومکانیکی توده‌سنگ توسط آیدان و همکارانش ارایه شده است (*Aydan et al., 2014*)، سیستم *W-RMR* که با هدف رده‌بندی توده‌سنگ‌های ضعیف و هوازده با استفاده از ارتباط بین سیستم رده‌بندی خاک و سیستم *RMR* توسط وارن و همکارانش ارئه شد (*Warren, et al., 2016*) و سیستم رده‌بندی توده‌سنگ‌های ناهمسانگرد *ARMR* (*Anisotropic Rock Mass Rating*) که با در نظر گرفتن ناهمسانگردی‌های ذاتی و ساختاری در توده‌سنگ توسط سار اوقلو و همکارانش ارایه شده است، نام برد (*Saroglou, et al., 2019*).

تمرکز زیاد روی سیستم‌های رده‌بندی توده‌سنگ موجب شده است تا حساسیت روی انتخاب پارامترهای ورودی این سیستم‌ها نیز بالا برود. در این مقاله سعی شده است تا به بررسی دو مورد از شش پارامتر ورودی سیستم رده‌بندی *RMR* (فاصله‌داری درزه‌ها و شاخص کیفی سنگ *RQD*) و مقایسه نتایج استفاده از پارامتر جایگزین مطرح شده برای آن‌ها، تحت عنوان پارامتر تناوب شکستگی پرداخته شود. همچنین نسخه بروز شده‌ای از *RMR*، توسط کلادا در سال ۲۰۱۴ مطرح شده (*Celada, et al., 2014*) و نتایج مدل‌سازی عددی برای آن با نتایج *RMR89* با استفاده از مدل‌سازی عددی توسط کانیک مقایسه شده است (*Kanik, et al., 2015*).

۲- سیستم رده‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ (*RMR*)

سیستم امتیازدهی توده‌سنگ (*RMR*) یا به عبارت دیگر، رده‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ در سال‌های ۱۹۷۲ الی ۱۹۷۳ توسط بنیاوسکی توسعه داده شد و پس از تغییرات اعمالی توسط محققان مختلف در سال ۱۹۸۹ توسط بنیاوسکی بصورت نسخه نهایی معرفی گردید. این سیستم در طول سال‌های بعدی با اطلاعات در دسترس از تاریخچه پروژهای اجرا شده اصلاح گردید تا مورد تایید استانداردها و راهکارهای بین‌المللی باشد.

شش پارامتر مقاومت فشاری تک محوره سنگ، شرایط ناپیوستگی‌ها، شاخص کیفی سنگ (*RQD*)، فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها، شرایط آب زیرزمینی و جهت‌گیری ناپیوستگی‌ها به‌منظور رده‌بندی توده‌سنگ در سیستم *RMR* استفاده می‌شود.

جهت اعمال سیستم رده‌بندی ژئومکانیکی، توده‌سنگ به تعدادی منطقه ساختاری تقسیم می‌شود که این مناطق مشخص دارای یکپارچگی کم و زیاد داخل خود هستند. اگرچه سنگ در طبیعت ناپیوسته است، اما با این اوصاف در مناطقی که به‌عنوان مثال سنگ یکپارچه است یا فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها در سرتاسر بخش مشابه است، آن منطقه را می‌توان یکپارچه در نظر گرفت. پس از شناخته شدن مناطق و بخش‌های ساختاری، پارامترهای رده‌بندی برای هر کدام از بخش‌ها با استفاده از اندازه‌گیری‌های انجام شده برجا محاسبه می‌شوند (*Bieniawski, 1989*).

جزییات امتیازدهی در سیستم رده‌بندی *RMR* در **جدول ۱** نشان داده شده است که بر اساس آن، پنج پارامتر در پنج بازه امتیازی گروه‌بندی می‌شود. به‌دلیل اینکه پارامترهای مختلف اهمیت یکسانی در امتیازدهی رده‌بندی ندارند، سهم امتیاز تخصیص یافته برای هر پارامتر، متناسب با میزان اهمیت آن است. در هر پارامتر، امتیاز بالاتر نشان‌دهنده شرایط بهتر برای سنگ است..

جدول ۱- جزئیات امتیازدهی پارامترهای سیستم رده‌بندی توده‌سنگ *RMR* (*Bieniawski, 1989*)

	پارامتر		محدوده مقادیر				
۱	مقاومت توده‌سنگ بکر *(MPa)*	شاخص مقاومت بار نقطه‌ای	>۸	۸-۴	۴-۲	۲-۱	برای این محدوده، مقاومت فشاری تک‌محوره ترجیح داده می‌شود
		مقاومت فشاری تک‌محوره	>۲۰۰	۲۰۰-۱۰۰	۱۰۰-۵۰	۵۰-۲۵	۲۵-۱۰	۱۰-۳	۳-۱
		امتیاز	۱۵	۱۲	۷	۴	۲	۱	۰
۲	***RQD*** (٪)		۱۰۰-۹۰	۹۰-۷۵	۷۵-۵۰	۵۰-۲۵		< ۲۵	
	امتیاز		۲۰	۱۷	۱۳	۸		۵	
۳	فاصله‌داری درزه‌ها (متر)		>۳	۳-۱	۱-۰/۳	۰/۳-۰/۰۵		< ۰/۰۵	
	امتیاز		۳۰	۲۵	۲۰	۱۰		۵	
۴	وضعیت ناپیوستگی‌ها		سطوح خیلی زبر، غیر ممتد، جدا نشده، دیواره درزه‌ها سخت	سطوح کمی زبر، جدایی دیواره کمتر از *۱mm*، درزه‌ها سخت	سطوح کمی زبر، جدایی دیواره کمتر از *۱mm*، درزه‌ها نرم	سطوح آینه‌ای، یا مواد پرکننده ضخامت کمتر از *۵mm*، بازشدگی *mm* ۵-۱ درزه‌های ممتد		ضخامت مواد پرکننده نرم بیش از *۵mm* و بازشدگی بیش از *۵mm* درزه‌های ممتد	
	امتیاز		۲۵	۲۰	۱۲	۶		۰	
۵	آب زیرزمینی		جریان آب در ۱۰متر طول تونل	بدون آب	< ۲۵ $\frac{lit}{min}$	۲۵-۱۲۵ $\frac{lit}{min}$		> ۱۲۵ $\frac{lit}{min}$	
			یا نسبت فشار در درزه به تنش اصلی بزرگ‌تر	یا ۰	یا ۰-۰/۲	یا ۰/۲-۰/۵		یا > ۰/۵	
			شرایط عمومی	کاملا خشک	فقط مرطوب	آب تحت فشار متوسط		مشکلات فراوان در اثر آب	
	امتیاز			۱۰	۷	۴		۰	

پس از اینکه امتیازدهی وزنی برای پارامترهای رده‌بندی در نظر گرفته شد، امتیازها با هم جمع می‌شود تا *RMR* پایه‌ای (بدون در نظر گرفتن جهت‌گیری ناپیوستگی‌ها) برای منطقه مدنظر به‌دست آید و در گام بعدی پارامتر مربوط به شیب و امتداد ناپیوستگی که در **جدول ۲** ارایه شده است، به *RMR* پایه‌ای افزوده می‌شود. این گام به‌صورت جداگانه عمل می‌کند، چرا که جهت‌گیری ناپیوستگی‌ها به عملیات مهندسی بستگی دارد.

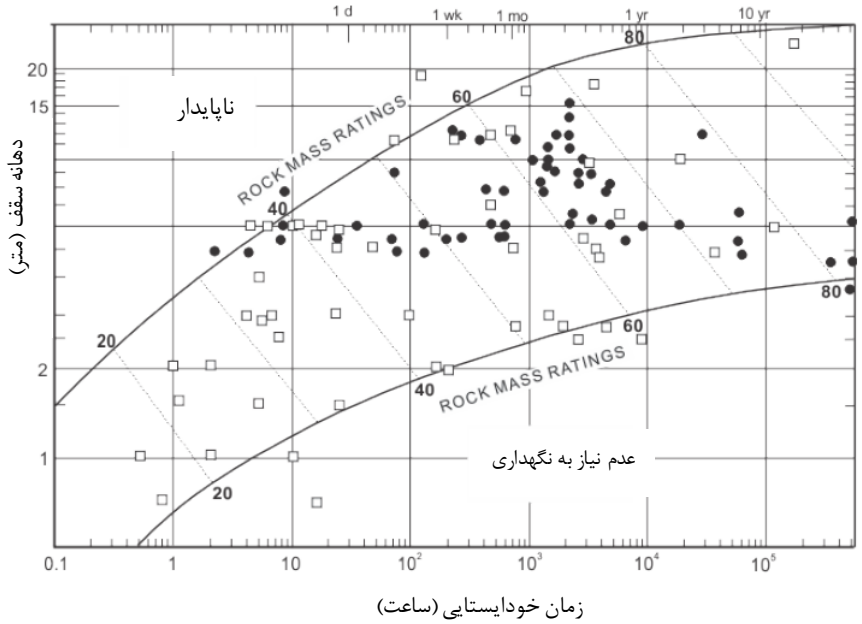
پس از اعمال جهت‌گیری ناپیوستگی، توده‌سنگ مطابق آنچه که در **جدول ۳**، آورده شده است، رده‌بندی می‌شود که *RMR* نهایی را در پنج گروه دسته‌بندی کرده است. امتیازبندی برای پنج گروه با محدوده‌های ۲۰ امتیازی از امتیاز ۰ تا ۱۰۰ انجام می‌شود (*Bieniawski, 1989*) خروجی سیستم رده‌بندی ژئومکانیکی برای موارد مطالعاتی تونل، اتاق‌ها و معادن تحت عنوان زمان خودایستایی و حداکثر دهانه پایدار تونل بر اساس *RMR* مطابق **شکل ۱** به‌دست آمده‌اند (*Bieniawski, 1989*). همچنین سیستم‌های مبتنی بر *RMR* نزدیک‌ترین تخمین به برداشت‌های میدانی را در برآورد بار سنگ به‌دست می‌دهند (*Jalali & Beik, 2018*).

جدول ۲- تعدیل امتیاز مربوط به جهت‌گیری ناپیوستگی‌ها در *RMR* بر اساس پروژه اجرایی (*Bieniawski, 1989*)

راستا و جهت درزه‌ها	خیلی مساعد	مساعد	مناسب	نامساعد	خیلی نامساعد
تونل‌ها	۰	-۲	-۵	-۱۰	-۱۲
پی‌ها	۰	-۲	-۷	-۱۵	-۲۵
شیروانی‌ها	۰	-۵	-۲۵	-۵۰	-۶۰

جدول ۳ – رده‌بندی کیفی توده‌سنگ بر اساس امتیاز کلی توده‌سنگ در سیستم *RMR* (*Bieniawski, 1989*)

RMR	۱۰۰-۸۱	۸۰-۶۱	۶۰-۴۱	۴۰-۲۱	< ۲۰
شماره رده	*I*	*II*	*III*	*IV*	*V*
توصیف	خیلی خوب	خوب	مناسب	ضعیف	خیلی ضعیف



شکل ۱ – زمان خودایستایی و دهانه تونل بر اساس سیستم رده‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ *RMR* (خطوط رسم شده محدوده‌های کاربرد را نشان می‌دهد) (*Bieniawski, 1989*)

۳- بازنگری در استفاده از شاخص کیفی توده‌سنگ *RQD*

بررسی دقیق‌تر پارامترهای ورودی سیستم‌های رده‌بندی پرکاربرد، منجر به مطرح شدن مباحث جدیدی مانند، پیشنهاد جایگزینی پارامتر تناوب شکستگی بجای ترکیب پارامترهای *RQD* و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها *FS* (*Fracture Spacing*)، توسط لاوسن و بنیاوسکی در سال ۲۰۱۳ شده است (*Lowson & Bieniawski, 2013*). همگام با همین موضوع، در سال ۲۰۱۷ پلز و همکارانش با بررسی نواقص و کمبودهای *RQD*، بحث لزوم استفاده و یا عدم استفاده از این پارامتر را مطرح کردند (*Pells, et al., 2017*). در ادامه این مقاله بررسی کارایی *RQD* در سیستم *RMR* بر اساس بخشی از داده‌های تونل البرز واقع در آزادراه تهران-شمال پرداخته شده است.

۳-۱- مزایا و معایب استفاده از شاخص کیفی سنگ *RQD*

پارامتر *RQD* به‌عنوان یک شاخص عددی، بر اساس میزان بازیابی مغزه گرفته شده تعریف می‌شود، بطوریکه مجموع طول قطعات مساوی یا بزرگتر از ۱۰ سانتی‌متر را در طول یک متر مغزه گرفته شده، در نظر می‌گیرد. این پارامتر، با اینکه بیش از ۵۰ سال به‌عنوان یکی از ورودی‌ها در بسیاری از سیستم‌های رده‌بندی توده‌سنگ مورد استفاده قرار گرفته است، دارای برخی نواقص و مشکلات عملیاتی است، این شاخص خصوصیات بازشدگی درزه‌ها، جهت‌گیری، پیوستگی و پرشدگی درزه‌ها را در نظر نمی‌گیرد.

در طول بیش از ۴۰ سال که از ارایه سیستم رده‌بندی توده‌سنگ می‌گذرد، پارامتر *RQD* بطور گسترده در سرتاسر جهان مورد استفاده قرار گرفته است، اما چندین تحقیق انجام شده در این مدت به موضوع غیرمطمئن بودن مفهوم *RQD* پرداخته‌اند. به‌عنوان مثال، پالمستروم با ارایه چند مثال نظری به وابسته بودن مقدار *RQD* به جهت چال پرداخت و همچنین بیان داشت که *RQD* ممکن است، در محاسبه درجه خردشدگی سنگ دچار خطا شود، چرا که قطعات زیر ۱۰ سانتی‌متر را در نظر نمی‌گیرد (*Palmstrom, 2005*). لاوسون و بنیاوسکی استفاده از پارامتر تناوب شکستگی را بجای پارامترهای فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها و *RQD* توصیه کردند (*Lowson & Bieniawski, 2013*). در سال ۲۰۱۷ پلز و همکارانش، لیستی از ضعف‌ها و محدودیت‌های *RQD* را ارایه دادند و بیان داشتند که استفاده از *RQD* همراه با خطا و وابسته به استفاده‌کننده و سلیقه‌ای است و دخالت دادن آن در سیستم رده‌بندی توده‌سنگ ضرورتی ندارد (*Pells, et al., 2017*).

در مقابل برخی نیز طرفداران استفاده از شاخص *RQD* هستند و بر این باورند که دلایل کافی برای عدم استفاده از *RQD* اثبات نشده است (*Koutsoftas, 2018*). تعدادی نیز معتقدند که تاریخچه استفاده از این شاخص ارزشمند است و بر این باور هستند که توقف استفاده از آن باعث می‌شود، داده‌های بیش از ۵۰ سال استفاده از *RQD* و همچنین سیستم‌های رده‌بندی‌ای از دست بروند که وابسته به آن هستند (*Chen & Yin, 2019*).

۳-۲- استفاده از گراف در تعیین امتیاز پارامترهای *RQD* و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها

یکی از اشتباهات رایج در استفاده از سیستم رده‌بندی توده‌سنگ، تعیین نادرست پارامترهای دخیل در سیستم رده‌بندی است. بطور مرسوم از جدول‌های ارایه شده توسط بنیاوسکی در سال ۱۹۸۹ استفاده می‌شود. با این‌حال برخی از استفاده‌کنندگان به این نکته توجه نمی‌کنند که مقادیر ارایه شده در این جدول، مقدار متوسط هستند نه کمترین مقدار (*Lowson & Bieniawski, 2013*).

برای افزایش دقت و بهبود تصمیم‌گیری، استفاده از گراف‌های ارایه شده توصیه شده است که مقادیر پارامترها را بطور پیوسته نشان می‌دهند (*Lowson & Bieniawski, 2013*). گراف‌های مربوط به تعیین امتیاز پارامترهای *FS* و *RQD* در **شکل ۲** آمده است.

به این ترتیب جهت به‌دست آوردن امتیاز مربوط به پارامترهای فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها و شاخص *RQD* به‌عنوان دو مورد از پارامترهای ورودی سیستم رده‌بندی *RMR*، می‌توان از معادله‌های زیر استفاده کرد که بر اساس گراف‌های **شکل ۲** به‌دست آمده‌اند.

معادله مربوط به محاسبه امتیاز پارامتر فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها (*FS*) بر اساس گراف بالایی در **شکل ۲** بصورت زیر با تقریب بالا ($R^2=0.9812$) به‌دست می‌آید:

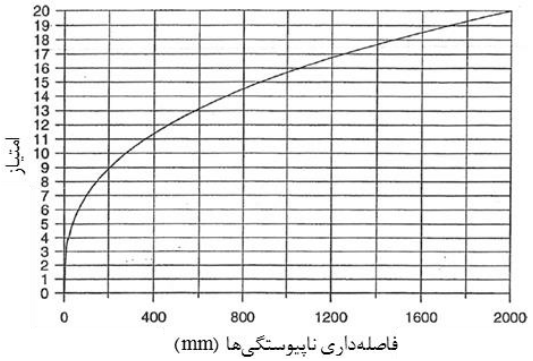
$$R_{FS} = 1.1496 \times FS^{0.3791} \quad (۱)$$

که در آن فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها بین ۰ تا ۲۰۰۰ میلی‌متر و امتیاز مربوط به این پارامتر بین ۰ تا ۲۰ متغیر است.

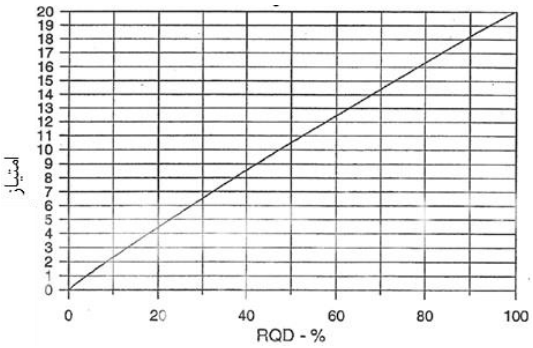
معادله مربوط به محاسبه امتیاز پارامتر *RQD* بر اساس گراف پایینی، در **شکل ۲** بصورت رابطه (۲) قابل محاسبه است:

$$R_{RQD} = 0.2 \times RQD \quad (۲)$$

که در آن شاخص *RQD* از ۰ تا ۱۰۰ و امتیاز مربوط به این پارامتر از ۰ تا ۲۰ متغیر است.



الف- امتیازدهی بر اساس پارامتر *FS*

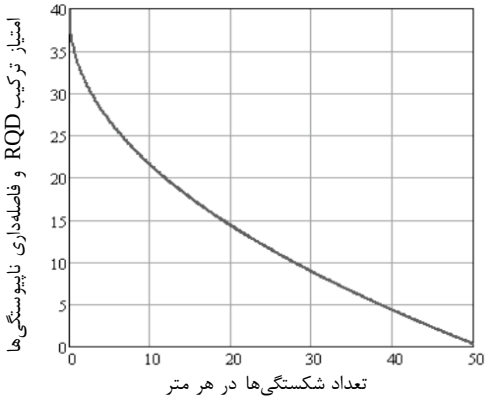


ب- امتیازدهی بر اساس پارامتر *RQD*

شکل ۲ - گراف‌های ارایه شده برای امتیازدهی به پارامترهای *FS* و *RQD* در سیستم رده‌بندی *RMR*
(***Bieniawski, 1989***)

۳-۳- پارامتر جایگزین برای شاخص *RQD* و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها

به دلیل اینکه موارد مطالعاتی در سال ۱۹۷۲ همگی شامل پارامتر *RQD* بودند، این پارامتر از ابتدا به‌عنوان یکی از شش پارامتر اصلی در *RMR* معرفی شد. پس از گذشت سال‌ها مشخص شد که تعیین پارامتر *RQD* از روی سطح توده‌سنگ ساختگاه تونل دشوار است، بنابراین برای محاسبه آن از شناسایی و توصیف چال‌ها استفاده شد (*Lowson & Bieniawski, 2013*). سپس به دلیل درهم‌تنیدگی *RQD* با پارامتر فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها، این دو باهم ترکیب شد که چگالی فاصله‌داری نام گرفت. برای استفاده عملی بهتر، پیشنهاد شد که از تناوب شکستگی *FF (Fracture Frequency)*، به‌عنوان معکوس پارامتر چگالی شکستگی، استفاده شود که در نمودار **شکل ۳** بصورت تعداد شکستگی در هر متر نشان داده شده است. هیچ‌کدام از این روش‌ها، مقادیر تخصیص یافته اولیه برای پارامترها را تغییر نمی‌دهند (*Lowson & Bieniawski, 2013*). رابطه بین پارامتر تعداد شکستگی‌ها در هر متر و ترکیب امتیاز پارامتر *RQD* و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها در نمودار **شکل ۳** آورده شده است. امتیاز *RMR* بر اساس استفاده از پارامتر تناوب شکستگی، تحت عنوان *RMR13* شناخته می‌شود.



شکل ۳ – امتیازدهی ترکیبی برای پارامترهای چگالی شکستگی (*RQD* بعلاوه فاصله‌درای ناپیوستگی‌ها)
(*Lowson & Bieniawski, 2013*)

جهت محاسبه *RMR13* باید امتیاز مربوط به پارامتر تناوب شکستگی (*FF*) به‌دست آید، به همین منظور با استفاده از گراف **شکل ۳** که همبستگی این پارامتر را با امتیاز ترکیبی *RQD* و *FS* نشان می‌دهد، معادله مربوط به امتیاز پارامتر *FF* بصورت رابطه ارایه شده توسط چن و یین

برای محاسبه امتیاز پارامتر FF بصورت رابطه (۳) است (*Chen & Yin, 2019*):

$$R_{FF} = 64.18395 - 15.74461 * ln(FF + 4.76285) \quad (۳)$$

که در آن FF به‌عنوان معکوس تعداد شکستگی‌ها در هر متر تعریف می‌شود. مقادیر به‌دست آمده از معادله (۳) هم ارز با مجموع امتیاز به‌دست آمده برای پارامترهای شاخص *RQD* و فاصله‌داری درزه‌ها هستند که از معادله‌های (۱) و (۲) به دست می‌آیند؛ بنابراین برای محاسبه امتیاز رده‌بندی توده‌سنگ بر اساس *RMR13*، امتیاز پارامتر FF به جای مجموع امتیازهای *RQD* و *FS* در کنار چهار پارامتر دیگر در سیستم رده‌بندی *RMR* قرار می‌گیرد.

۴-۳- استفاده یا عدم استفاده از *RQD*

از آنجایی که کمبودها، میزان دقت و کارایی پارامترهای مورد استفاده در سیستم‌های رده‌بندی توده‌سنگ به‌طور مستقیم در کیفیت تحلیل رفتار توده‌سنگ تاثیرگذار است، توجه بیشتر و بررسی بهتر آن‌ها سودمند خواهد بود. همانطور که گفته شد، برخی موافق با استفاده از شاخص *RQD* و برخی محققان مخالف این کاربرد هستند. پلز و همکارانش در سال ۲۰۱۷، با توجه به محدودیت‌های ذاتی *RQD* و تعاریف متفاوت از این شاخص و بنا بر دلایل زیر عنوان کردند که بهتر است *RQD* از سیستم رده‌بندی توده‌سنگ کنار گذاشته شود (*Pells, et al., 2017*):

- تعریف *RQD* در مناطق مختلف دنیا متفاوت است و در خیلی از کشورها این تعریف با نسخه اصلی ارایه شده توسط دیبر هماهنگ نیست.
- اغلب سیستم‌های رده‌بندی اصلی (*RMR*، *Q*، *GSI* و *MRMR*) به شاخص *RQD* وابسته هستند که از روی ظواهر محاسبه می‌شود و همراه با خطا و به سلیقه کاربر به‌دست می‌آید.
- محدودیت‌های ذاتی *RQD* توسط ارایه‌دهندگان سیستم‌های *RMR* و *MRMR* نیز مطرح شده است و پیشنهاد جایگزینی تناوب شکستگی به جای *RQD* را داده‌اند.

با توجه به مباحث مطرح شده در مورد شاخص کیفی سنگ و پارامتر جایگزین ارایه شده، در ادامه این مقاله برای بررسی تاثیر حضور یا عدم حضور *RQD* در سیستم رده‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ و مقایسه نتایج، از داده‌های پروژه واقعی استفاده شده است.

۴- بررسی نتایج استفاده از پارامتر تناوب شکستگی بر اساس داده‌های واقعی

به‌منظور بررسی کارایی پارامتر تناوب شکستگی بجای ترکیب *RQD* و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها و همچنین مقایسه نتایج سیستم *RMR* برای نسخه‌های ۱۹۸۹ و ۲۰۱۳ در این مقاله از داده‌های مربوط به بخشی از تونل البرز واقع روی آزادراه تهران-شمال استفاده شده است.

۴-۱- مورد مطالعاتی (تونل البرز)

مجموعه تونل‌های البرز واقع در منطقه دو آزادراه تهران-شمال با طول تقریبی ۶۴۰۰ متر، طویل‌ترین مجموعه تونلی در این آزادراه هستند که به منظور عبور از ارتفاعات البرز مرکزی طراحی شده‌اند. تونل شرقی البرز با عرض ۱۳/۷۱ متر و ارتفاع ۱۱/۵۷ متر است (*Nozari et al., 2016*). این تونل با دو سینه‌کار از دهانه‌های شمالی و جنوبی حفر می‌شد که در پاییز سال ۱۳۹۷ به هم رسیدند. بطور معمول پس از هر پیشروی که به صورت چالزنی و انفجار انجام می‌گرفته، برداشت‌های دسته‌درزه‌ها و سایر خصوصیات توده‌سنگ از دیواره و سینه‌کار تونل انجام شده است. رده‌بندی توده‌سنگ اطراف تونل البرز بر اساس *RMR89*، صورت گرفته است. نوع ناپایداری مورد انتظار و سیستم نگهداری پیشنهادی بر اساس توصیف اولیه‌ای از رفتار توده‌سنگ با استفاده از روش گراف‌های چندگانه *GDE* (*Geo Data Engineering*) تعیین شده است. این روش بر اساس ویژگی‌های ساختاری و مقاومتی توده‌سنگ، شرایط پروژه و سیستم رده‌بندی *RMR*، توده‌سنگ اطراف تونل حفر شده را در کلاس‌های مختلف رفتاری دسته‌بندی می‌کند (*Russo, 2014*).

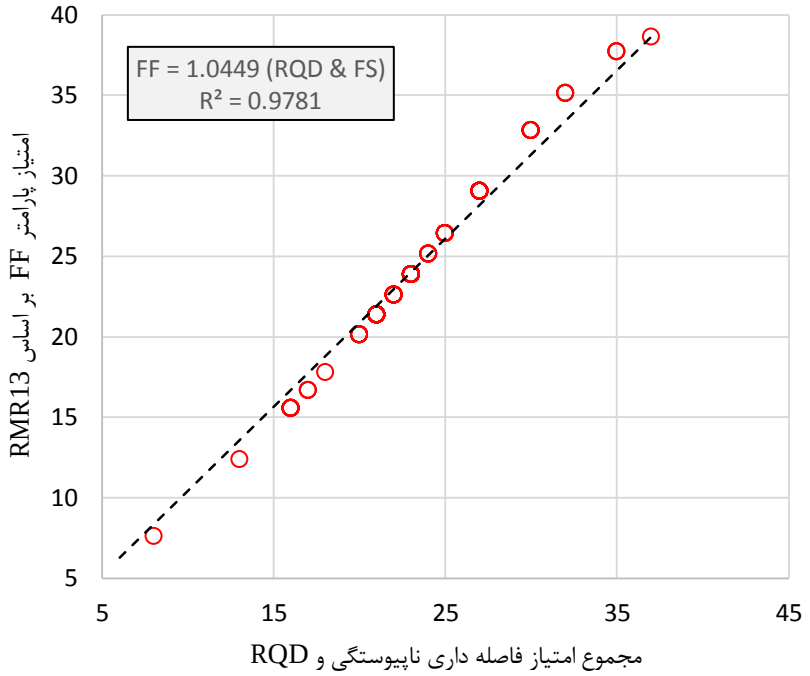
قسمتی از داده‌های تونل البرز به طول تقریبی ۲۰۰۰ متر از دهانه جنوبی جهت بررسی نتایج جایگزینی پارامتر تناوب شکستگی بجای *RQD* و *FS* انتخاب شده و مورد بررسی قرار گرفت. خلاصه‌ای از مشخصات داده‌های مربوط به تونل در **جدول ۴** آمده است. لازم به ذکر است، داده‌های مشابه در نظر گرفته نشده‌اند.

جدول ۴ – مشخصات قسمتی از داده‌های مربوط به درزه‌داری تونل البرز از دهانه جنوبی

تعداد ناحیه	متراژ از دهانه جنوبی (متر)	بازه امتیاز ***RQD***	بازه امتیاز فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها	بازه تغییرات مجموع امتیاز ***RQD*** و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها	امتیاز ***RMR89*** کمترین مقدار	امتیاز ***RMR89*** بیشترین مقدار
۱۹۴	۷۰-۲۰۶۷	۳-۲۰	۵-۲۰	۸-۳۷	۲۱	۷۶

۴-۲- نتایج به‌دست آمده روی داده‌های تونل البرز

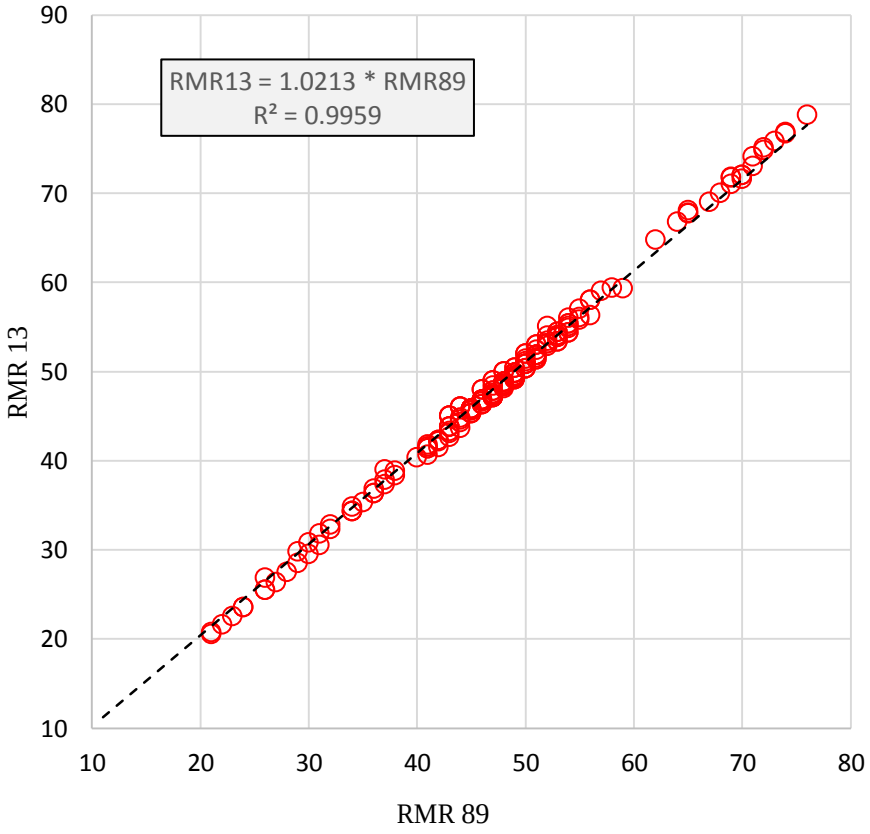
پس از برآورد مقدار پارامتر *FF* و محاسبه امتیاز آن با استفاده از نمودار **شکل ۳** و معادله (۳)، نتایج برای ۱۹۴ مورد از ترکیب‌های ساختاری توده‌سنگ تونل البرز به‌دست آمدند. از طرف دیگر، امتیاز مربوط به پارامترهای فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها و *RQD* بر اساس گراف‌های **شکل ۲** و معادله‌های (۱) و (۲) به‌دست آمده است. مقایسه امتیاز ترکیبی *RQD* و *FS* با امتیاز پارامتر *FF* بصورت نمودار **شکل ۴**، آورده شده است. همانطور که در این نمودار مشخص است، مجموع امتیاز پارامترهای *RQD* و *FS*، برای داده‌های مورد بررسی، همبستگی بالایی با امتیاز *FF* دارد. این همبستگی در محدوده امتیازی ۲۰ تا ۳۰، بیشتر از محدوده‌های دیگر است، بطوری‌که در محدوده بالاتر از ۳۰، مقادیر *FF* بالاتر و در محدوده پایین‌تر از ۲۰، مقادیر *FF* کمتر از مجموع امتیازی *FS* و *RQD* تخمین زده شده است.



شکل ۴ – مقایسه مجموع امتیازهای *RQD* و *FS* در سیستم *RMR89* با امتیاز پارامتر *FF* در سیستم *RMR13* بر اساس داده‌های طول تقریبی ۲ کیلومتر از تونل البرز

با جایگزینی مقادیر امتیاز *FF* بجای مجموع امتیاز *RQD* و *FS* در *RMR89*، امتیاز کلی رده‌بندی توده‌سنگ بر اساس سیستم *RMR13* به‌دست آمده است که مقایسه مقادیر به‌دست آمده بر اساس *RMR13* با مقادیر به‌دست آمده بر اساس *RMR89*، در **شکل ۵** آورده شده است. مطابق با این نمودار و بر اساس

داده‌های مورد استفاده، مقادیر به‌دست آمده برای *RMR13* در تمام محدوده امتیازی (امتیاز *RMR* بین ۲۰ و ۸۰)، بسیار نزدیک به مقادیر *RMR89* هستند و همبستگی خیلی خوبی با یکدیگر دارند. البته با توجه به معادله خط برازش داده شده روی داده‌های نمودار، در کل امتیاز به‌دست آمده برای *RMR13* در مقایسه با امتیاز *RMR89* حدود ۲ درصد بالاتر است.



شکل ۵ – نتایج به‌دست آمده برای *RMR13* در مقایسه با *RMR89* بر اساس داده‌های طول تقریبی ۲ کیلومتر از تونل البرز

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

شناسایی هرچه بهتر رفتار محیط در مهندسی سنگ چه در مباحث ایمنی و چه از نظر اقتصادی و مهندسی کارساز خواهد بود، از این رو انتخاب پارامترهای ورودی برای سیستم‌های رده‌بندی توده‌سنگ به منظور توصیف هرچه بهتر واقعیت، از اهمیت بالایی برخوردار است. این حساسیت، نیاز به بررسی بیشتر در مورد تعاریف و مفاهیم پارامترهای موثر در سیستم‌های رده‌بندی را گوشزد می‌کند. در این مقاله به بررسی روند درست محاسبه امتیاز پارامترهای شاخص کیفی سنگ *RQD* و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها *FS* به‌عنوان دو مورد از پارامترهای ورودی سیستم *RMR* با استفاده از گراف‌های ارایه شده در سیستم *RMR89* و همچنین مشکلات موجود در استفاده از آن‌ها پرداخته شد. سپس پارامتر پیشنهادی به‌عنوان جایگزین دو پارامتر مورد بحث، تحت عنوان تناوب شکستگی *FF* در قالب *RMR13* مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به منظور مقایسه نتایج این دو روش، داده‌های مربوط به طول تقریبی ۲۰۰۰ متر از تونل البرز واقع در آزادراه تهران-شمال تحلیل شد. نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که امتیاز ترکیبی دو پارامتر *RQD* و *FS* با امتیاز پارامتر *FF* همبستگی بالایی داشته، به‌طوری که تفاوت امتیاز دو دسته پارامتر مورد بحث کمتر از ۴

درصد است؛ در نتیجه مقادیر *RMR89* و *RMR13* با همبستگی بسیار بالا در ارتباط بوده و تفاوتی حدود ۲ درصد را نشان می‌دهد. با توجه به ماهیت سیستم‌های رده‌بندی تجربی از جمله سیستم *RMR*، این مقدار خطا نشانگر نتایج قابل قبول برای سیستم *RMR13* است.

بر اساس داده‌های واقعی از مورد مطالعاتی تونل البرز، با توجه به اختلاف کم در مقادیر پارامترها و امتیازات کلی *RMR* در دو نسخه ۱۹۸۹ و ۲۰۱۳، استفاده از روش مرسوم با پارامترهای *RQD* و *FS* و یا استفاده از پارامتر *FF*، هر دو نتایج مشابه و قابل قبولی ارایه می‌دهند؛ بنابراین، با توجه به آنچه در مورد نواقص استفاده از *RQD* و همچنین نظرات ارایه‌دهندگان *RMR* گفته شد، استفاده از پارامتر جایگزین در قالب *RMR13* برای پروژه‌های جدید پیشنهاد می‌شود. لازم به ذکر است، در پروژه‌هایی که با استفاده از روش مرسوم *RMR89* پیش رفته‌اند، به دلیل اهمیت بالای داده‌های به‌دست آمده بر اساس سوابق پروژه، استفاده از *RMR89* منطقی‌تر بوده و برای ادامه روند طراحی تغییر سیستم به *RMR13* ضرورتی ندارد.

ارزیابی نتایج پارامترهای مورد بحث در این تحقیق و استفاده از پارامتر جایگزین در سایر موارد مطالعاتی و سیستم‌های رده‌بندی توده‌سنگ که بر اساس سیستم *RMR* بنا گذاشته شده‌اند، از جمله *MRMR*، *ARMR* و غیره به منظور بررسی مقبولیت بیشتر سیستم *RMR13* قابلیت بررسی را داشته و به مطالعات آتی محول می‌شود.

۶- مراجع

Aydan, Ö., Ulusay, R., & Tokashiki, N. (2014). A new rock mass quality rating system: Rock Mass Quality Rating (RMQR) and its application to the estimation of geomechanical characteristics of rock masses. Rock Mechanics and Rock Engineering, 47(4), 1255–1276. https://doi.org/10.1007/s00603-013-0462-z

Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics, 6(4), 189–236.

Bieniawski, Z. T. (1973). Engineering classification of jointed rock masses. Civil Engineer in South Africa, 15(12), 335–343. https://doi.org/10.1016/0148-9062(74)90924-3

Bieniawski, Z. T. (1989). Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Wiley & Sons.

Celada, B., Tardáguila, I., Varona, P., Rodríguez, A., & Bieniawski, Z. T. (2014). Innovating Tunnel Design by an Improved Experience-based RMR System. Proceedings of the World Tunnel Congress 2014 – Tunnels for a Better Life, 3, 1–9.

Chen, Q., & Yin, T. (2019). Should the Use of Rock Quality Designation Be Discontinued in the Rock Mass Rating System? Rock Mechanics and Rock Engineering, 52(4), 1075–1094. https://doi.org/10.1007/s00603-018-1607-x

Deere, D. U., Hendron, A. J., Patton, F. D., & Cording, E. J. (1966). Design of surface and near-surface construction in rock. The 8th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS). American Rock Mechanics Association.

Jalali, M., & Beik, P. (2018). Analysis of lining load of mechanized tunnels - A case study of Zayanderood dam to Kashan water conveyance tunnel. Tunneling & Underground Space Engineering, 6(2), 19–36. https://doi.org/10.22044/TUSE.2018.5400.1300

Kanik, M., Gurocak, Z., & Alemdag, S. (2015). A comparison of support systems obtained from the RMR89 and RMR14 by numerical analyses: Macka Tunnel project, NE Turkey. Journal of

African Earth Sciences, 109, 224–238. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.05.025

Koutsoftas, D. C. (2018). Discussion of "Rock quality designation (RQD): time to rest in peace." Canadian Geotechnical Journal, 55(4), 584–592. https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0497

Laubscher, D. H. (1990). A geomechanics classification system for the rating of rock mass in mine design. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 90(10), 257–273.

Lauffer, H. (1958). Classification for tunnel construction. Geologie Und Bauwesen, 24(1), 46–51.

Lowson, A. R., & Bieniawski, Z. T. (2013). Critical assessment of RMR-based tunnel design practices: A practical engineer's approach. Proceedings - Rapid Excavation and Tunneling Conference, (June), 180–198.

Nozari, A., Khosravi, M. H., & Askari, M. (2016). A numerical study on the effect of mechanical precutting and fiber glass bolts in Alborz tunnel passing through Kandovan fault. Tunneling & Underground Space Engineering, 5(1), 99–112. https://doi.org/10.22044/TUSE.2017.855

Palmstrom, A. (2005). Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD). Tunnelling and Underground Space Technology, 20(4), 362–377. https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.01.005

Pells, P. J., Bieniawski, Z. T., Hencher, S. R., & Pells, S. E. (2017). Rock quality designation (RQD): Time to rest in peace. Canadian Geotechnical Journal, 54(6), 825–834. https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0012

Russo, G. (2014). An update of the "multiple graph" approach for the preliminary assessment of the excavation behaviour in rock tunnelling. Tunnelling and Underground Space Technology, 41(1), 74–81. https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.11.006

Saroglou, C., Qi, S., Guo, S., & Wu, F. (2019). ARMR, a new classification system for the rating of anisotropic rock masses. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 78(5), 3611–3626. https://doi.org/10.1007/s10064-018-1369-4

Terzaghi, K. (1946). Rock defects and loads on tunnel supports. Harvard Univ.

Warren, S. N., Kallu, R. R., & Barnard, C. K. (2016). Correlation of the Rock Mass Rating (RMR) System with the Unified Soil Classification System (USCS): Introduction of the Weak Rock Mass Rating System (W-RMR). Rock Mechanics and Rock Engineering, 49(11), 4507–4518. https://doi.org/10.1007/s00603-016-1090-1

Wickham, G. E., & Tiedemann, H. R. (1974). Ground support prediction model (RSR concept). JACOBS ASSOCIATES INC SAN FRANCISCO CA.

tuse.shahroodut.ac.ir

Tunneling & Underground Space Engineering

(TUSE)

Volume 9-Issue 2\Summer 2020

نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی

Revision of Using Rock Quality Designation (RQD) in Rock Mass Rating (RMR) System – A Case Study: Alborz Tunnel

H. Farajollahi[1]; M. H. Khosravi[2]; M. Mohammadi[3]

1- M.Sc. Student in Rock Mechanics; School of Mining, College of Engineering, University of Tehran, h.farajollahi@ut.ac.ir

2- Assistant Professor; School of Mining, College of Engineering, University of Tehran, mh.khosravi@ut.ac.ir

3- PhD Student; KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, mohammadisalmasi@gmail.com

Received: 30 Dec 2019; Accepted: 15 Jul 2020

DOI: 10.22044/tuse.2020.9245.1384

Keywords

Rock Mass Rating (RMR)
Rock Quality Designation (RQD)
Fracture Spacing (FS)
Fracture Frequency (FF)
Alborz Tunnel

Extended Abstract

Summary

Rock quality designation (RQD), which is one of the input parameters in rock mass rating (RMR) and Q systems as the most common rock mass classification systems, has some drawbacks. Due to the overlapping RQD and Fracture Spacing (FS), the parameter of Fracture Frequency (FF) has been suggested by Lowson and Bieniawski in 2013 to be used as an alternative in RMR system that is known as RMR13. In this paper, a section of Alborz tunnel with a length of 2000 meters has been used to evaluate the above-mentioned modification. The results confirm that the rock mass rates obtained from RMR13 and RMR89 are very close together. Therefore, their selections depend on the project conditions and system user capabilities.

Introduction

Empirical and numerical methods are commonly used when underground engineering structures are designed. Empirical methods are generally preferred by rock engineers and geologists due to their practicality. In designing tunnel supports, rock mass classification systems such as RMR, Q, and RMi have been used by many researchers and they have gained universal acceptance. These classification systems have originally been obtained from many tunneling case studies and they have been applied to many construction designs. It is necessary to select the appropriate parameters as inputs to these systems in order to accurately describe the rock behavior. Therefore, researchers tend to look more closely at the input parameters. RQD and FS that are two input parameters to RMR, and recently introduced parameter of FF as their alternative, has been discussed in this paper. Moreover, the applicability of FF has been investigated in Alborz tunnel as a case study.

Methodology and Approaches

Traditionally, parameter ratings are determined from the presented tables for RMR. However, some users are not aware that the ratings in these tables are the average values for the ranges shown and not the minimum values of the ranges. For improved accuracy, it is better to use the recommended graphs, showing the continuous value of the ratings. Therefore, the presented graph is used to determine the value of FF parameter as a combined rating of RQD and FS. RMR13 has been obtained by replacing FF rating instead of the total rating for RQD and FS in RMR89.

Results and Conclusions

The values obtained for FF rating were highly correlated with the total rating for RQD and FS. Furthermore, the total rate of RMR13 was similar to RMR89 with a correlation coefficient of 0.996, and the values obtained for RMR13 was approximately 2 percent higher than those for RMR89. In general, using these two versions of RMR system are practical and acceptable, but the choice of each to use, depends on the project conditions and system user capabilities.