نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی
Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)
tuse.shahroodut.ac.ir
دوره‌ی ۱۱- شماره‌ی ۴/زمستان ۱۴۰۱

بهینه سازی رده بندی امتیاز توده سنگ (RMR) برای سنگ‌های درزه‌دار برای سازه‌های زیرزمینی

مقاله پژوهشی

علیرضا علیجانی[1*]؛ رسول اجل لوئیان[2]؛ ابوذر ارباب[3]؛ رضا دودانگه[4]

۱- دانشجوی دکتری؛ دانشکده‌ی علوم، دانشگاه اصفهان، Alirezaalijani2014@gmail.com

۲- استاد؛ دانشکده‌ی علوم، دانشگاه اصفهان، Rasajl@sci.ui.ac.ir

۳- مدیر سازه؛ کارشناسی‌ارشد مهندسی عمران، دانشگاه امام حسین (ع)، Arbabnoosh@gmai,.com

۴- مدیر سازه و تونل؛ دانشجوی دکتری تونل و فضاهای زیرزمینی، دانشگاه امام حسین (ع)، Rezadodeg@gmail.com

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۲/۰۹/۰۶؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۳/۰۹/۲۴

شماره صفحات: ۴۲۵ تا ۴۴۰

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2024.13887.1484

واژگان کلیدی

سازه‌های زیرزمینی

شاخص *RQD*

رده بندی *RMR*

فاکتور درزه‌داری

نرم افزار *Phase2*

چکیده

سازه‌های زیرزمینی به عنوان مهمترین سازه‌های کشور ارتباط مستقیمی با امنیت ملی و توان اقتصادی و حمل و نقلی کشور داشته و طراحی، اجرا و نگهداری آنها بسیار ضروری می‌باشد. انجام رده بندی تجربی توده سنگ یک ابزار بسیار مفید در ارزیابی کیفیت توده سنگ و طراحی تحکیمات بوده و دید مناسبی در خصوص رفتار سنگ در مواجه با تونل ارائه می‌دهد. رده بندی امتیاز توده سنگ (*RMR*) یکی از مهمترین و کارآمدترین روش‌های رده بندی توده سنگ بوده که از گذشته تا امروز مورد استفاده بوده ولیکن دارای برخی نارسایی‌ها در برآورد صحیح رفتار توده سنگ می‌باشد. طی این پژوهش تعداد ۱۰ سایت از پروژه‌های تونلی در شرایط توده سنگ مختلف شامل سنگ‌های ضعیف و خیلی درزه‌دار و شرایط مناسب بررسی شده و به جای مجموع امتیاز شاخص *RQD* و فاصله داری درزه‌ها، فاکتور درزه‌داری (*Joining Factor*) بر اساس تعداد درزه‌ها در ۲۵ متر مربع از تونل به این رده بندی اضافه شد. همچنین پروژه‌ها به روش عددی (نرم افزار *Phase2*) نیز تحلیل شده و نتایج تحکیمات پیشنهادی با *RMR* اصلاح شده مورد بررسی قرار گرفت که نتایج نشان می‌دهد که رده بندی *RMR* برای سنگ‌های نیمه پایدار (*RMR>50*) کارایی خوبی داشته ولیکن برای سنگ‌های ضعیف (*RMR<50*) بهتر است توده سنگ با *RMR* اصلاح شده با فاکتور درزه داری تحلیل گردد.

۱- مقدمه

سازه‌های زیرزمینی (فضاهای زیرزمینی جان پناه‌ها، تونل‌های انتقال و ذخیره سازی و غیره) از مهمترین جنبه‌های پیشرفت کشورهاست. ایران نیز به دلیل موقعیت جغرافیایی و اقتصادی ویژه، شرایط توپوگرافی و کوهستانی همواره نیازمند به ساخت سازه‌های زیرزمینی بوده و حائز اهمیت زیادی است. از مهمترین جنبه‌های تونلی کاهش هزینه‌ها، تاب آوری در برابر شرایط مختلف، ضریب اطمینان بالا و غیره می‌باشد. سازه‌های زیرزمینی قادر به تامین تمام این جنبه‌ها در زمینه‌های مختلف می‌باشند و توجه به

* اصفهان؛ میدان آزادی؛ دانشگاه اصفهان؛ تلفن: ۰۳۱۳۶۶۸۷۳۹۶؛ کدپستی: ۸۱۷۴۶۷۳۴۴۱

مسائل زمین شناسی مهندسی در رعایت این مسائل بسیار ضروری است. از آنجا که اینگونه سازه‌ها به دلایل مختلف بطور دائم در دسترس نبوده و امکان بازسازی تحکیمات، ابزارنگاری و غیره در آنها وجود ندارد، لذا باید طراحی تحکیمات آنها دارای ضریب اطمینان مناسب و در جهت قضاوت مهندسی بوده تا نیاز به ترمیم مجدد نداشته باشد. از این رو انجام مطالعات زمین شناسی مهندسی و به ویژه رده بندی مهندسی توده سنگ، می‌تواند در طراحی تحکیمات موثر و کافی در اینگونه سازه‌ها نقش اساسی داشته باشد. از آنجا که این سازه‌ها ارتباط مستقیم با ساختارهای زمین شناسی دارند لذا طراحی تحکیمات در آنها باید با روش‌های محافظه کارانه تر و با ضریب اطمینان بالاتری انجام گرفته تا بتوانند در برابر شرایط مختلف تاب آوری بیشتری داشته باشند.

رده بندی‌های تجربی توده سنگ علاوه بر کاربردهای فراوانی که دارند، دارای نقاط ضعفی نیز بوده و تنها می‌توانند به عنوان یک دید اولیه برای ارزیابی شرایط توده سنگ مورد استفاده قرار گیرند و برای مطالعات تکمیلی نیاز به روش‌های عددی دارند (*Aksoy, 2008 ; Pells et al., 2005*).

یکی از مهمترین و کارآمدترین روش‌های تجربی رده بندی توده سنگ روش امتیاز توده سنگ (*RMR*) است که نخستین بار توسط بنیاوسکی در ۱۹۷۲-۱۹۷۳ طراحی و در سال ۱۹۸۹ تحت عنوان *RMR89* گسترش یافت (*Bieniwaski, 1989*). از مهمترین مزایای این رده بندی، در نظر گرفتن پارامترهای سنگ بکر (مقاومت سنگ) و توده سنگ (مشخصات درزه‌ها) در کنار مسئله آب و محاسبه مدت زمان پایداری و طراحی تحکیمات می‌باشد. بعد از آن طی سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۴ تغییراتی بر روی آن بر حسب موارد مطالعاتی انواع شرایط برای طبقه بندی سنگ‌های نازک لایه سازند شمشک (*Gonbadi et al., 2009*)، ارزیابی توده سنگ برای طراحی تحکیمات تونل (*Alejano 2024; Kim et al., 2019*)، اصلاح آن برای سایت محل دفن زباله‌های اتمی (*Tong et al., 2022*) و غیره انجام گرفته است. طی بررسی‌های صحرایی و مطالعات پیشین رده بندی *RMR* با وجود نقاط قوت، بطور کامل قادر به پاسخگوی نیاز طراحی برای ارزیابی تحکیمات سازه‌های زیرزمینی نمی‌باشد. از طرفی در سال ۲۰۱۳ با ترکیب شاخص *RQD* و فاصله داری درزه‌ها، پارامتر تناوب شکستگی‌ها مطرح گردید و تحت عنوان *RMR13* برای تونل البرز بررسی شد و نتایج نشان می‌دهد، دارای خطای کمتری نسبت به *RMR89* می‌باشد (*Faraj Elahi et al., 2019*).

از طرفی رده بندی *RMR* و *Q* به مقدار زیادی به شاخص *RQD* وابسته بوده و با توجه به بررسی‌های صحرایی و مطالعات انجام گرفته، این شاخص کارایی لازم را در ارزیابی شرایط توده سنگ ندارد (*Sonmez et al., 2021*، *Farid, 2013 ; Pells et al., 2017*). طی این پژوهش نمونه‌هایی از شرایط مختلف زمین شناسی بررسی شده است و با اصلاح فاکتور درزه داری در رده بندی، مقادیر و طراحی‌های واقعی تری برای سنگ‌های ضعیف ارائه شده است.

۲- رده بندی امتیاز توده سنگ (RMR)

این رده بندی همانطور که بیان شد توسط *Bieniawski 1972* بر مبنای ۵ فاکتور اصلی طراحی شد. **جدول ۱**، پارامترهای رده بندی *RMR* را نشان می‌دهد. از مهمترین مزایای این رده بندی پارامترهای ساده و بدون آزمون‌های پیچیده است و در مطالعات صحرایی می‌توان به راحتی پارامترهای لازم برای این رده بندی در دسترس قرار گیرد.

از آنجا که در سازه‌های زیرزمینی کلیه عوامل زمین شناسی نقش مهمی در پایداری سازه دارند، لذا این رده بندی می‌تواند دید مناسبی از وضعیت کلی توده سنگ و طراحی‌های اولیه نگهداری را در اینگونه سازه‌ها فراهم نماید.

همانطور که **جدول ۱**، نشان می‌دهد حدود ۴۰٪ از امتیاز این رده بندی مربوط به میزان درزه داری توده سنگ (*RQD* و فاصله داری)، ۱۵٪ مشخصات سنگ بکر، ۱۵٪ وضعیت آب و ۳۰٪ وضعیت ظاهری درزه‌ها (شامل پرشدگی، زبری و هوازدگی سطح درزه‌ها) می‌باشد که با بررسی این امر می‌توان اهمیت میزان درزه داری و شرایط درزه‌ها را در ارزیابی مشخصات توده سنگ مطرح گردد (*Bieniwaski, 1989 ; Russo, 2014*). در **جدول ۲**، توصیف توده سنگ و تحکیمات لازم نشان داده شده است.

جدول ۱- پارامترهای ۵ گانه رده بندی *RMR* و مقادیر امتیاز آنها (*Bieniwaski, 1989*)

پارامترها		مقادیر				
مقاومت بکر	تک محوری	*>250*	*100-250*	*50-100*	*25-50*	*<25*
	بار نقطه ای	*>10*	*4-10*	*2-4*	*1-2*	*<1*
امتیاز		*15*	*12*	*7*	*4*	*2*
RQD%		*90-100*	*75-90*	*50-75*	*25-50*	*<25*
امتیاز		*20*	*17*	*13*	*8*	*3*
فاصله داری (m)		*>2*	*0.6-2*	*0.2-0.6*	*0.06-0.2*	*<0.06*
امتیاز		*20*	*15*	*10*	*8*	*5*
شرایط درزه ها		خیلی زبر، بدون امتداد، بدون جدایش، هوانزده	تا حدودی زبر، جدایش *1mm>*، تا حدودی هوازده	کمی زبر، جدایش *1mm>*، هوازدگی متوسط تا زیاد	سطح لغزش، گوژ*5mm>*، جدایش *1-5 mm*، ممتد	گوژ ضعیف *5>* *mm*، جدایش *5>* *mm*، ممتد
امتیاز		*30*	*25*	*20*	*10*	*0*
آب		خشک	مرطوب، *10<* *L/min* در ۱۰ متر طول تونل	خیس، *10-25* *L/min* در ۱۰ متر طول تونل	قطره ای، *25-125* *L/min* در ۱۰ متر طول تونل	جریان، *125>* *L/min* در ۱۰ متر طول تونل
امتیاز		*15*	*10*	*7*	*4*	*0*

جدول ۲ - توصیف سنگ و طراحی تحکیمات در رده بندی *RMR* (*Singh & Goel, 2011 ; Bieniwaski, 1989*)

کلاس سنگ	روش حفاری	تحکیمات			مدت زمان پایداری
		بولت	شاتکریت	قاب فولادی	
خیلی خوب *RMR>81*	تمام مقطع پیشروی ۳ متر	موضعی یا بدون نیاز	موضعی یا بدون نیاز	-	۲۰ سال ابعاد ۱۵ متر
سنگ خوب *RMR=61-80*	تمام مقطع پیشروی ۱/۵ متر (تکمیل تحکیمات تا ۲۰ متری جبهه کاری)	موضعی با فاصله ۲/۵ متر	*5cm* لایه اول	-	یک سال ابعاد ۱۰ متر
سنگ مناسب *RMR=41-60*	دو مرحله ای پیشروی تا ۳ متر (تکمیل تحکیمات تا ۱۰ متری جبهه کاری)	سیستماتیک با فاصله ۱/۵-۲ متر طول ۴ متر	*5-10 cm* با مش	-	یک هفته ابعاد ۵ متر
سنگ ضعیف *RMR=21-40*	دو مرحله ای پیشروی تا ۱/۵ متر (نصب تحکیمات فوری)	سیستماتیک با فاصله ۱-۱/۵ متر طول ۴-۵ متر	*10-15 cm* با مش	سبک تا متوسط فاصله ۱/۵ متر	۱۰ ساعت ابعاد ۲-۵ متر
سنگ خیلی ضعیف *RMR<20*	چندین مرحله تا ۱/۵ متر پیشروی (نصب تحکیمات فوری)	سیستماتیک با فاصله ۱-۱/۵ متر طول ۵-۶ متر	*15-20 cm* با مش	متوسط تا سنگین فاصله *0.75m* با پیش تزریق	۳۰ دقیقه ابعاد ۱ متر

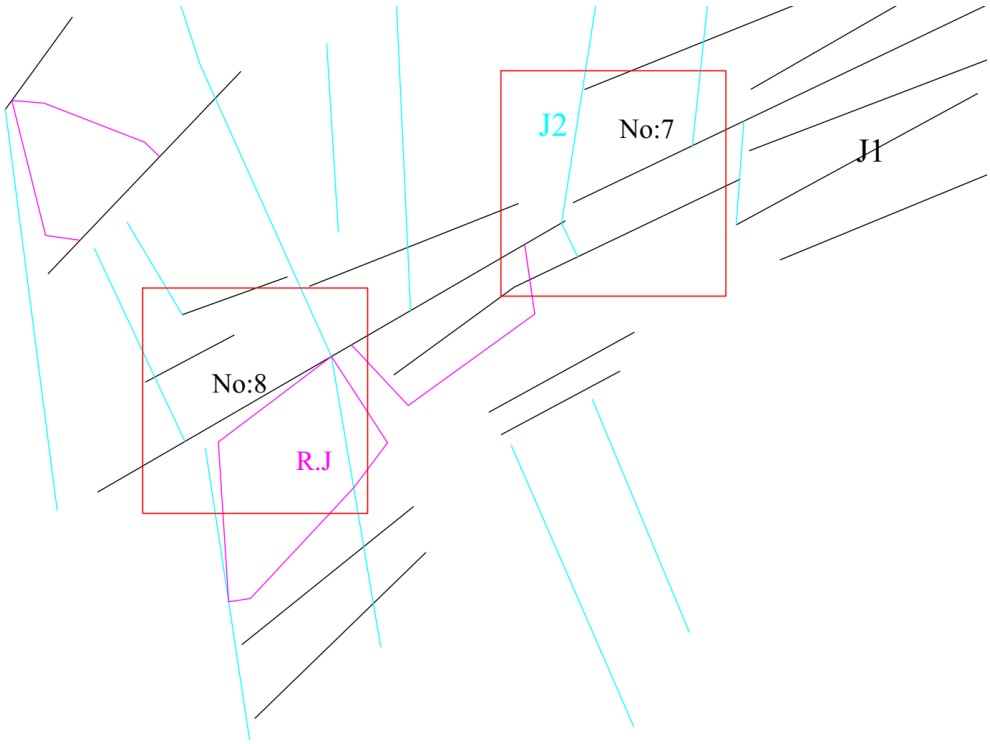
مطابق **جدول ۲**، توده سنگ بر اساس امتیاز به دست آمده به ۵ گروه خیلی خوب، خوب، مناسب، ضعیف و خیلی ضعیف طبقه بندی شده است و بر اساس امتیاز توده سنگ، می‌توان روش حفاری، مدت زمان پایداری و تحکیمات مورد نیاز برای پایدارسازی تونل را ارایه نمود.

۳- فاکتور درزه داری

همانطور که بیان شد، میزان درزه داری در ارزیابی توده سنگ حایز اهمیت ویژه‌ای بوده که در این رده بندی به صورت شاخص *RQD* و فاصله داری درزه‌ها محاسبه شده است. برای محاسبه این شاخص در سطح زمین به دلیل عدم وجود مغزه‌های حفاری از فرمول پالمسترام ۱۹۸۰ (*RQD= 115-3.3 Jv*) استفاده می‌شود که در آن *Jv* (تعداد حجمی درزه‌ها در یک متر مکعب) بوده که بنابراین عدد حاصله بصورت تقریبی است (*Palmstrom 2005; 2009* ; *Ajdari Shabestari et al., 2015*).

از آنجا که در منابع اصلی، ارزیابی شاخص *RQD* در قطعات سنگی بزرگتر از *100 mm* (*4 inch*) برای سنگ‌های سخت و هوانزده (*Hard and sound*) می‌باشد (*Deere 1988* ; *Zhang, 2016* ; *Pells et al., 2017*)، لذا ارزیابی این شاخص در شرایط سطحی طبیعی که سنگ‌ها هوازده و تعداد دسته درزه‌ها به خوبی مشخص نیست، صحیح نمی‌باشد. از طرفی میزان درزه داری توده سنگ علاوه بر تعداد درزه‌های قابل مشاهده به تعداد دسته درزه‌ها و درزه‌هایی که در سطح دو بعدی قابل مشاهده نمی‌باشند، نیز بستگی زیادی دارد. طی پژوهش‌های انجام گرفته ضرایبی جهت تعداد دسته درزه‌ها و زاویه آن‌ها داده می‌شود (*Laubscher, 1990*). همچنین بررسی‌های صحرایی و مطالعات نشان می‌دهند، کارایی و اعتبار شاخص *RQD* بیشتر مربوط به شکستگی‌های طبیعی با فاصله *15-100 cm* بوده و این شاخص برای سنگ‌های توده‌ای یا خیلی خرد شده کارایی لازم را ندارد (*Somodi et al., 2021*). از طرفی در بیشتر شرایط طبیعی در فضاهای زیرزمینی درزه‌ها به صورت ناپیوسته بوده و ممکن است در یک جبهه کاری تونل چندین شاخص *RQD* ارزیابی گردد. لذا فاکتوری برای میزان پیوستگی درزه (*Fracture continues*) نیز در نظر گرفته شده که در محاسبات *RQD* باید برآورد گردد (*Laubscher, 1990*). **شکل ۱** تا **شکل ۴** و **جدول ۳** و **جدول ۴**، عدم تطابق *RQD* محاسبه شده و تراکم حجمی درزه‌ها (*Jv*) را نشان می‌دهد.

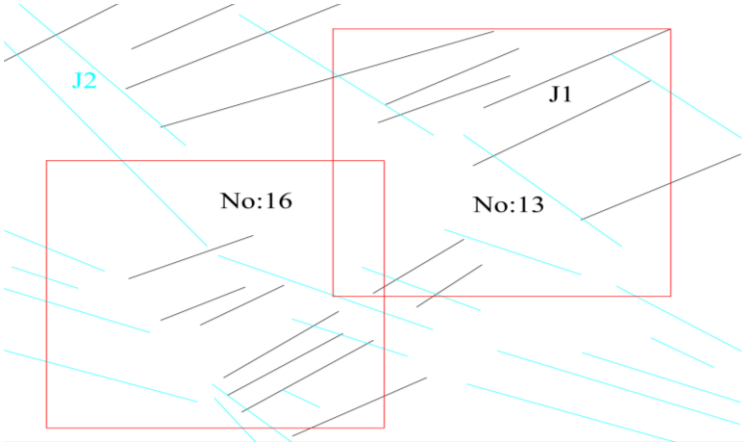
شکل ۱- وضعیت درزه داری دیواره تونل (درزه داری متوسط)



شکل ۲- طرح شماتیک درزه داری و محاسبه *Jv*

همانطور که **شکل ۲**، نشان می‌دهد، در یک متر مربع سنگ تعداد ۷-۸ درزه در یک متر مربع دیده می‌شود که با توجه به فرمول پالمسترام میزان *RQD=115-3.3(7-8)* برابر ۸۸-۹۲ می‌گردد.

شکل ۳- وضعیت درزه داری دیواره تونل (درزه داری زیاد)



شکل ۴- طرح شماتیک درزه داری و محاسبه *Jv*

همانطور که **شکل ۴**، نشان می‌دهد، در یک متر مربع سنگ تعداد ۱۳-۱۶ درزه در یک متر مربع دیده می‌شود که با توجه به فرمول پالمستارم میزان *RQD=115-3.3(13-16)* برابر ۶۲-۷۲ می‌گردد.

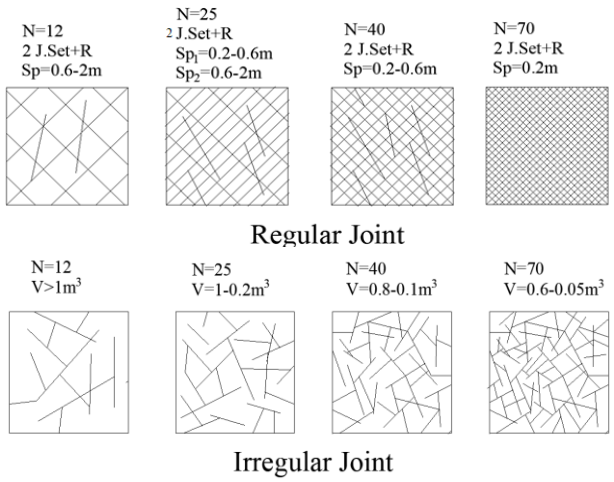
جدول ۳ - محاسبه *RMR* با استفاده از شاخص *RQD* محاسبه شده

پارامتر		میزان	امتیاز
UCS (MPa)		*40-50*	*4*
RQD %		*88-92*	*17*
Spacing (m)		*0.2-0.4*	*10*
Persistence (m)	*Condition*	*2-4*	*2-4*
Weathering		*S.W to M.W*	*3-5*
Aperture (mm)		*1-3*	*1*
Filling		*No*	*4-6*
Water		*Dry to damp*	*10-15*
Orientation		*Perpendicular with and against dip*	*(-5)*
RMR= 50-60 (-5)= 45-55 (III)			
Bolt sp=1.5-2m, 5-10cm Sh			

جدول ۴- محاسبه *RMR* با استفاده از شاخص *RQD* محاسبه شده

پارامتر		میزان	امتیاز
UCS (MPa)		*40-50*	*4*
RQD %		*62-72*	*13*
Spacing (m)		*0.08-0.3*	*8-10*
Persistence (m)	*Condition*	*1-3*	*4*
Weathering		*M.W*	*3*
Aperture (mm)		*1-3*	*1*
Filling		*Softening*	*2*
Water		*Dry to damp*	*10-15*
Orientation		*Perpendicular with and against dip*	*(-5)*
RMR=45-52 (-5)= 40-47 (III)			
Bolt sp=1.5-2m, 5-10cm Sh			

همانطور که **شکل ۱** تا **شکل ۴** و **جدول ۳** و **جدول ۴**، نشان می‌دهد، میزان *RMR* محاسبه شده برای دو شرایط سنگی درزه داری متوسط (توده سنگ **شکل ۱**) و زیاد (توده سنگ **شکل ۳**)، در یک کلاس (کلاس *III*)(*RMR=40-60*) قرار می‌گیرد و مطابق **جدول ۲**، دارای طرح تحکیمات یکسانی است. در حالتی که در شرایط واقعی پروژه تحکیمات اجرا شده برای دو شرایط سنگی متفاوت می‌باشد که علت اصلی آن در برآورد ناصحیح میزان *RQD* و عدم کارایی آن در توده سنگ‌هایی با فاصله کم درزه‌ها می‌باشد. با توجه به برداشت‌های درزه نگاری سطحی از چندین پروژه تونلی، مشخص شده است که این فاکتور برای سنگ‌هایی که میزان فاصله درزه‌ها خیلی کم (*40cm>*) بوده و یا توده سنگ دارای چندین نوع درزه نامنظم باشد و یا توده سنگ به صورت خرد شده باشد، کارایی لازم را ندارد. لذا محاسبات رده بندی *RMR* دچار مشکل و سوء برداشت از شرایط واقعی سنگ شده و برآورد صحیحی در شرایط درزه داری زیاد ندارد. از این رو نیاز است جهت افزایش دقت، مقیاس درزه برداری در تونل افزایش یابد که می‌توان به جای تعداد درزه‌ها در یک متر مربع از فاکتور تعداد درزه‌ها در *25 m2* سطح زمین یا داخل فضای زیرزمینی (مربعی به ابعاد ۵*۵ متر یا دایره ای به قطر حدود ۵/۵ متر) با امتیاز حداکثر ۴۰ استفاده نمود (**شکل ۵**). در این شکل *N*: تعداد درزه‌ها در *25m2*، *J.Set*: دسته درزه، *Sp*: فاصله درزه‌ها، *V*: حجم بلوک سنگی به *m3* و *R*: درزه‌های تصادفی است. با توجه به بررسی‌های انجام گرفته امتیاز دهی فاکتور درزه داری مطابق **جدول ۵**، می‌باشد.



شکل ۵- اصلاح و تکمیل رده بندی *RMR* با فاکتور درزه داری (*Jointing Factor*)

۴- مطالعات موردی

در این بخش از پژوهش تعداد ۱۰ عدد از پروژه‌های زیرزمینی به روش *RMR* و *RMR* اصلاح شده با فاکتور درزه داری، محاسبه شده و مشخصات توده سنگ بر اساس شاخص *GSI* به دست آمده و برای ارزیابی میزان تغییر شکل توده سنگ و ارزیابی تحکیمات از روش ساکورایی و آنالیز عددی (نرم افزار *Phase2*) محاسبه شده است (*Thai et al., 2021*). **جدول ۶**، محاسبات *RMR* و *RMR* اصلاح شده و تحکیمات ارایه شده را نشان داده و **جدول ۷**، توده سنگ‌ها و پروژه‌ها را بر اساس پارامترهای توده سنگ و شاخص *GSI* تقسیم بندی نموده است و ورودی‌ها و خروجی‌های نرم افزار *Phase2* را تشریح نموده است. **شکل ۶** و **شکل ۷** تحلیل نرم افزاری توده سنگ را نشان می‌دهد.

جدول ۵- اصلاح رده بندی *RMR* با فاکتور درزه داری

پارامترها		مقادیر				
مقاومت سنگ بکر (*MPa*)	تک محوری	*>250*	*100-250*	*50-100*	*25-50*	*<25*
	بار نقطه ای	*>10*	*4-10*	*2-4*	*1-2*	*<1*
	امتیاز	*15*	*12*	*7*	*4*	*2*
فاکتور درزه داری (*Cont/25m²*)		توده ای *<12*	متوسط درزه دار *12-25*	درزه دار *25-40*	خیلی درزه دار *40-70*	شدیدا درزه دار *>70*
	امتیاز	*40*	*30*	*20*	*10*	*3*
شرایط درزه‌ها		خیلی زبر، بدون امتداد، بدون جدایش، هوانزده	تا حدودی زبر، جدایش *1mm>*، تا حدودی هوازده	کمی زبر، جدایش *1mm>*، هوازدگی متوسط تا زیاد	سطح لغزش، گوژ*5mm>*، جدایش *1-5 mm*، ممتد	گوژ ضعیف *5>* *mm*، جدایش *5 mm>*، ممتد
	امتیاز	*30*	*25*	*20*	*10*	*0*
آب		خشک	مرطوب، *10>* *L/min* در ۱۰ متر طول تونل	خیس، *10-25* *L/min* در ۱۰ متر طول تونل	قطره ای، *25-125* *L/min* در ۱۰ متر طول تونل	جریان، *125>* *L/min* در ۱۰ متر طول تونل
	امتیاز	*15*	*10*	*7*	*4*	*0*

جدول ۶- محاسبه *RMR* به روش معمول و با فاکتور درزه داری و تحکیمات اجرا شده در شرایط واقعی

پروژه	شرایط توده سنگ	*RMR* و تحکیمات	*RMR* اصلاحی		تحلیل عددی تونل
			فاکتور درزه داری	*RMR* و تحکیمات	
۱	آهک ضخیم لایه، یک دسته ناپیوستگی با فاصله داری *0.6-1m*، پرشدگی کلسیت، هوازدگی کم، خشک تا مرطوب	۷۸-۷۵ (بولت موضعی با *5cm* شاتکریت)	۸/۵	۸۰-۷۷ (بولت موضعی با *5cm* شاتکریت)	*GSI=65* *E=20000* *m_m=1.13* *S=0.005* جابجایی بیشینه=*4-6mm* تحکیمات موضعی
۲	آهک ضخامت لایه بندی *1m* با یک دسته درزه با فاصله *0.2-0.6* *m* و درزه‌های تصادفی، هوازدگی کم تا متوسط، پرشدگی کلسیت، خشک	۶۲-۵۷ (بولت سیستماتیک فاصله ۲-۱٫۵ متر، *5-10cm* شاتکریت)	۲۰	۶۲-۵۷ (بولت سیستماتیک فاصله ۲-۱/۵ متر، *5-10cm* شاتکریت)	*GSI=55* *E=7000* *m_m=1.2* *S=0.001*جابجایی بیشینه=*12-18mm* بولت با فاصله ۱٫۵ متر با *10cm* شاتکریت

ادامه جدول۶- محاسبه *RMR* به روش معمول و با فاکتور درزه داری و تحکیمات اجرا شده در شرایط واقعی

پروژه	شرایط توده سنگ	*RMR* و تحکیمات	*RMR* اصلاحی		تحلیل عددی تونل
			فاکتور درزه داری	*RMR* و تحکیمات	
۳	توف و آگلومرا، دو دسته درزه با فاصله *0.2-0.6 m*، بدون پرشدگی، هوازدگی کم، خشک	۵۷-۵۵ (بولت سیستماتیک فاصله ۲-۱,۵ متر، *5-10cm* شاتکریت)	۲۷	۵۵-۵۰ (بولت سیستماتیک فاصله ۲-۱,۵ متر، *5-10cm* شاتکریت)	*GSI=65* *E=10000* m_m*=2.2* *S=0.005* جابجایی بیشینه=*6-10mm* تحکیمات موضعی
۴	آگلومرا و آندزیت، دو دسته درزه با فاصله حدود *0.2-0.6m*، بدون پرشدگی، هوازدگی کم تا متوسط، خشک تا مرطوب	۶۰-۵۵ (بولت سیستماتیک فاصله ۲-۱,۵ متر، *5-10cm* شاتکریت)	۲۵	۶۲-۵۷ (بولت سیستماتیک فاصله ۲ متر، *5-10cm* شاتکریت)	*GSI=70* *E=11000* m_m*=3.2* *S=0.004* جابجایی بیشینه= *7-10mm* تحکیمات موضعی
۵	آهک لوماشل، ضخامت لایه بندی *1m* با یک دسته درزه با فاصله *0.2-0.6m* و درزه‌های تصادفی، پرشدگی کلسیت و رس، هوازدگی کم، مرطوب	۶۲-۵۸ (بولت سیستماتیک فاصله ۲ متر، *5-10cm* شاتکریت)	۲۳	۶۰-۵۸ (بولت سیستماتیک فاصله ۲-۱,۵ متر، *5-10cm* شاتکریت)	*GSI=52* *E=2500* m_m*=0.4* *S=0.0007* جابجایی بیشینه= *30-42mm* بولت فاصله ۱,۵ متر با *10cm* شاتکریت
۶	آهک دولومیتی با دو دسته ناپیوستگی فاصله *0.2-0.6m*، با درزه‌های تصادفی، هوازدگی کم تا متوسط، پرشدگی کلسیت و رس، مرطوب	۵۶-۵۳ (بولت سیستماتیک فاصله ۲-۱,۵ متر، *5-10cm* شاتکریت)	۲۷	۵۴-۵۲ (بولت سیستماتیک فاصله ۲-۱,۵ متر، *5-10cm* شاتکریت)	*GSI=50* *E=7000* m_m*=0.63* *S=0.0011*جابجایی بیشینه=*20-30m* بولت با فاصله ۱,۵ متر با *10cm* شاتکریت
۷	مارن و شیل و آهک نازک لایه، دو دسته ناپیوستگی با فاصله *0.2m*، هوازدگی متوسط، پرشدگی رس، آبدار	۴۴-۴۱ (بولت سیستماتیک فاصله ۲-۱,۵ متر، *5-10cm* شاتکریت)	۵۲	۳۰-۲۸ (بولت سیستماتیک فاصله ۱-۱,۵ متر، ۱۰- *cm*۱۵ شاتکریت، قاب سبک فاصله ۱,۵ متر)	*GSI=40* *E=1200* m_m*=0.32* *S=0.00017* جابجایی بیشینه=*50-90mm* بولت ۶ متری با فاصله ۱ متر با *20cm* شاتکریت

ادامه جدول۶- محاسبه *RMR* به روش معمول و با فاکتور درزه داری و تحکیمات اجرا شده در شرایط واقعی

پروژه	شرایط توده سنگ	*RMR* و تحکیمات	*RMR* اصلاحی		تحلیل عددی تونل
			فاکتور درزه داری	*RMR* و تحکیمات	
۸	آهک، کاملا خرد شده، چهاردسته درزه با فاصله حدود *0.1-0.2m*، هوازدگی متوسط، بدون پرشدگی، خشک	۴۸-۴۵ (بولت سیستماتیک فاصله ۲-۱,۵ متر، *5-10cm* شاتکریت)	۷۰>	۳۷-۳۵ (بولت سیستماتیک فاصله ۱,۵-۱ متر، *10-15cm* شاتکریت، قاب سبک فاصله ۱,۵ متر)	*GSI=30* *E=1500* *m_m=0.2* *S=0.00009* جابجایی بیشینه=*40-50mm* بولت با فاصله ۱ متر با *20cm* شاتکریت
۹	میان لایه‌های سیلتستون و آهک و شیل، سه دسته ناپیوستگی با فاصله داری *10-40 cm*، بدون پرشدگی، هوازدگی متوسط، آبدار	۴۹-۴۵ (بولت سیستماتیک فاصله ۲-۱,۵ متر، *5-10cm* شاتکریت)	۴۶	۴۰-۳۶ (بولت سیستماتیک فاصله ۱,۵-۱ متر، *10-15cm* شاتکریت، قاب سبک فاصله ۱,۵ متر)	*GSI=35* *E=1600* *m_m=0.25* *S=0.00008* جابجایی بیشینه=*30-50mm* بولت با فاصله ۱,۲ متر با *10cm* شاتکریت
۱۰	آهک متوسط لایه با زون‌های خردشدگی متعدد، سه دسته ناپیوستگی با فاصله *0.2-0.6 m*، هوازدگی متوسط، دارای پرشدگی کلسیت و رس، مرطوب	۵۳-۵۰ (بولت سیستماتیک فاصله ۲-۱,۵ متر، *5-10cm* شاتکریت)	۴۰	۴۲-۳۸ (بولت سیستماتیک فاصله ۱,۵ متر، *10cm* شاتکریت و قاب سبک در نقاط ضعف)	*GSI=40* *E=2000* *m_m=0.7* *S=0.0004* جابجایی بیشینه=*25-35mm* بولت به فاصله ۱,۵ متر با *15cm* شاتکریت

جدول ۷- محاسبه نرم افزاری توده سنگ و مقایسه تحکیمات ارایه شده

پروژه	شرایط توده سنگ	متوسط *RMR* و تحکیمات	فاکتور درزه داری	متوسط *RMR* اصلاح شده و تحکیمات	پارامترهای توده سنگ (ورودی نرم افزار)	جابجایی و تحکیمات پیشنهادی (خروجی نرم افزار)
پروژه‌های ۱ تا ۶	دو دسته ناپیوستگی با فاصله حدود *0.4-0.6m*، بدون پرشدگی یا پرشدگی سخت، خشک تا مرطوب	*RMR>50* بولت فاصله *1.5-2m* با *5-10cm* شاتکریت	*9-27*	*RMR>50* بولت فاصله *1.5-2m* با *5-10cm* شاتکریت	*GSI=50-70* *mm=2.4* *Em=12000 MPa* *S=0.011* *σ1=5.3 MPa*	تحکیمات موضعی (سنگ نسبتا پایدار)

ادامه جدول ۷- محاسبه نرم افزاری توده سنگ و مقایسه تحکیمات ارایه شده

پروژه	شرایط توده سنگ	متوسط ***RMR*** و تحکیمات	فاکتور درزه داری	متوسط ***RMR*** اصلاح شده و تحکیمات	پارامترهای توده سنگ (ورودی نرم افزار)	جابجایی و تحکیمات پیشنهادی (خروجی نرم افزار)
پروژه‌های ۷ تا ۱۰	سه دسته یا بیشتر ناپیوستگی با فاصله متوسط *0.2m*، دارای پرشدگی، مرطوب یا آبدار	*RMR=40-50*	*40-70*	*RMR=28-42* بولت فاصله *1-1.5m* با *1.5m 10-15cm* شاتکریت با قاب	*GSI=25-40* *mm=0.7* *Em=2200 MPa* *S=0.0005* *σ1=0.8 MPa*	قاب فولادی *IPE160* با *15cm* شاتکریت (سنگ ناپایدار)

برای تحلیل پایداری سازه‌های زیرزمینی، ارزیابی میزان جابجایی توده سنگ و دانستن میزان جابجایی مجاز بسیار ضروری می‌باشد. روش ساکورایی بر اساس سه هشدار اصلی خطر (طراحی کوتاه مدت، طراحی اصلی و طراحی بلند مدت) سه فرمول ارائه داده است (*Nouri Sartangi et al., 1400 ; Sabzevari Dehkaboud et al., 2018 ; Bahadori & Khorasani, 2013*)

رابطه (۱)

$$Log\ \varepsilon = -0.25\ Log\ E - 0.85$$
$$Log\ \varepsilon = -0.25\ Log\ E - 1.22 \quad (II)$$
$$Log\ \varepsilon = -0.25\ Log\ E - 1.59 \quad (III)$$

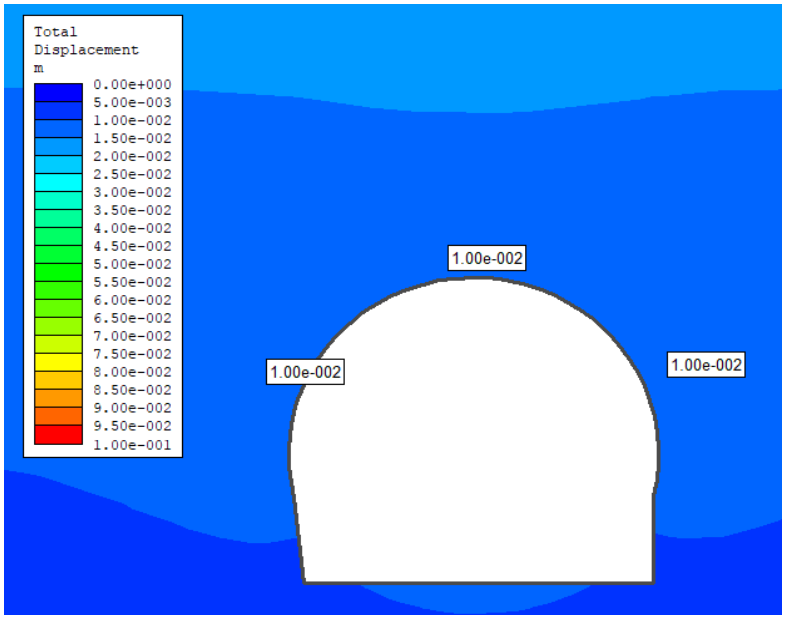
در این رابطه ε= کرنش بحرانی و E= مدول یانگ توده سنگ (MPa) می‌باشد. با تعیین میزان کرنش بحرانی از فرمول‌ها، میزان جابجایی مجاز توده سنگ ($U=\varepsilon\ a$) به دست می‌آید که U= جابجایی مجاز (cm) و a= شعاع تونل (cm) می‌باشد (**جدول ۸**).

جدول ۸- محاسبه میزان جابجایی مجاز توده سنگ بر اساس مفهوم کرنش

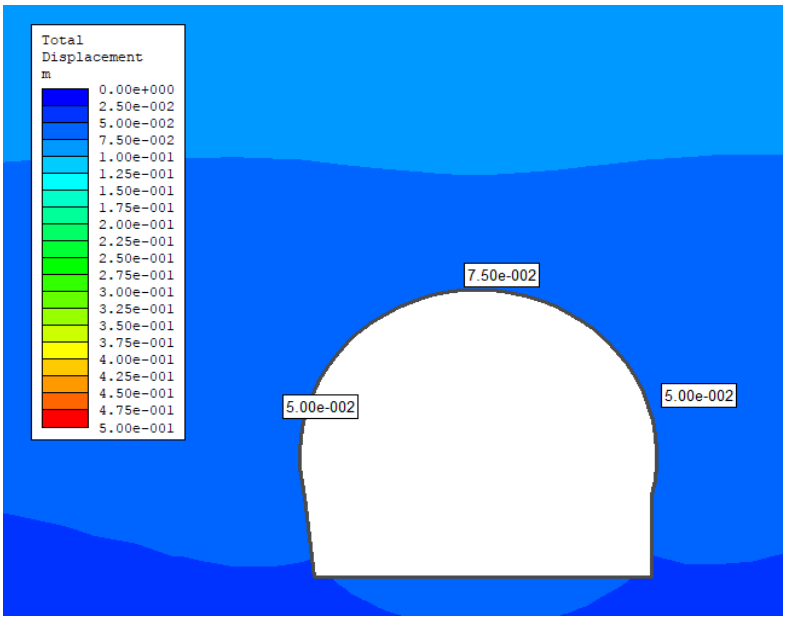
پروژه	***Risk level***	***Elastic modulus*** (***MPa***)	***Radius (m)***	***Max displacement (cm)***
پروژه‌های ۱ تا ۶	*I*	*12000*	*6*	*1.62*
	II			*2.1*
	III			*2.52*
پروژه‌های ۷ تا ۱۰	*I*	*2200*		*1.35*
	II			*1.87*
	III			*2.3*

بر اساس نتایج به دست آمده با توجه به **شکل ۶** و **شکل ۷**، **جدول ۶** تا **جدول ۸**، در سنگ‌هایی با *RMR=40-50* و *GSI<40*، میزان جابجایی رخداده در توده سنگ بیشتر از جابجایی بیشینه مجاز بوده و توده سنگ حالت ناپایدار می‌یابد. رده بندی *RMR* برای اینگونه سنگ‌ها بولت با فاصله *1.5-2m* با *5-10cm* شاتکریت ارائه داده است در حالی که *RMR* اصلاح شده و نتایج نرم افزاری نصب قاب فولادی را به همراه *15cm* شاتکریت پیشنهاد می‌دهد.

همانطور که **جدول ۴**، نشان می‌دهد، در سنگ‌هایی با درزه داری کمتر (پروژه‌های ۱ تا ۶ با فاکتور درزه داری کمتر از ۲۷ درزه در ۲۵ متر مکعب)، تطابق بسیار خوبی بین رده بندی *RMR* و *RMR* اصلاح شده با فاکتور درزه داری با نتایج حاصل از آنالیز عددی وجود دارد و نشان می‌دهد، رده بندی *RMR* در سنگ‌هایی با مقاومت بالاتر و درزه داری کمتر به خوبی جوابگوی طراحی تحکیمات در سازه‌های زیرزمینی با عمر طولانی می‌باشد. ولیکن در خصوص پروژه‌های ۷ تا ۱۰ (در سنگ‌های ضعیف با فاکتور درزه داری >۴۰) همانطور که دیده می‌شود، اصلاح *RMR* با فاکتور درزه داری باعث کاهش رده سنگ و افزایش تحکیمات مورد نیاز می‌گردد که نتایج جدید حاصله تطابق خوبی با تحلیل عددی توده سنگ دارد. لذا می‌توان پیشنهاد داد به جای استفاده از فاکتورهای *RQD* و فاصله داری درزه‌ها، در سنگ‌های ضعیف از فاکتور درزه داری جهت سازه‌های تونلی با ضریب اطمینان بالاتر استفاده شود.



شکل ۶- تحلیل جابجایی توده سنگ پروژه‌های ۱ تا ۶ (جابجایی *1cm*)



شکل ۷- تحلیل جابجایی توده سنگ پروژه‌های ۷ تا ۱۰ (جابجایی *5-7.5 cm*)

۵- نتیجه گیری

همانطور که بیان شد ارزیابی سازه‌های تونلی یکی از مهمترین فعالیت‌های مهندسی کشور می‌باشند که با توجه به استعداد ایران در زمینه توپوگرافی و زمین شناسی، این امر باید در اولویت فعالیت‌های مهندسی قرار گیرد. لذا طراحی تحکیمات در اینگونه سازه‌ها دارای حساسیت‌های خاصی بوده که با تلفیق و اصلاح رده بندی‌های توده سنگ بررسی گردد.

بررسی‌های میدانی از تعداد ۱۰ پروژه تونلی نشان می‌دهد، رده بندی امتیاز توده سنگ (*RMR*) برای سنگ‌های سخت و کم درزه دار (*RMR>50*) به خوبی

کارایی داشته و می‌تواند برآورد خوبی از تحکیمات تونل ارائه نماید ولیکن با توجه به اینکه محاسبه شاخص *RQD* ممکن است دچار اشکالات زیاد و برداشت ناصحیح شود، لذا در سنگ‌های ضعیف و شرایط درزه داری شدید به اندازه کافی قادر به طراحی تحکیمات به صورت کاربردی با ضریب اطمینان بالا نمی‌باشد. لذا طی بررسی‌های انجام گرفته از سایت‌های تونلی در پروژه‌های زیرزمینی نشان می‌دهد که برداشت درزه نگاری در مقیاس بزرگتر و تعریف فاکتور درزه داری (*Jointing Factor*) می‌تواند جایگزین مناسبی برای مجموعه فاکتورهای *RQD* و فاصله داری درزه‌ها (*Spacing*) در سنگ‌های ضعیف و به شدت درزه دار باشد. نتایج تجربی و تحلیل عددی با نرم افزار *Phase2* نشان می‌دهد، تطابق خوبی بین تحکیمات طراحی شده توسط رده بندی *RMR* اصلاح شده با فاکتور درزه داری در سنگ‌های ضعیف و به شدت درزه دار وجود دارد که در اینگونه واحدهای سنگی می‌تواند معیار مناسبی برای ارزیابی طراحی تحکیمات سازه‌های زیرزمینی و تونلی باشد.

۶- مراجع

Ajdari Shabestari, A., Bayat, A., Mollaei, M. (2015). Tunneling in Weak Rocks, Khatam Al-Anbia Headquarters Publications, Iran, 662 pages.

Aksoy, C. O. (2008). Review of rock mass rating classification: historical developments, applications and restrictions, *Journal of Mining Science*, 1, 51-63.

Alejano, L. R. (2024). Rock Mass Classification Systems: A Useful Rock Mechanics Tool, Often Misused, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1-21.

Bahadori, M., Khorasani, A. (2013). Stability analysis and proposal of a retention system in the water diversion tunnels of Mashampa Dam, Zanjan using numerical, experimental and convergence-adjacency methods, *Journal of Tunnel and Underground Space Engineering*, No. 2, pp. 217-231.

Bieniwaski, Z. (1989). Engineering rock mass classification, *John Wiley & Sons*, P 250.

Deere D. U. (1988). The rock quality designation (RQD) index in practice, ASTM STP 984, 91-101.

Faraj Elahi, H., Khosravi, M. H., Mohammadi, M. (2019). Review of the effectiveness of the rock quality index (RQD) in the geomechanical classification system of rock mass (case study of Alborz Tunnel), *Journal of Tunnel and Underground Space Engineering*, No. 1, pp. 137-148.

Farid, A. T. M. (2013). Modified Value of Rock Quality Designation Index RQD in Rock Formation, *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, 1-7.

Ghafouri, M., Lashkaripour, G., Tariq Azali, S. (2008). Evaluation of geomechanical properties of rock mass in the Darongar Dam transfer tunnel route for the design of retaining system, *Journal of the Iranian Society of Engineering Geology*, No. 2, pp. 1-14.

Gonbadi, M. B., Urmiaei, A., Nikodel, M., Lashkaripour, G. (2009). Evaluation of the effectiveness of RMR classification in predicting the engineering behavior of the Shemshak Formation in underground excavations in the Siah Bisheh area, *6th Iranian Conference on Engineering and Environmental Geology*, Tehran, pp. 753-764.

Kim, L., Rehman, H., Ali, W., Naji, A. M., Yoo, H. (2019). Weightage Effect during Back-Calculation of Rock-Mass Quality from the Installed Tunnel Support in Rock-Mass Rating and Tunneling

Quality Index System, *applied sciences*, 1-17.

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

Nouri Sartangi, M., Lashkaripour, G., Hafezi Moghaddis, N., Ghafouri, M., Sadeghi, M. (1400). Investigation of geomechanical parameters of material and rock mass of Asmari Formation (Case study: Khersan 3 Dam construction site), *Quarterly Scientific Research Journal of Environmental Geology*, No. 54, pp. 1-18.

Palmstrom, A. (2005). Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD), *Published in Tunnels and Underground Space Technology*, 20, 362-377.

Palmstrom, A. (2009). Combination the RMR, Q and RMi classification system, www.RocMass.net.

Pells, P. J. N., Bertuzzi, R. (2005). Limitation of rock mass classification system for tunnel support designs, 1-11.

Pells, P. L., Bieniawski, Z. T., Hencher, S. R., Pells, S. E. (2017). Rock quality designation (RQD): time to rest in peace, *Canadian Geotechnical Journal*, 54, 825-834.

Russo, G. (2014). An update of the "multiple graph" approach for the preliminary assessment of the excavation behavior in rock tunneling, *Tunneling and Underground Space Technology*, 41, 74-81.

Sabzevari Dehkaboud, B., Fallah, A., Mashrafifar, M. R., Emami, A. A. (2018). Stability analysis and design of the water tunnel retaining system on the Mashhoureh Dam, Journal of the Iranian Society of Engineering Geology, No. 1 and 2, pp. 97-111.

Singh, B., Goel, R. K. (2011). Engineering Rock Mass Classification, *Elsevier Inc*, 382.

Somodi, G., Bar, N., Kovács, L., Arrieta, M., Török, A., Vásárhelyi, B. (2021). Study of Rock Mass Rating (RMR) and Geological Strength Index (GSI) Correlations in Granite, Siltstone, Sandstone and Quartzite Rock Masses, *Applied Science*, 11, 13.

Sonmez, H., Ercanoglu, M., Dagdelenler, G. (2021). A novel approach to structural anisotropy classification for jointed rock masses using theoretical rock quality designation formulation adjusted to joint spacing, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8, 329-345.

Thai, D. K., Nguyen, D. L., Pham, T. T. (2021). Safety Assessment of Underground Tunnel Subjected to Missile Impact Using Numerical Simulation, *Computer and Concrete Journal*, 1, 1-12.

Tong, Y., Yue, Y., Huang, Z., Li, Z., Zhu, L., Zhang, W. (2022). Modified RMR Rock Mass Classification System for Preliminary Selection of Potential Sites of High-Level Radioactive Waste Disposal Engineering, *Sustainability*, 14, 1-17.

Zhang, L. (2016). Determination and applications of rock quality designation (RQD), Journal of *Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8, 389-397.

Tunneling & Underground Space Engineering

(TUSE)

tuse.shahroodut.ac.ir

Volume 11-Issue 4\Winter 2023

نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی

Optimization of rock mass rating (RMR) classification for jointed rocks for underground structures

A. Alijani[1*]; R. Ajallouian[2]; A. Arbab[3]; R. Dodangeh[4]

1- Ph.D. Student; Faculty of Science, University of Isfahan, Alirezaalijani2014@gmail.com

2- Professor; Faculty of Science, University of Isfahan, Rasajal@sci.ui.ac.ir

3- Structure Management; M.Sc. in Civil Engineering, Arbabnoosh@gmail.com

4- Tunnel and Structure Management; Ph.D. Student in Underground Structure Engineering, Rezadodeg@gmail.com

Received: 27 Nov 2023; Accepted: 14 Dec 2024

DOI: 10.22044/tuse.2024.13887.1484

Keywords

Underground structure

RQD index

RMR classification

Jointing factor

Phase2 software

Extended Abstract

Summary

Underground structures, as the most important structures of our country, have a direct relationship with the national security and economy power of the country, and their design, implementation and maintenance are very necessary. Conducting the experimental classification of the rock mass is a very useful tool in evaluating the quality of the rock mass and designing the reinforcements, and also, it provides a good view of the behavior of the rock in the face of the tunnel. Classification of rock mass rating (RMR) is one of the most important and efficient methods of rock mass classification, which has been used in the past until today, but it has some shortcomings in the correct estimation of rock mass behavior. In this research, 10 sites of defense projects in different rock mass conditions, including weak and very jointed rocks, and suitable conditions have been examined. The defense projects have been analyzed experimentally, and also, numerically using Phase2 software. The experimental and numerical results of this research show that, in general, the use of rock mass classification can be very useful in evaluating the characteristics of rock mass. Moreover, the use of the RMR in rocks having good conditions correctly evaluate the rock mass and is considered as a suitable design basis. However, in weak rocks, there are flaws in the evaluation, and instead of the rock quality designation (RQD) parameters and discontinuity spacing, the jointing factor can be used. In this manner, the results are better compatible with the real conditions and numerical analysis. Furthermore, the results of the proposed reinforcements have been examined. These results show that the RMR classification works well for semi-stable rocks (RMR>50), but for weak rocks (RMR<50), it is better to analyze the rock mass by modified RMR, which considers jointing factor.

Introduction

One of the most important aspects of tunneling project is its protection. The construction of underground structures as safe structures helps to preserve people's lives and cover transport achievements. One of the most important challenges in the construction of underground structures is to design these structures when facing different geological conditions. Classification of rock mass engineering is one of the most effective methods in determining rock mass conditions, assessing instabilities and determining consolidations and drilling methods. Rock mass rating (RMR) classification is widely used worldwide to evaluate the rock mass. However, the excavation experience has shown that this classification is not effective in some rock conditions and needs some corrections.

Methodology and Approaches

In this research, the parameters of RMR classification have been investigated and considering some flaws in the rock quality designation (RQD) system as an influencing factor in this classification, and also, the experiences gained from 10 tunnel projects in different rock conditions, it is observed that using jointing factor instead of total RQD parameters and spacing of joints can provide better results for the rock mass evaluation. The results of RMR findings have also

been evaluated by numerical analysis using Phase2 software and the accuracy of the results has provided more suitable values.

Results and Conclusions

Field investigations and software analyzes of 10 tunnel projects of underground structures show that the classification of RMR in suitable rock mass conditions (RMR>50), which is observed in projects 1 to 6, is a suitable assessment of the rock mass conditions in the analysis, and provides stability and estimation of consolidations. However, in weaker rocks (RMR<50), which is observed in projects 7 to 10, using the joint factor instead of RQD parameters and joint spacing can provide better results and is in better agreement with numerical analysis and observed experimental results.