

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

مقاله پژوهشی

علیرضا علیجانی^{۱*}؛ رسول اجل لوئیان^۲؛ ابوذرا ارباب^۳؛ رضا دودانگه^۴

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

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

۳- مدیر سازه؛ کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه امام حسین (ع)، Arbabnoosh@gmail.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: ۱۴۵ تا ۱۶۰

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2024.13887.1484

واژگان کلیدی	چکیده
سازه‌های زیرزمینی	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 مواجهه 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

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

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

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 (Bieniawski, 1989; Russo, 2014). در جدول ۲، توصیف توده سنگ و تحکیمات لازم نشان داده شده است.

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 (Bieniawski, 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 et al., 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 پاسخگویی نیاز طراحی برای ارزیابی تحکیمات سازه‌های

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

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

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

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

می‌توان روش حفاری، مدت زمان پایداری و تحکیمات مورد نیاز برای پایدارسازی تونل را ارایه نمود.

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،

۳- فاکتور درزه داری

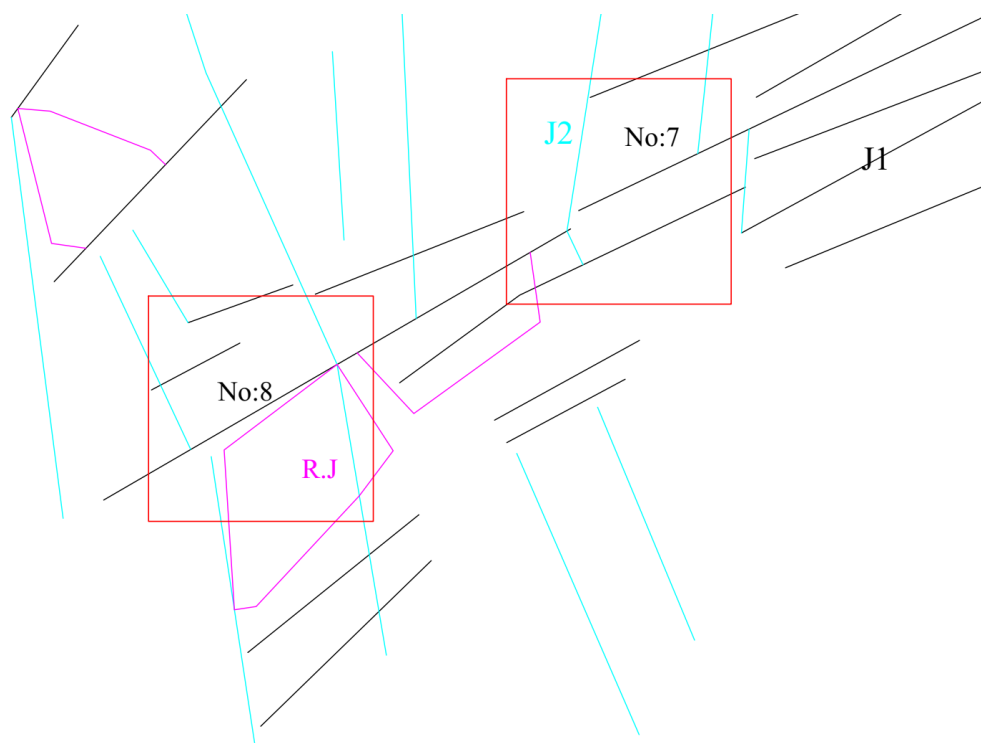
همانطور که بیان شد، میزان درزه داری در ارزیابی توده سنگ حایز اهمیت ویژه‌ای بوده که در این رده بندی به صورت شاخص RQD و فاصله داری درزه‌ها محاسبه شده است. برای محاسبه این شاخص در سطح زمین به دلیل عدم وجود مغزه‌های حفاری از فرمول پالمسترام 1980 ($RQD = Jv \cdot 3.3 - 115$) استفاده می‌شود که در آن Jv (تعداد 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 $15-100\text{ cm}$ 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)



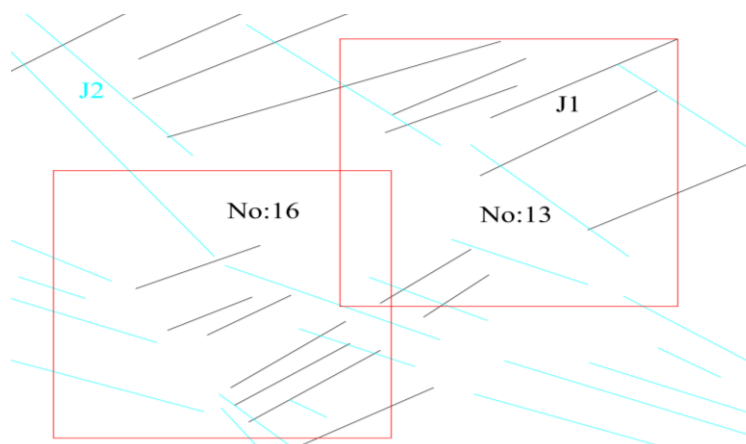
شکل ۲- طرح شماتیک درزه داری و محاسبه J_v

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)

بهبودسازی رده‌بندی امتیاز توده سنگ (RMR) برای سنگ‌های درزه‌دار ...، علیرضا علیجانی و ...، ص ۱۴۵-۱۶۰



شکل ۴- طرح شماتیک درزه داری و محاسبه J_v

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

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

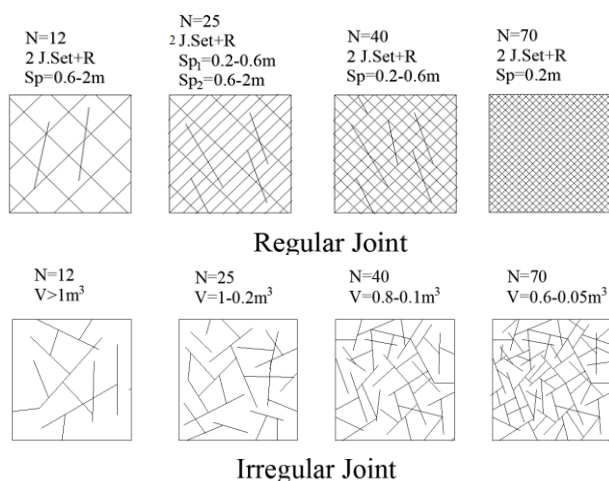
امتیاز	میزان	پارامتر
4	40-50	UCS (MPa)
17	88-92	RQD %
10	0.2-0.4	Spacing (m)
2-4	2-4	Persistence (m)
3-5	S.W to M.W	Weathering
1	1-3	Aperture (mm)
4-6	No	Filling
10-15	Dry to damp	Water
(-5)	Perpendicular with and against dip	Orientation
$RMR=50-60(-5)=45-55(III)$ Bolt sp=1.5-2m, 5-10cm Sh		

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

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

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 $25 m^2$ سطح زمین یا داخل فضای زیرزمینی (مربعی به ابعاد 5×5 متر یا دایره‌ای به قطر حدود $5/5$ متر) با امتیاز حداکثر ۴۰ استفاده نمود (شکل ۵). در این شکل V : تعداد درزه‌ها در $25m^2$ ، J : دسته درزه، Sp : فاصله درزه‌ها، V : حجم بلوک سنگی به m^3 و R : درزه‌های تصادفی است. با توجه به بررسی‌های انجام گرفته امتیاز دهی فاکتور درزه داری مطابق جدول ۵، می‌باشد.

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 ۴، 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



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

اصلاح شده و تحکیمات ارایه شده را نشان داده و جدول ۶، محاسبات RMR و RMR (et al., 2021). جدول ۶، 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.

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

جدول ۵- اصلاح رده بندی RMR با فاکتور درزه داری

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

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

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

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

پروژه	شرایط توده سنگ	اصلاحی RMR		تحلیل عددی تونل
		فاکتور درزه داری	RMR و تحکیمات	
۳	توف و آگلومرا، دو دسته درزه با فاصله $0.2-0.6m$ بدون پرشدگی، هوازگی کم، خشک	۲۷	۵۵-۵۰ (بولت) سیستماتیک فاصله ۲-۱،۵ متر، ۵- 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، هوازگی کم تا متوسط، خشک تا مرطوب	۲۵	۶۰-۵۵ (بولت) سیستماتیک فاصله ۲-۱،۵ 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، هوازگی کم، مرطوب	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، هوازگی کم تا متوسط، پرشدگی کلسیت و رس، مرطوب	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 $0.2m$ هوازگی متوسط، پرشدگی رس، آبدار	۵۲	۳۰-۲۸ (بولت) سیستماتیک فاصله ۱،۵-۱ متر، ۱۰- 15cm 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

بهبودسازی رده‌بندی امتیاز توده سنگ (RMR) برای سنگ‌های درزه‌دار ...، علیرضا علیجانی و ...، ص ۱۴۵-۱۶۰

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

پروژه	شرایط توده سنگ	اصلاحی RMR		تحلیل عددی تونل
		فاکتور درزه داری	RMR و تحکیمات	
۸	آهک، کاملاً خرد شده، چهاردسته درزه با فاصله حدود 0.1-0.2m، هوازدگی متوسط، بدون پرشدگی، خشک	>70	۳۷-۳۵ (بولت) سیستماتیک فاصله ۱-۱.۵ متر، 10-15cm شاتکریت، قاب سبک فاصله ۱.۵ متر)	GSI=30 E=1500 m _m =0.2 S=0.00009 جابجایی بیشینه=40mm 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	۴۶	۴۰-۳۶ (بولت) سیستماتیک فاصله ۱-۱.۵ متر، 10-15cm شاتکریت، قاب سبک فاصله ۱.۵ متر)	GSI=35 E=1600 m _m =0.25 S=0.00008 جابجایی بیشینه=30mm 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	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=25mm 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)
۱ تا ۶ پروژه‌های	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 شاتکریت	9-27	RMR>50 بولت فاصله 1.5-2m شاتکریت	GSI=50-70 mm=2.4 Em=12000 MPa S=0.011 σ _l =5.3 MPa	تحکیمات موضعی (سنگ) نسبتاً 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 ۱۰ تا ۷	سه دسته یا بیشتر ناپیوستگی با فاصله متوسط $0.2m$ دارای پرشدگی، مرطوب یا آبدار	$RMR=28-42$ بولت فاصله $1-$ $10-15cm$ با $1.5m$	$40-70$	$RMR=40-50$	$GSI=25-40$ $mm=0.7$ $Em=2200$ MPa $S=0.0005$ $\sigma I=0.8 MPa$	قاب فولادی $IPE160$ با $15cm$ شاتکریت (سنگ ناپایدار)

بر اساس نتایج به دست آمده با توجه به شکل ۶ و شکل ۷، جدول ۶ تا جدول ۸، در سنگ‌هایی با $RMR=40-$ و $50 < GSI$ ، میزان جابجایی رخ داده 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 25 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 < 40) 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.

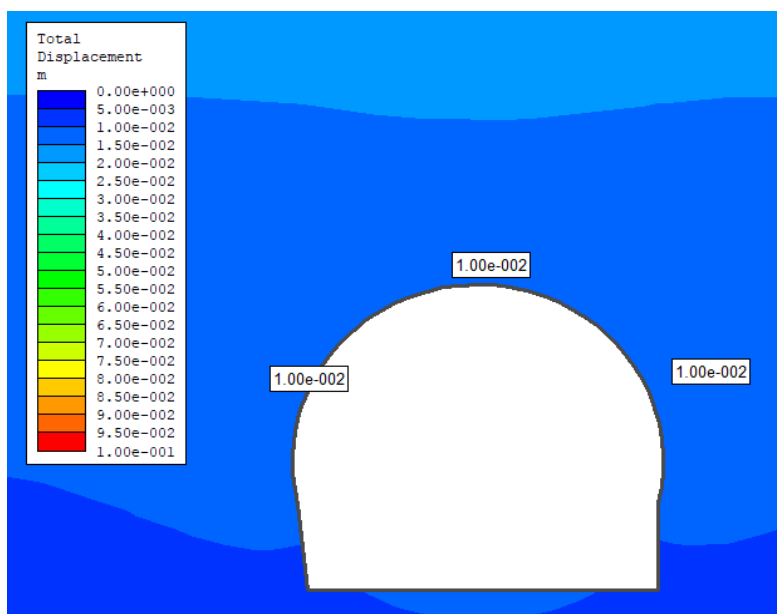
برای تحلیل پایداری سازه‌های زیرزمینی، ارزیابی میزان جابجایی توده سنگ و دانستن میزان جابجایی مجاز بسیار ضروری می‌باشد. روش ساکورایی بر اساس سه هشدار اصلی خطر (طراحی کوتاه مدت، طراحی اصلی و طراحی بلند مدت) سه فرمول ارائه داده است (Nouri Sartangi et al., 1400 ; Sabzevari Dehkaboud et al., 2018 ; Bahadori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

رابطه (۱) $Log \epsilon = -0.25 Log E - 0.85$
 رابطه (II) $Log \epsilon = -0.25 Log E - 1.22$
 رابطه (III) $Log \epsilon = -0.25 Log E - 1.59$
 در این رابطه $\epsilon =$ کرنش بحرانی و $E =$ مدول یانگ توده سنگ (MPa) می‌باشد. با تعیین میزان کرنش بحرانی از فرمول‌ها، میزان جابجایی مجاز توده سنگ ($U = \epsilon a$) به دست می‌آید که $U =$ جابجایی مجاز (cm) و $a =$ شعاع تونل (cm) می‌باشد (جدول ۸).

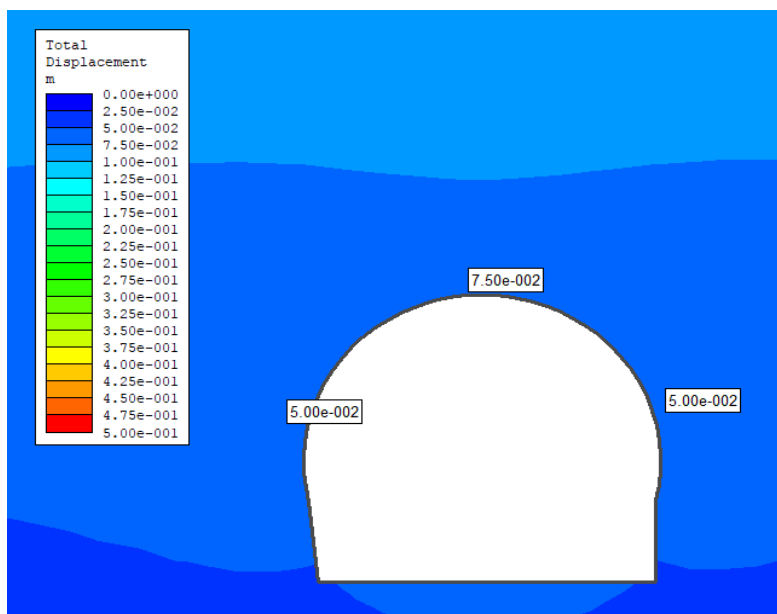
جدول ۸- محاسبه میزان جابجایی مجاز توده سنگ بر

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

بهبودسازی رده‌بندی امتیاز توده سنگ (RMR) برای سنگ‌های درزه‌دار ...، علیرضا علیجانی و ...، ص ۱۴۵-۱۶۰



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

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

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

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.

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

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.
- Bieniowski, 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.

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

A. Alijani^{1*}; R. Ajallouian²; A. Arbab³; R. Dodangeh⁴

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.