بررسی پارامترهای مؤثر بر سیستم پایداری تونل‌ها با بهره‌گیری از روش سیستم مهندسی سنگ RES

مهدی تلخابلو[1*]، سید محمود فاطمی عقدا[2]، حبیب اله حیدری رنانی[3]

۱. استادیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
۲. استاد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
۳. دانشجوی دکتری، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۰۴ تاریخ **پذیرش:** ۱۴۰۱/۰۵/۲۱

چکیده

پایدارسازی فضاهای زیرزمینی از چالش برانگیزترین مباحث در زمین‌شناسی‌مهندسی هستند. روش‌های مختلفی برای تعیین نوع سیستم پایدارسازی تونل وجود دارد، اما اغلب این روش‌ها دارای نقاط ضعف متعددی هستند. بنابراین ارائه یک روش که تقریباً تمامی پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل را لحاظ نموده و اثر متقابل آن‌ها را بر یکدیگر در نظر بگیرد، کمتر موردتوجه قرار گرفته است. هدف از این تحقیق مطالعه پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل‌ها با استفاده از روش سیستم مهندسی سنگ است. در این تحقیق ۶ تونل با ویژگی‌های زمین‌شناسی متفاوت انتخاب شد. پارامترهای مؤثر بر سیستم پایداری این تونل‌ها با استفاده از روش ESQ کدگذاری گردید. سپس تحلیل‌ها با استفاده از روش سیستم مهندسی سنگ RESبه‌منظور برآورد و ارزیابی سیستم پایدارسازی تونل انجام گردید. نتایج نشان داد پارامترهایی همچون هوازدگی سطح درزه، پرشدگی و فاصله‌داری درزه‌ها نقش مؤثر بیشتری نسبت به جهت گیری درزه ها و مقاومت فشاری تک محوری دارند. به‌منظور مقایسه، تحلیل‌ها با روش رتبه‌بندی توده سنگRMR نیز انجام شد. مقایسه میان نتایج دو روشRES و RMRنشان داد که نتایج روش RES همخوانی بهتری با شرایط واقعی تونل و مقادیر ضخامت شاتکریت پیشنهادی به عنوان سیستم پایدارسازی تونل‌های مورد مطالعه دارد. ازآنجا که هیچ محدودیتی در تعداد پارامترهای ورودی در این روش وجود ندارد و از طرفی تأثیر متقابل پارامترها بر یکدیگر در نظر گرفته می‌شود، می‌توان روابط حاصل از روش RES در این تحقیق را در کنار سایر روش‌ها، در پروژه‌های مهندسی به کار برد.

کلید واژه‌ها: فضاهای زیرزمینی، سیستم مهندسی سنگ، رده‌بندی توده سنگ، شاتکریت، سیستم پایداری تونل.

مقدمه

پایداری فضاهای زیرزمینی مانند تونل‌های راه و راه آهن، مغار نیروگاه‌های برق- آبی، تونل‌های انتقال آب و فضاهای زیرزمینی معدنی از مهم‌ترین مسائل مربوط به پژوهش‌های عمرانی و معدنی به شمار می‌آید. عوامل متعددی بر پایداری فضاهای

* نویسنده مسئول: Talkhablou@khu.ac.ir
DOI: http://doi.org/10.22034/JEG.2022.16.2.1014281

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1014281]

زیرزمینی اثر می‌گذارند. این عوامل قبل یا در حین حفاری اندازه‌گیری می‌شوند. سپس به‌منظور ارائه یک روش پایدارسازی، عوامل مذکور مورد تحلیل قرار می‌گیرند.

هدف از تحقیق حاضر، بررسی پارامتر های موثر بر پایداری تونل با استفاده از روش سیستم مهندسی سنگ می باشد. در این تحقیق ۶ تونل مختلف که در واحدهای چینه‌شناسی متفاوتی حفاری شده‌اند برای مطالعه و بررسی انتخاب شدند. این تونل‌ها دارای شرایط زمین‌شناسی‌مهندسی متفاوتی هستند(جدول ۱ و شکل ۱). روش حفاری همه تونل¬ها به‌صورت انفجاری با سطح مقطع تقریباً مساوی بوده است و تمامی تونل‌ها حین حفاری Mapping شده‌اند. با توجه به حداکثر عمق حفاری، این تونل‌ها در رده عمیق تا نیمه عمیق قرار می‌گیرند. بنابراین موضوع هوازدگی سطحی در پایداری، عملاً کم اثر خواهد بود.

تعدادی از سیستمهای طبقه‌بندی توده سنگ، از زمانی که ترزاقی مطالعه خود در مورد طبقه‌بندی فاکتور بار سنگ برای طراحی پایداری تونل را ارائه نمود ، توسعه یافته است (Yan-jun et al., 2017). در بین سیستمهای طبقه‌بندی توده سنگ، رده‌بندی توده سنگ (RMR) و شاخص کیفیت تونل (Q) سیستم‌های پذیرفته شده بین‌المللی برای طراحی پشتیبانی هستند که به‌طور گسترده در زمینه تونل‌سازی استفاده می‌شوند (Barton and Bieniawski, 2008; Barton and Grimstad, 2014; Pells et al., 2017). طبقه‌بندی RMR که در سال ۱۹۷۳ به‌عنوان یک سیستم طبقه‌بندی سنگ درزه‌دار پیشنهاد شد(Bieniawski, 1973)، چندین بار اصلاح شده و در سال‌های ۱۹۸۹ و ۲۰۱۴ بازبینی‌های عمده‌ای در ویژگی‌ها و ساختار آن انجام شده است (Bieniawski, 1989; Celada et al., 2014).

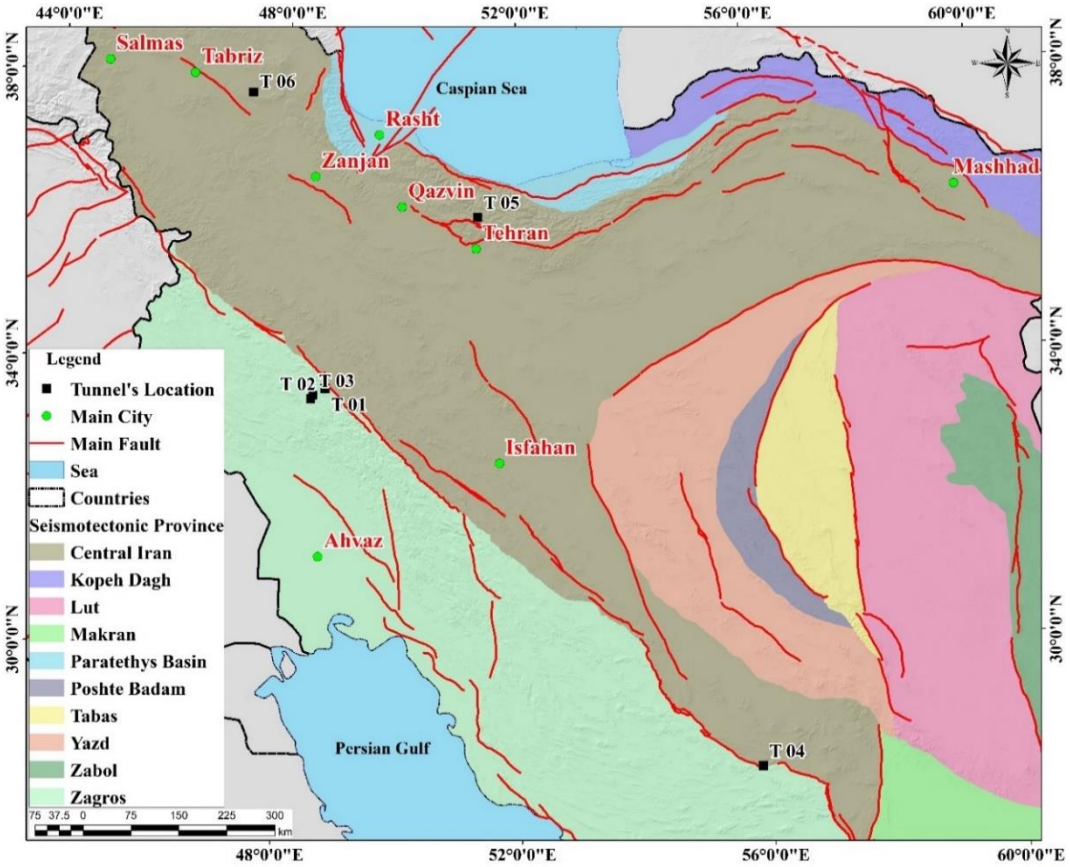
جدول ۱. ویژگی تونل‌های مورد مطالعه در این تحقیق

Table 1. Specifications of Selected Tunnels for Study

Name	Location	Local Name	Usage	Length(m)	Maximum depth(m)	Lithology
1	Dorud-Khoramabad	42	Rail Road	650	100	Limestone
2	Dorud-Khoramabad	83	Rail Road	300	30	Shale
3	Dorud-Khoramabad	78	Rail Road	3700	300	Conglomerate
4	Persian Gulf water transfer	Hajiabad	water transfer	3000	200	Serpentine - Flysch
5	North Tehran freeway	39	Road	600	50	Tuff
6	Orumieh	water transfer	water transfer	1100	80	Andezite

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1014281]



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی تونل‌های مورد مطالعه در کشور ایران. اطلاعات گسل‌ها برگرفته از (Berberian, 2014; Habibi et al., 2023; Jarahi, 2021).

Fig. 1. Geographical Locations of Investigated Tunnels in Iran. Fault data extracted from sources (Berberian, 2014; Habibi et al., 2023; Jarahi, 2021).

کاربرد روش سیستم مهندسی سنگ در سال‌های اخیر بسیار گسترده شده است. در این روش می‌توان اثر دو عامل را بر یکدیگر به‌طور هم‌زمان مورد بررسی قرار داد. به‌طور کلی، برای حفاری‌های زیرزمینی، پارامترهای مؤثر در پایداری، شدت تعامل بیشتری نسبت به شیب‌های سنگی نشان می‌دهند که دلیل آن می‌تواند ارتباط نزدیک‌تر سیستم توده سنگی زیرزمینی نسبت به سطحی باشد(Hudson and Feng, 2015).

روش سیستم مهندسی سنگ به‌عنوان روشی مؤثر در تحلیل سازوکارهای پیچیده و حل مسائل مهندسی سنگ گسترش یافته است(Hudson, 1992). طبق تئوری سیستم مهندسی سنگ، همه طبقه‌بندی مهندسی سنگ را می‌توان به‌صورت تابعی از عوامل قطری ماتریس اندرکنش در نظر گرفت. انتخاب عوامل و وزن دهی آن‌ها در سیستم طبقه‌بندی توده سنگ با کدگذاری ماتریس اندرکنش تعیین می‌شود. بنابراین می‌توان مقایسه‌ای میان دو روش RES و RMR در بحث پایداری تونل‌ها ، انجام داد.

در این تحقیق بین دو روش RES و RMR مقایسه‌ای صورت گرفته و ضعف‌ها و نقاط قوت این دو روش مورد بررسی قرار گرفته است. باآنکه روش RMR توسعه یافته و اصلاح گردیده است اما ضعف‌های عمده‌ای در آن وجود دارد که نیازمند بررسی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1014281]

است. تعداد پارامترهایی که در روش RMR استفاده می‌شوند محدود هستند و نمی‌توان پارامتر جدیدی را به این روش اضافه نمود. هر پارامتر می‌تواند بر پارامتر دیگر اثر متقابل داشته باشد و موجب تقویت یا ضعف در مقدار پارامتر دیگر شود که این موضوع در روش RMR قابل بررسی نیست. از طرفی پارامترهای مهمی همچون ضخامت روباره، تنش برجا (تنش تکتونیکی) و لیتولوژی، در روش RMR در نظر گرفته نمی‌شود. مقاومت فشاری تک محوری به‌عنوان یک پارامتر با ارزش در این طبقه‌بندی گنجانده می‌شود درحالی‌که مقاومت فشاری سنگ بکر به‌تنهایی نقش قابل توجهی در تعیین پایدارسازی مورد استفاده در تونل ندارد.

در مطالعات گل‌محمدی و بیگدلی (Golmohammadi and Bidgoli, 2023) با استفاده از روش RES، به بهبود سیستم Q پرداخته شد. آنها شش پارامتر اصلی شامل توده سنگ شامل تعیین کیفیت سنگ(RQD) ، عدد مجموعه درز(Jn) ، عدد زبری درزه(Jr) ، عدد دگرسانی درزه(Ja) ، پارامتر آب درزه (Jw) و فاکتور کاهش استرس (SRF) را بررسی نمودند. گل-محمدی و بیگدلی (Golmohammadi and Bidgoli, 2023) از داده های ژئومکانیکی جمع آوری شده از تونل انتقال آب سد آزاد برای ساخت ماتریس اندرکنش سیستم Q استفاده نمودند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که ماتریس برهمکنش تشکیل شده، تخمین معقولی از پارامترهای موثر در سیستم Q ارائه می دهد. از بین شش پارامتر سیستمQ ، پارامترهای SRF و Jr به ترتیب بیشترین و کمترین تاثیر را بر سیستم دارند و همچنین پارامترهای RQD و Jw به ترتیب بیشترین و کمترین تاثیر را بر روی سیستم دارند. در مطالعه دیگری توسط گل‌محمدی و همکاران (Golmohammadi, 2024)، از روش RES برای توسعه مدل های پرتاب سنگ در انفجارات معدنی در معدن سنگون استفاده نمودند. آنها ۱۳ پارامتر موثر بر روی پرتاب سنگ ناشی از انفجار به عنوان ورودی و فاصله پرتاب سنگ و سطح ریسک‌های مرتبط به عنوان خروجی در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داد که برای ۴۷ انفجار انجام‌شده در معدن مس سنگون، سطح خطرات برآورد شده بیشتر مطابق با فواصل اندازه‌گیری شده پرتاب سنگ است. مطالعه اخیر خسرونژاد و همکاران (Khosronezhad et al., 2023) که بر روی پهنه بندی مناطق حساس به زمین لغزش استان تهران صورت گرفته است، کارآمد بودن روش RES به عنوان یک روش با قابلیت وزن دهی دو جانبه به علت-معلول هر پارامتر، مورد استفاده قرار گرفت. در مطالعه یاد شده، یک رابطه ریاضی پویا برای مطالعه زمین لغزش در ناحیه البرز مرکزی معرفی گردید که می تواند با تغییر ضرائب وزنی، در دیگر نقاط کشور مورد استفاده قرار گیرد. خسرونژاد و همکاران (Khosronezhad et al., 2023) نشان دادند که همخوانی بسیار مطلوبی میان نتایج روش RES و موقعیت زمین لغزش هایی که قبلا در تهران به وقوع پیوسته است، وجود دارد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق ۶ تونل مختلف که در واحدهای چینه‌شناسی متفاوتی حفاری شده‌اند برای مطالعه و بررسی انتخاب شدند. ابتدا مپینگ زمین‌شناسی تونل‌های مورد مطالعه تهیه و مواردی همچون سنگ‌شناسی، درزه‌ها، عمق آب زیرزمینی و .... در آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. سپس پارامترهای مورد نیاز برای هر دو روش RMR و RES محاسبه شد. با توجه به تشابه سیستم نگهداری در بخش‌های مختلف تونل از یک سو و یکدست بودن توده سنگ از نظر لیتولوژی و وضعیت ساختاری توده

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1014281]

سنگ تشکیل دهنده تونل از سوی دیگر، مقادیر پارامترهای مذکور، به‌صورت میانگین برای هر یک از تونل‌ها در نظر گرفته شد.

برای اعمال سیستم طبقه‌بندی RMR ، یک ساختگاه معین باید به تعدادی واحد ساختاری زمین‌شناسی تقسیم شود به‌گونه‌ای که هر نوع توده سنگ با یک واحد ساختاری زمین‌شناسی جداگانه نشان داده شود. در روش طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ RMR ، شش پارامتر زیر برای هر واحد ساختاری تعیین و از رابطه ۱ محاسبه می‌شود (Bieniawski, 1974):

$$RMR = R_S + R_{RQD} + R_{SD} + R_{CD} + R_W + R_{OD} \quad (۱)$$

R_S: مقاومت فشاری تک محموری

R_{RQD}: کیفیت سنگ

R_{SD}: فاصله درزه ها و ناپیوستگی ها

R_{CD}: شرایط درزه ها

R_W: شرایط آب زیر زمینی

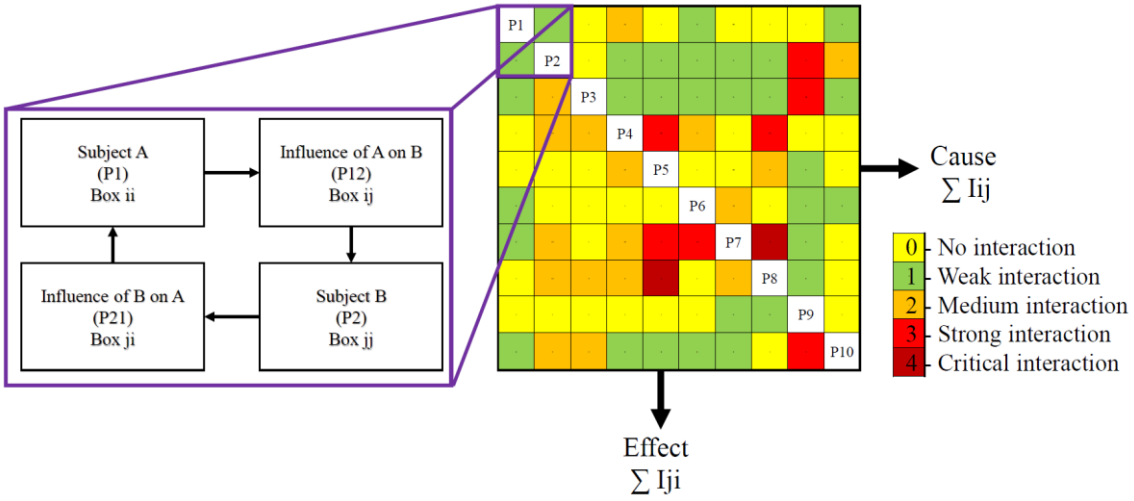
R_{OD}: جهت گیری درزه ها

روش سیستم مهندسی سنگ RES ، یک ابزار ضروری برای نشان دادن پارامترها با درجه نفوذ بالا در مسائل مرتبط با مهندسی سنگ است(Hudson, 1992). در این روش ۱۰ پارامتر اصلی مؤثر بر پایداری موقت تونل انتخاب و با استفاده از تجارب مهندسی، هر یک به ۵ رده تقسیم‌بندی شد. پس از آن امتیاز دهی به این پارامترها برای تونل‌های مذکور انجام گردید و نتایج حاصل با داده‌های روش RMR مقایسه شد.

رویکرد RES شامل سه مرحله کلیدی است که عبارت‌اند از شناسایی پارامترهای تأثیرگذار، ساخت یک ماتریس تعامل و رتبه‌بندی پارامترها بر اساس تأثیر آن‌ها. ماتریس تعامل مورد استفاده برای توصیف پارامترهای کلیدی و تعامل آن‌ها در ساختار RES جزء اصلی رویکرد RES است. ساختار ماتریس برهم‌کنش به گونه‌ی است که پارامترهای اولیه مؤثر بر سیستم در امتداد قطر مرکزی ساختار ماتریس قرار دارند. مقادیر کدگذاری شده که درجه برهم‌کنش آن‌ها را ثبت می‌کنند در سلول‌های عمود بر ماتریس هستند(Hudson, 2013). شرح ساختار ماتریسی دو پارامتری و ایده گسترده کدگذاری ساختارهای ماتریس تعامل در شکل ۲ نشان داده شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1014281]



شکل ۲: اصول عملیاتی و معنای فیزیکی ماتریس تعامل

Fig. 2. Operating principles and physical meaning of the interaction matrix

پنج روش برای کدگذاری در ساختار ماتریس تعامل وجود دارد. این روش‌ها عبارت‌اند از: نیمه کمی خبره (ESQ[1])، کدگذاری باینری، کمّی پیوسته(CQC[2]) (Hudson, 1992; Yang and Zhang, 1998)، نیمه کمی خبره احتمالی (PESQ[3]) و روش خبره(Naghadehi et al., 2011). بااین‌حال، روش ESQ به دلیل درک بهتر آن بیشتر از سایر روش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق، از روش ESQ برای تخصیص کد به رابطه بین پارامترها در ماتریس تعامل، استفاده شده است. توصیف شدت تعامل با نمایش عددی است، که در آن ۰ به معنای عدم تعامل[4]، ۱ برهم‌کنش ضعیف[5]، ۲ برهم‌کنش متوسط[6]، ۳ برهم‌کنش قوی[7] و ۴ به معنای تعامل بحرانی[8] است(Faramarzi et al., 2013; Hudson and Feng, 2015)(شکل ۲). مزیت این روش این است که تعداد پارامترها در ماتریس برهم‌کنش هیچ محدودیتی ندارد(Feng et al., 2013; Hudson, 2013). کدگذاری برهم‌کنش پارامترها در ساختار ماتریس با درج تعداد وزن اندرکنش دو پارامتر در سلول عمود بر آن‌ها انجام می‌شود. مجموع مقادیر افقی هر یک از پارامترها در ساختار، اندازه‌گیری تأثیر پارامتر جداگانه بر ساختار ماتریس است که علت (Ci) پارامتر نامیده می‌شود (رابطه ۲). مجموع مقادیر عمودی تأثیر ساختار ماتریس بر پارامتر را اندازه‌گیری نموده که به‌عنوان اثر (Ei) پارامتر (رابطه ۳) شناخته می‌شود(Benardos and Kaliampakos, 2004). جمع و تفریق علت و معلول هر یک از پارامترها معیار اهمیت آن‌ها در ماتریس برهم‌کنش است که به ترتیب به‌شدت و غلبه تعاملی معروف است. تجزیه و تحلیل اهمیت پارامترها برای ساختار ماتریس تعامل با رسم مقادیر مختصات اثر در برابر علت است. یک خط مورب در نمودار علت و معلول، نقاطی با ارزش مساوی علل و معلول را نشان می‌دهد، که نشان دهنده نقطه کانونی است که در آن تسلط و تبعیت آن‌ها برای همه پارامترها در تعادل است. پارامترهایی که در سمت راست خط مورب قرار دارند، آن‌هایی

[1] Expert Semi-Quantitative
[2] Continuous Quantitative Coding
[3] Probabilistic Expert Semi-Quantitative
[4] No Interaction
[5] Weak Interaction
[6] Medium Interaction
[7] Strong Interaction
[8] Critical Interaction

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1014281]

هستند که مقدار عامل بیش از اثرات دارند که به‌عنوان پارامترهای غالب شناخته می‌شوند. درحالی‌که آن‌هایی که علل کمتری نسبت به اثرشان دارند در سمت چپ قرار دارند و پارامترهای فرعی هستند. ضریب وزنی (a_i) هر پارامتر در سیستم که مجموع درصد علت و معلول است با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می‌شود(Hudson, 1992, 2013).

$$C_{pj} = \sum_{j}^{n} = 1^{I_{ji}} \quad (۲)$$

$$E_{pj} = \sum_{i}^{n} = 1^{I_{ji}} \quad (۳)$$

$$a_i = \frac{C_i + E_i}{(\sum C_i + \sum E_i)} \times 100 \quad (۴)$$

که Ci علت پارامتر iام و Ei اثر پارامتر iام است.

انتخاب عوامل اصلی در ارزیابی پایداری، مهم‌ترین موضوع سیستم‌های مهندسی سنگ و تشکیل ماتریس اندرکنش است. با استفاده از نظرات کارشناسی، شرایط خاص منطقه و تجربه‌های عملی در مسائل پایداری فضاهای زیرزمینی می‌توان عوامل اصلی ماتریس اندرکنش را تعیین نمود. در این تحقیق با توجه به شرایط ساختگاه، کیفیت عمومی توده سنگ و تنوع سنگ‌شناسی، ۱۰ عامل اصلی مؤثر بر پایداری فضاهای زیرزمینی انتخاب شده‌اند. این عوامل عبارت‌اند از:

P1: Strength of Intact Rock, P2: Jointing Pattern, P3: Joint spacing P4: Joint surface weathering, P5: Joint Separation, P6: Joint surface Roughness, P7: Joint Filling, P8: Groundwater Condition, P9: In-situ Stress Condition, P10: Joint Orientation .

سپس هر یک از این پارامترها بر اساس تجربه‌های مهندسی، به ۵ رده طبقه‌بندی شدند(جدول ۲). در گام بعدی بر اساس رده‌بندی‌های موجود، نتایج RES همانند RMR، به پایداری تونل نسبت داده شدند. در این راستا بر اساس مطالعات موجود (Jarahi and Seifilaleh, 2016; Khatik and Nandi, 2018; Komurlu and Demir, 2019; Lowson and Bieniawski, 2013; Singh and Goel, 2011)، رده‌بندی شاخص پایداری تونل بر اساس داده‌های RES به ۵ رده صورت گرفت(جدول۳). مقادیر حاصل از روابط RES در بازه ۰ تا ۱۰۰ هستند و آن‌ها به ۵ رده با فواصل ۲۰ تایی تقسیم‌بندی شدند. بدین صورت که رده ۰-۲۰ پایین ترین امتیاز و رده ۸۰-۱۰۰ بالاترین امتیاز را خواهد داشت و مقایسه نتایج با روش RMR ساده‌تر خواهد بود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1014281]

جدول ۲: طبقه‌بندی پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل بر اساس تجربه‌های مهندسی

Table 2. Classification of parameters affecting tunnel stability based on engineering experiences

1. Strength of Intact Rock	**Grade**	**6. Joint surface Roughness**	**Grade**
Extremely weak (<1 MPa)	0	Slicken sided	0
Very weak (1-5 MPa)	1	Smooth	1
weak (5-20 MPa)	2	Slightly rough	2
Medium Strength (20-50 MPa)	3	Rough	3
Strong (>50 MPa)	4	Very rough	4
2. Jointing Pattern	**Grade**	**7. Joint Filling**	**Grade**
Crushed	0	Swelling clay materials	0
4 joint sets	1	Soft, cohesive materials	1
3 joint sets	2	Hard, cohesive materials	2
1 joint set	3	Friction materials	3
Massive	4	No filling	4
3. Joint spacing	**Grade**	**8. Groundwater Condition**	**Grade**
Very small spacing (<5 cm)	0	Flowing	0
Small spacing (5-20 cm)	1	Dripping	1
Moderate spacing (20-50 cm)	2	Wet	2
Large spacing (50-100 cm)	3	Damp	3
Very large spacing (>100 cm)	4	Completely dry	4
4. Joint surface weathering	**Grade**	**9. In-situ Stress Condition**	**Grade**
Decomposed	0	Very High	0
Highly Weathered	1	High	1
Moderately Weathered	2	Medium	2
Slightly Weathered	3	Low	3
Unweathered	4	Very Low	4
5. Joint Separation	**Grade**	**10. Joint Orientation**	**Grade**
Separated (>5 mm)	0	Angle between J & D <30 , 75>dip>60	0
Separated (1-5 mm)	1	Angle between J & D <30 , 60>dip>30	1
Mostly Separated (Width<1 mm)	2	Other Condition	2
Partly Separated (Width<1 mm)	3	Angle between J & D >60 ,80 >dip>60	3
No Separation	4	Angle between J & D >60 , dip>80	4

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1014281]

جدول ۳. رده‌بندی شاخص پایداری تونل بر اساس داده‌های RES
Table 3. Classification of tunnel stability index based on RES data

Class	Adjusted RES	Stability Index
1	0-20	Very poor
2	20-40	Poor
3	40-60	Fair
4	60-80	Good
5	80-100	Very good

تجزیه و تحلیل

برای تمامی تونل‌های مورد مطالعه، مقدار پارامترهای اثرگذار بر RMR و RES برآورد شد. سپس بر اساس روابطی که در بخش قبل توضیح داده شد، تحلیل‌ها صورت گرفت. در محاسبات RMR (جدول ۴) مقدار هر متغیر بر اساس مشاهده میدانی در تونل‌ها و اطلاعات مربوط به Mapping، تعیین شده است. محاسبات مربوط به روش RES در جدول ۵ ارائه شده است. رنگ‌بندی شاخص‌ها مشابه با شکل ۲ می‌باشد. تمامی پارامترهای محاسبه شده در جدول ۵ در شکل ۳ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، متغیرهایی با شدت تعامل بیشتر در امتداد خط C = E رسم می‌شوند. متغیرهای غالب در سمت راست خط C = E (Cause > Effect) و متغیرهای فرعی در سمت چپ خط C = E قرار گرفته‌اند (Effect > Cause).

به‌منظور بررسی وضعیت برهم‌کنش پارامترها، مقادیر میانگین هر پارامتر محاسبه و در شکل ۴ نمایش داده شده است. بر اساس مطالعات هودسن و فنگ (Hudson and Feng, 2015) تمرکز پارامترها به‌صورت شدت مشابهت[۹]، تسلط متغیر[۱۰] مشاهده می‌شود. بر این اساس نتایج به شرح زیر ارائه شده است:

- سیستم به‌طور قابل توجهی تعاملی است زیرا بیشتر نقاط روی خط تعاملی ۵۰٪ یا بالاتر از آن قرار دارند. همچنین، بسیاری از پارامترها تعاملی مشابه دارند.
- پارامترهای ۴،۷،۸ و ۱۰، هوازدگی سطح، پرشدگی و جهت گیری درزه‌ها و شرایط آب زیرزمینی غالب‌ترین هستند، که در سمت راست خط C = E قرار دارند.
- پارامترهای ۲،۳،۵ و ۹، الگو، فاصله و بازشدگی درزه‌ها و تنش برجا، زیرمجموعه ترین[۱۱] آن‌ها هستند، این‌ها در سمت چپ خط C = E قرار دارند.
- پارامترهای ۱ و ۶، مقاومت فشاری سنگ بکر و زبری سطح درزه، تأثیر پذیرترین هستند.

بر مبنای محاسبات جدول ۳، روابط ۶ تا ۱۰ بین هر ۱۰ پارامتر برای هر یک از تونل‌های مورد مطالعه برقرار است. همچنین رابطه ۱۱ به عنوان رابطه میانگین نیز برای مقایسه، تعیین شده است. ضرایب این رابطه‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. مجموع ضریب تمامی ۱۰ پارامترها، در تمامی رابطه‌ها برابر ۲۵ است.

Tunnel 01 $SI=(1.4P1+2.9P2+2.4P3+2.9P4+2.8P5+2.1P6+2.7P7+3.2P8+2.2P9+2.2P10)$ (۵)

[9] Similar intensity
[10] variable dominance
[11] most subordinate

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1014281]

Tunnel 02 SI=(3.3P1+2.1P2+2P3+3.3P4+2.3P5+1.8P6+2.3P7+3.3P8+2.7P9+2P10) (۶)

Tunnel 03 SI=(1.3P1+2.3P2+2.1P3+3.2P4+3P5+2.2P6+3P7+3.7P8+2.1P9+2.2P10) (۷)

Tunnel 04 SI=(1.5P1+2.3P2+2.1P3+3.4P4+2.9P5+2P6+2.9P7+3.5P8+2.6P9+1.9P10) (۸)

Tunnel 05 SI=(1.5P1+2.4P2+2.4P3+3.4P4+2.7P5+1.8P6+2.3P7+3.2P8+2.6P9+2.6P10) (۹)

Tunnel 06 SI=(1.3P1+2.7P2+2P3+2.9P4+2.5P5+2.4P6+2.5P7+3.1P8+2.9P9+2.7P10) (۱۰)

Mean SI=(1.4P1+2.5P2+2.4P3+3.3P4+2.8P5+1.9P6+2.6P7+3.3P8+2.5P9+2.2P10) (۱۱)

جدول ۴. محاسبات مربوط به RMR تونل‌های مورد مطالعه

Table 4. RMR calculations for the studied tunnels

Uniaxial compressive strength(UCS) of intact rock					T1	T2	T3	T4	T5	T6
	Moderate strength	25	-	50	50	35	35		50	
	Medium strength	50	-	100				60		65
Rock quality designation (RQD)										
Fair		50	-	75	65	60			60	65
Poor		75	-	50			30	40		
Joint spacing										
Large spacing		0.6	-	2						●
Moderate spacing		0.2	-	0.6	●	●	●	●	●	
Joint sets										
2 joint sets + random joints										●
3 joint sets						●				
3 joint sets + random joints					●			●		
4 joint sets or more; heavily jointed							●		●	
Orientation of main joint set (C3 in roof; C4 in walls)										
Favorable						●				
Fair										
Unfavorable					●		●	●	●	●
Joint wall smoothness (small roughness)(called 'roughness' in the RMR)										
Rough or irregular							●			
Slightly rough					●	●		●	●	●
Joint plane undulation or waviness (large roughness)										
Moderately undulating						●				
Slightly undulating					●					●
Planar							●	●	●	
Joint alteration or weathering										
Slightly weathered joint walls (coloured, stained)					●	●	●	●	●	●
Hard, cohesive materials (clay, talc, chlorite)					●	●				
Soft, cohesive materials (soft clay)							●	●	●	●
Joint length										
Medium joint	3 – 10 m				●			●	●	●

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1014281]

Long joint		10 – 30 m [2)]		●	●			
Joint Aperture								
Moderately open	0.5 – 1 mm						●	
	1 – 2.5 mm		●	●				
Open	2.5 - 5 mm					●		
	5 – 10 mm				●			●
Inflow to tunnel or cavern		or Water pressure (p_w)						
Damp				Damp	Damp			
Wet	inflow < 10 litres/min	1 - 2.5 kg/cm²	WET				WET	Wet
Flowing, decaying	inflow > 125 litres/min	p_w > 10 kg/cm²				FLOW		
CALCULATED RMR			45	33	45	35	36	43

جدول ۵. ماتریس تعاملات باینری کد شده برای پایداری اولیه

Table 5. Matrix of binary interactions coded for initial support

	Interaction Matrix Tunnel 1									C	E	C+E	C-E	Ci+Ei/ (ΣCi+ΣEi)%
P1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	6	4	10	2	5.62
0	P2	1	0	0	0	0	0	2	2	5	16	21	-11	11.8
0	2	P3	0	0	0	0	0	2	0	4	13	17	-9	9.55
1	2	2	P4	2	1	2	2	1	1	14	7	21	7	11.8
1	2	1	1	P5	1	0	2	0	1	9	11	20	-2	11.24
0	3	1	1	1	P6	2	1	0	0	9	6	15	3	8.43
0	2	1	1	3	2	P7	2	0	1	12	7	19	5	10.67
1	2	2	2	3	1	2	P8	0	1	14	9	23	5	12.92
1	1	1	1	1	1	0	0	P9	1	7	9	16	-2	8.99
0	2	3	0	0	0	0	1	3	P10	9	7	16	2	8.99
4	16	13	7	11	6	7	9	9	7	89	89	178	0	100
	Interaction Matrix Tunnel 2									C	E	C+E	C-E	Ci+Ei/ (ΣCi+ΣEi)%
P1	1	1	2	2	0	0	3	3	1	13	15	28	-2	13.08
2	P2	1	0	0	0	0	1	3	1	8	10	18	-2	8.41
1	1	P3	0	0	0	0	0	3	1	6	11	17	-5	7.94
3	2	2	P4	3	2	1	4	0	0	17	11	28	6	13.08
1	1	1	2	P5	0	0	1	1	0	7	13	20	-6	9.35
1	1	1	1	2	P6	2	2	1	0	11	4	15	7	7.01
3	0	0	3	3	1	P7	3	1	1	15	5	20	10	9.35
1	1	2	2	2	1	2	P8	1	1	13	15	28	-2	13.08
1	1	1	1	1	0	0	0	P9	1	6	17	23	-11	10.75

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

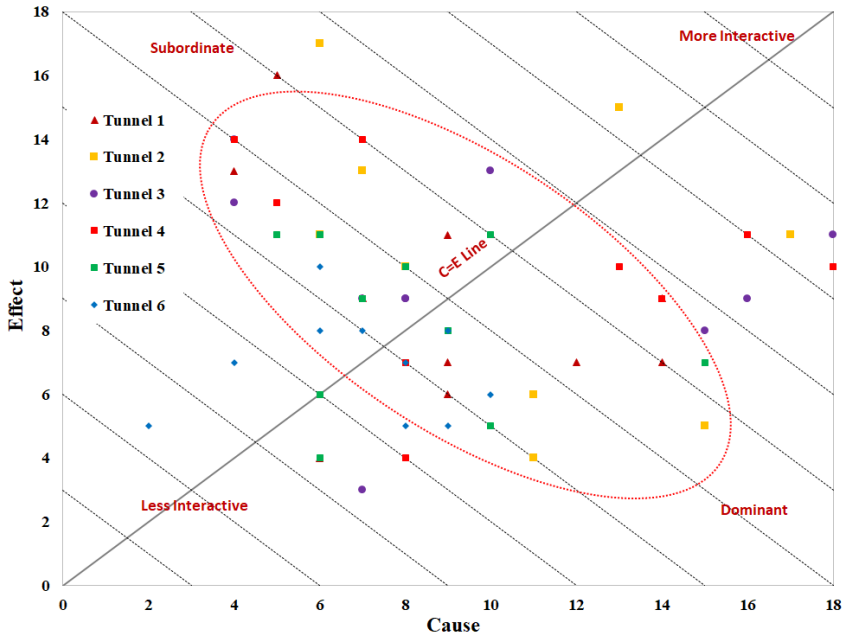
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1014281]

2	2	2	0	0	0	0	1	4	P10	11	6	17	5	7.94
15	10	11	11	13	4	5	15	17	6	107	107	214	0	100
	Interaction Matrix Tunnel 3									C	E	C+E	C-E	Ci+Ei/ (ΣCi+ΣEi)%
P1	0	1	1	1	0	1	2	1	0	7	3	10	4	5.15
0	P2	0	0	0	0	0	0	2	2	4	14	18	-10	9.28
0	2	P3	0	0	0	0	0	2	0	4	12	16	-8	8.25
1	1	2	P4	3	2	1	3	1	2	16	9	25	7	12.89
0	1	2	2	P5	2	0	2	0	1	10	13	23	-3	11.86
0	1	0	1	2	P6	3	1	0	0	8	9	17	-1	8.76
0	2	1	2	3	3	P7	3	0	1	15	8	23	7	11.86
1	3	3	2	3	1	3	P8	0	2	18	11	29	7	14.95
1	1	1	1	1	1	0	0	P9	1	7	9	16	-2	8.25
0	3	2	0	0	0	0	0	3	P10	8	9	17	-1	8.76
3	14	12	9	13	9	8	11	9	9	97	97	194	0	100

	Interaction Matrix Tunnel 4									C	E	C+E	C-E	Ci+Ei/ (ΣCi+ΣEi)%
P1	0	1	2	1	0	1	1	2	0	8	4	12	4	6.0
0	P2	0	0	0	0	0	0	3	1	4	14	18	-10	9.0
0	2	P3	0	0	0	0	0	3	0	5	12	17	-7	8.5
1	2	2	P4	2	2	3	2	1	1	16	11	27	5	13.5
1	2	1	2	P5	2	1	2	1	1	13	10	23	3	11.5
0	2	1	1	1	P6	1	1	0	0	7	9	16	-2	8.0
0	2	1	2	3	2	P7	3	0	1	14	9	23	5	11.5
1	2	3	3	2	2	3	P8	0	2	18	10	28	8	14.0
1	1	1	1	1	1	0	0	P9	1	7	14	21	-7	10.5
0	1	2	0	0	0	0	1	4	P10	8	7	15	1	7.5
4	14	12	11	10	9	9	10	14	7	100	100	200	0	100
	Interaction Matrix Tunnel 5									C	E	C+E	C-E	Ci+Ei/ (ΣCi+ΣEi)%
P1	0	1	2	1	0	0	1	1	0	6	4	10	2	6.1
0	P2	1	0	0	0	0	0	3	3	7	9	16	-2	9.76
0	2	P3	0	0	0	0	0	3	0	5	11	16	-6	9.76
1	1	2	P4	3	2	1	3	1	1	15	7	22	8	13.41
1	1	0	1	P5	1	1	2	0	1	8	10	18	-2	10.98
0	1	1	1	1	P6	1	1	0	0	6	6	12	0	7.32
0	1	1	1	2	1	P7	3	0	1	10	5	15	5	9.15
1	1	1	1	2	1	2	P8	0	1	10	11	21	-1	12.8
1	0	1	1	1	1	0	0	P9	1	6	11	17	-5	10.37
0	2	3	0	0	0	0	1	3	P10	9	8	17	1	10.37

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1014281]

4	9	11	7	10	6	5	11	11	8	82	82	164	0	100
	Interaction Matrix Tunnel 6									C	E	C+E	C-E	Ci+Ei/ (ΣCi+ΣEi)%
P1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	2	5	7	-3	5.07
1	P2	1	0	0	0	0	0	3	2	7	8	15	-1	10.87
0	2	P3	0	0	0	0	0	2	0	4	7	11	-3	7.97
1	1	1	P4	1	1	1	2	1	1	10	6	16	4	11.59
1	0	0	1	P5	1	1	1	0	1	6	8	14	-2	10.14
1	1	1	1	1	P6	1	2	0	0	8	5	13	3	9.42
0	1	0	1	3	1	P7	2	0	1	9	5	14	4	10.14
0	1	1	1	2	1	2	P8	0	1	9	8	17	1	12.32
1	0	1	1	1	1	0	0	P9	1	6	10	16	-4	11.59
0	2	2	0	0	0	0	1	3	P10	8	7	15	1	10.87
5	8	7	6	8	5	5	8	10	7	69	69	138	0	100

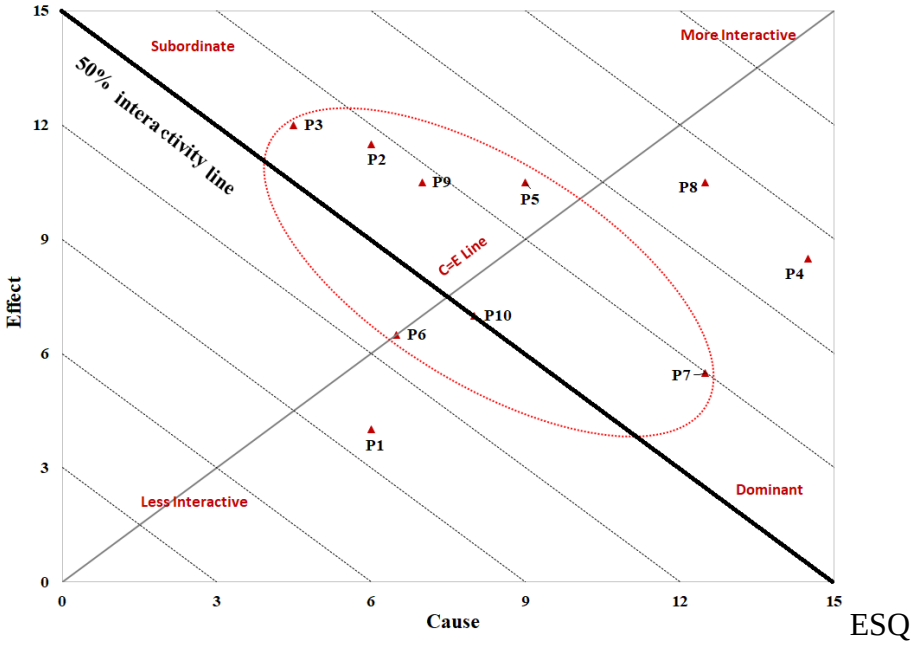


شکل ۳. نمودار علت و معلولی با استفاده از مختصات ایجاد شده از روش کدگذاری

Fig. 3. The Cause-Effect plot using the coordinates established from the ESQ coding method

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1014281]



شکل ۴. نمودار علت و معلولی با استفاده از مختصات تعیین شده از روش کدگذاری ESQ برای مقدار اصلی ۶ تونل

Fig. 4. The Cause-Effect plot using the coordinates established from the ESQ coding method for the main value of 6 tunnels

جدول ۶. ضرایب معادله تجربی RES برای شاخص پایداری تونل

Table 6. Coefficients of RES empirical equation for tunnel stability index

Parameter	Equations Coefficients						
	EQ 01	EQ 02	EQ 03	EQ 04	EQ 05	EQ 06	EQ-Mean
P 1	1.4	3.3	1.3	1.5	1.5	1.3	1.4
P 2	2.9	2.1	2.3	2.3	2.4	2.7	2.5
P 3	2.4	2	2.1	2.1	2.4	2	2.4
P 4	2.9	3.3	3.2	3.4	3.4	2.9	3.3
P 5	2.8	2.3	3	2.9	2.7	2.5	2.8
P 6	2.1	1.8	2.2	2	1.8	2.4	1.9
P 7	2.7	2.3	3	2.9	2.3	2.5	2.6
P 8	3.2	3.3	3.7	3.5	3.2	3.1	3.3
P 9	2.2	2.7	2.1	2.6	2.6	2.9	2.5
P 10	2.2	2	2.2	1.9	2.6	2.7	2.2

علاوه بر این، نمودارهای احتمالی (C, E) به ما امکان می‌دهند تشخیص دهیم که آیا همه پارامترها برای تعریف سیستم مهم هستند یا اینکه آیا هیچ (یا برخی) پارامترهایی وجود دارد که تأثیری ندارند. برای این منظور، می‌توانیم مقادیر مورد انتظار شدت تعامل (مقادیر C+E) را برای هر پارامتر در نظر گرفته شده رسم کنیم (شکل ۷)، و همچنین می‌توانیم نوارهای خطا را برای نشان دادن عدم قطعیت در چنین تخمین‌هایی که با انحراف استاندارد آنها اندازه‌گیری می‌شود، رسم کنیم(برای به

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1014281]

دست آوردن چنین مقادیری، تمام توزیع های احتمال C+E و همچنین میانگین و انحراف معیار آنها محاسبه شده است). به طور مشابه، شکل ۸ مقادیر مورد انتظار برتری (یا تبعیت) پارامترها (مقادیر C-E) را برای هر پارامتر در نظر گرفته شده نشان می دهد. (نوارهای خطا که با انحرافات استاندارد توزیع‌های C-E اندازه‌گیری می‌شوند نیز ارائه شده‌اند). در این مورد، از نتایج نشان داده شده در شکل ۵ و ۶، می توان نتیجه گرفت که تمام ۱۰ پارامتر "ورودی" نسبتاً تعاملی هستند و تأثیر قابل توجهی بر پارامتر "نتیجه" (یعنی تحکیمات اولیه) دارند، بنابراین، باید در تصمیمات مهندسی مورد توجه قرار گیرند. به طور مشابه، شکل ۸ مقادیر مورد انتظار (و عدم قطعیت آنها، همانطور که با انحرافات استاندارد آنها اندازه گیری می شود) را برای "معیار تسلط" هر پارامتر در نظر گرفته شده (یعنی مقادیر C-E آن) ارائه می دهد. علاوه بر این، بر اساس نمودارهای علت و معلولی ۱۰ پارامتر در نظر گرفته شده در تحلیل پایداری تونل (شکل های ۵ تا ۸)، می توان نکات زیر را بیان کرد:

• تمام پارامترهای در نظر گرفته‌شده نسبتاً تعاملی هستند، زیرا در امتداد قطر نمودار C,E اندازه‌گیری می‌شوند.

• عوامل با تعامل بیشتر ، P4: Joint surface weathering, P5: Joint Separation هستند، درحالی‌که عامل با کمترین تعامل در این مورد، P1: Strength of Intact Rock است.

• P7: Joint Filling and P4: Joint surface weathering پارامترهایی هستند که بیشترین اهمیت را دارند، درحالی‌که پارامترهای P2: Jointing Pattern, P3: Joint spacing کمترین تاثیرگذاری را دارند.

نتایج و بحث

تاکنون اثر متقابل ۱۰ پارامتر مختلف در پایداری فضاهای زیرزمینی به دو روش RMR و RES مورد بررسی قرار گرفت. بدین ترتیب تأثیر هر پارامتر بر دیگر پارامترها در امتیاز دهی توده سنگ لحاظ شد. برای مثال اثر حضور آب در توده سنگ ضعیف متفاوت با اثر آن در توده سنگ مقاوم می‌باشد. این موضوع در وضعیت درزه داری، پرشدگی، نوع آن و ... تأثیر گذار می‌باشد. در این بخش نتایج هر دو روش مقایسه گردید. بر مبنای جدول ۷، همخوانی مناسبی میان نتایج به دست آمده توسط این روش‌ها مشاهده می‌شود. در جدول ۷ مقادیر موجود در ستون RES مربوط به رابطه‌های ۵ تا ۱۰ و رابطه میانگین است. مقادیر ستون RMR نیز حاصل محاسبات مربوط به آن در بخش قبل است.

با توجه به اینکه توده سنگ‌های تشکیل دهنده تونل‌های مورد مطالعه، عموماً از نظر کیفی در رده سنگ‌های متوسط تا خوب هستند، سعی شد ارزیابی سیستم پایداری تونل، بر روی ضخامت شاتکریت متمرکز شود. ضخامت مورد نیاز از شاتکریت[12] جهت پایدار سازی تونل‌ها بر اساس مطالعات موجود، برآورد گردید (Celada et al., 2014; Komurlu and Demir, 2019; Mohammadi and Azad, 2020)(جدول ۷). همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر برآورد شده برای دو روشRMR و RES، در برخی از تونل‌ها از جمله تونل ۱ و ۶ تفاوت دارد. بدین ترتیب که مقدار RES برای این تونل‌ها در رده ۶۰-۸۰ بوده و ضخامت شاتکریت پیشنهادی ۵ سانتی‌متر است درحالی‌که مقدار RMR در رده ۲۰-۴۰ قرار می‌گیرد و شاتکریت ۵-۱۰ سانتی‌متر را پیشنهاد می‌دهد. اما بر اساس شرایط زمان اجرای تونل، ضخامت شاتکریت در هر دو تونل ۵ سانتی‌متر است تا تونل به پایداری برسد.

[12] Shotcrete

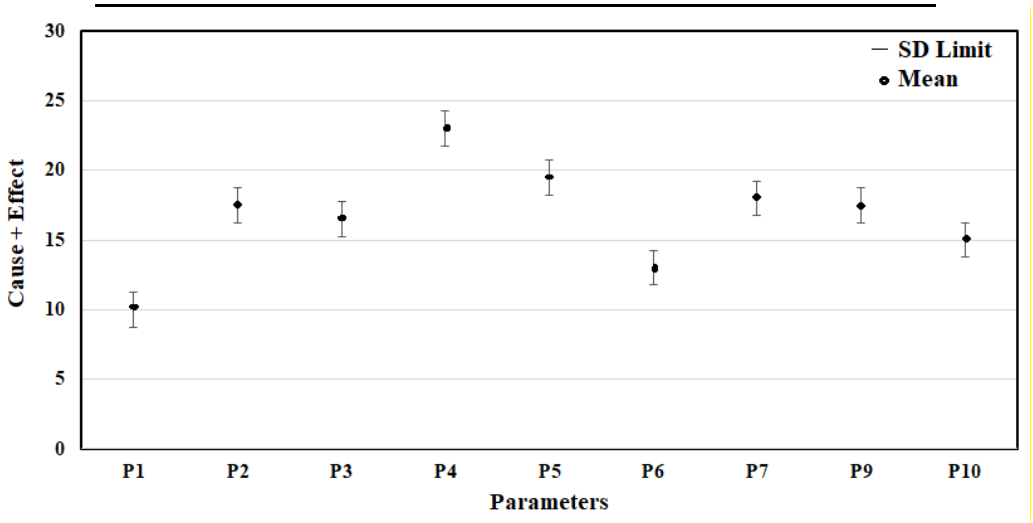
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1014281]

دلیل این امر آن است که در هر دوی این تونل‌ها، سنگ از وضعیت مطلوبی برخوردار است. اما شرایط آب زیرزمینی سبب می‌شود تا در روش RMR مقدار امتیاز سنگ تا ۱۵ عدد کاهش پیدا می‌کند(جدول ۷). این در حالی است که آب زیرزمینی در هر بخش از تونل می‌تواند با توجه به شرایط درزه‌ها، کاملاً متغیر باشد. در چنین شرایطی، اثر متقابل درزه‌ها بر آب زیرزمینی و برعکس، مقدار امتیاز را در روش RES مشخص می‌کند. اما در روش RMR، آب زیرزمینی چه درزه‌ها بسته و چه دارای بازشدگی زیاد باشند، مستقل است. همین اختلاف می‌تواند امتیاز نهایی را تحت تأثیر قرار دهد. اما در زمان اجرای شاتکریت دو مورد به‌عنوان ملاک لحاظ می‌شود. ملاک اول امتیاز توده سنگ (RMR) و ملاک دوم شرایط واقعی سنگ در زمان اجرا است. بر اساس مشاهده‌های میدانی، مقادیر شاتکریت در تونل‌های ۱ و ۶ با توجه به شرایط مطلوب درزه‌ها، تا ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته‌شده و تونل به پایداری کامل رسیده است. شرایط آب زیرزمینی پایدار شده و تا زمان اجرای سیستم پایداری نهایی (Lining)، سیستم تحکیمات اولیه، کاملاً مناسب بوده‌اند. به همین رو می‌توان رابطه حاصل از روش RES را به‌عنوان یک رابطه با تعامل بالا در بررسی پایداری تونل و فضاهای زیرزمینی پذیرفت. این موضوع در سنگ‌های با کیفیت متوسط قابل توجه می‌باشد. باید توجه داشت که آنچه در عملیات اجرایی مد نظر کارشناسان قرار می‌گیرد، در واقع رسیدن به پایدارسازی اولیه متناسب در شرایط زمان اجرا است.

جدول ۷. مقایسه نتایج حاصل از دو روش RMR و RES به همراه المان های پایداری اولیه

Table 7. Comparison of results obtained from RMR and RES methods along with initial stability elements

Site	RES		RMR	Shotcrete (cm)		
	A	B		RMR	RES	Carried out
Tunnel 1	61	62	45	5-10	5	5
Tunnel 2	31	33	33	10-15	10-15	15
Tunnel 3	40	41	45	5-10	5-10	15
Tunnel 4	30	30	35	10-15	10-15	15
Tunnel 5	44	45	36	10-15	5-10	10
Tunnel 6	60	62	43	5-10	5	5

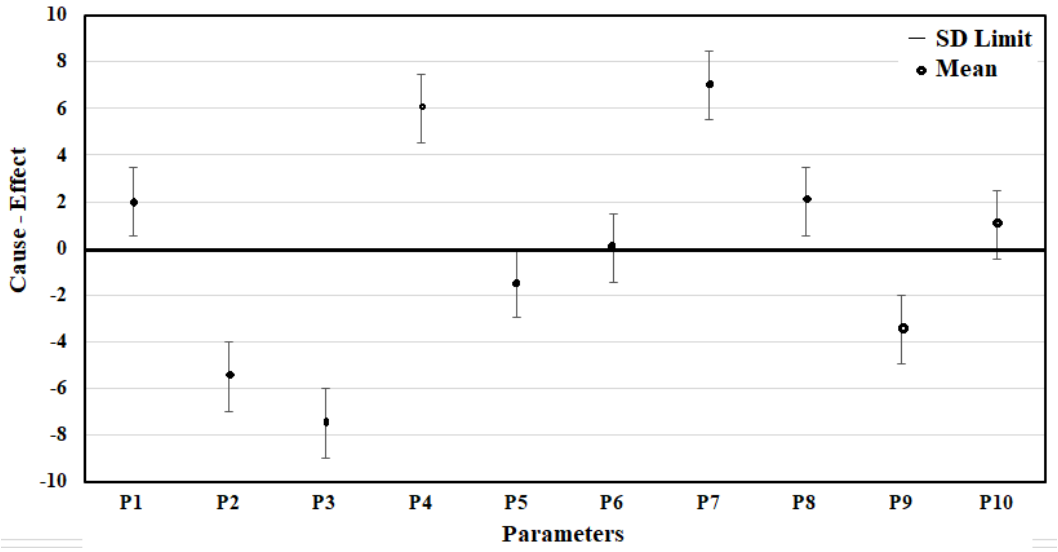


شکل ۷. مقادیر میانگین و حدود انحراف استاندارد برای تعامل ۱۰ پارامتر موثر بر پشتیبانی اولیه

Fig. 7. Mean values and standard deviation limits for interactivity of 10 parameters affecting the initial support

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1014281]



شکل ۸. مقادیر میانگین و حدود انحراف استاندارد برای تبعیت ۱۰ پارامتر موثر بر پشتیبانی اولیه

Fig. 8. Mean values and standard deviation limits for subordinance of 10 parameters affecting the initial support

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با هدف ارائه یک روش بومی شده از RES برای ارائه پیشنهاد به‌منظور پایدارسازی اولیه تونل‌ها ارائه گردید. در این راستا تعداد ۶ تونل با پارامترهای متفاوت زمین‌شناسی مهندسی در مناطق مختلف ایران انتخاب شد. سپس ۱۰ پارامتر اصلی تأثیر گذار بر پایداری تونل انتخاب گردید. هر یک از این پارامترها به ۵ کلاس مختلف تقسیم‌بندی شد. مقادیر این کلاس‌ها بر اساس بازدیدهای میدانی و Mapping تونل‌ها برآورد گردید. در نهایت با بررسی ارتباط بین پارامترهای مختلف و تأثیر هر پارامتر بر پارامتر دیگر، برای هر تونل، یک رابطه ریاضی به دست آمد. نتایج به دست آمده نشان داد که سیستم کاملاً تعاملی است و بسیاری از پارامترها تعامل مشابهی دارند. پارامترهای هوازدگی سطح، پرشدگی و جهت گیری درزه‌ها و شرایط آب زیرزمینی غالب‌ترین و پارامترهای الگو، فاصله و بازشدگی درزه‌ها و تنش برجا، زیر مجموعه‌ترین[۱۳] آن‌ها هستند. بعلاوه پارامترهای مقاومت فشاری سنگ بکر و زبری سطح درزه، تأثیر پذیرترین هستند. همچنین مشخص شد که پارامترهای P4: Joint surface weathering, P5: Joint Separation بیشترین و P1: Strength of Intact Rock کمترین تعامل را دارند. و نیز پارامترهای P7: Joint Filling and P4: Joint surface weathering بیشترین تسلط بر سیستم[۱۴] و پارامترهای P2: Jointing Pattern, P3: Joint spacing تحت سلطه سیستم هستند.

به‌منظور مقایسه نتایج با روش RMR، تحلیل‌ها بر روی تونل‌های مذکور، صورت گرفت و در نهایت نتایج با یکدیگر مقایسه گردید. نتایج نشان داد که دست کم برای دو تونل، مقادیر حاصل از روش RES همخوانی بسیار مناسب تری با شرایط واقعی تونل دارد. بدین نحو که ضخامت پیشنهادی شاتکریت حاصل از روش RES با ضخامت اجرا شده، یکسان است درحالی‌که در روش RMR، مقدار ضخامت پیشنهادی، بالاتر است.

[13] most subordinate

[14] dominate the system

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.10142281]

قدردانی

نویسندگان از شرکت مهندسین مشاور مترا به دلیل همکاری در بازدیدهای میدانی و در اختیار گذاشتن گزارش های Mapping تونل‌ها کمال تشکر را دارند.

منابع

Barton, N., and Bieniawski, Z., 2008, RMR and Q-Setting Record Straight: Tunnels & Tunnelling International.

Barton, N., and Grimstad, E., 2014, Forty years with the Q-system in Norway and abroad: Fjellsprengningsteknikk, Bergmekanikk, Geoteknikk, v. 4, p.١-٤٠ .

Benardos, A., and Kaliampakos, D., 2004, A methodology for assessing geotechnical hazards for TBM tunnelling - Illustrated by the Athens Metro, Greece: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 41, p. 987-999.

Berberian, M., 2014, Earthquake and Coseismic Surface Faulting on the Iranian Plateau; a Historical, Social, and Physical Approach, Elsevier, 770 p:.

Bieniawski, Z., 1973, Engineering classification of jointed rock masses: Civil Engineering= Siviele Ingenieurswese, v. 19 ,no. 73.12, p. 335-343.

Bieniawski, Z. T., 1974, Geomechanics classification of rock masses and its application in tunneling: [No source information available], v. 2.

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., and Bieniawski, Z., 2014, Innovating tunnel design by an improved experience-based RMR system, in Proceedings Proceedings of the world tunnel congress, p. 1-9.

Faramarzi, F., Mansouri, H., and Farsangi, M., 2013, Development of Rock Engineering Systems-Based Models for Flyrock Risk Analysis and Prediction of Flyrock Distance in Surface Blasting: Rock Mechanics and Rock Engineering, v. 47, p. 1291-1306.

Feng, X. T., Hudson, J. A., and Tan, F., 2013, Rock Characterisation, Modelling and Engineering Design Methods, CRC Press.

Golmohammadi, S., 2024, development-of-rock-engineering-system-based-models-for-tunneling-progress-analysis-and-evaluation-case-study-of-tailrace-tunnel-of-azad-power-plant-project: International Journal of Geological and Geotechnical Engineering, v. 18, p. 47-52.

Golmohammadi, S., and Bidgoli, M. N., 2023, Improvement of the Q-System Using the Rock Engineering System: A Case Study of Water Conveyor Tunnel of Azad Dam: International Journal of Geotechnical and Geological Engineering, v. 17, no. 5, p. 97-101.

Habibi, R., Pourkermani, M., Ghorashi, M., Almasian, M., and Jarahi, H., 2023, The Effects of Quaternary Sediments on Earthquake Acceleration: Himalayan Geology, v. 44, p. 71-80.

Hudson, J., 1992, Rock engineering systems. Theory and practice.

Hudson, J., 2013, A review of Rock Engineering Systems (RES) applications over the last 20 years: ISRM SINOROCK 2013.

Hudson, J., and Feng, X.-T., 2015, Rock Engineering Risk, Xia-Ting Feng CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group, 527 p:.

Jarahi, H., 2021, Paleo Mega Lake of Rey Identification and Reconstruction of Quaternary Lake in Central Iran: Open Quaternary, v. 7, no. 1, p. 1-15.

Jarahi, H., and Seifilaleh, S., 2016, Rock fall hazard zonation in Haraz highway: American Journal of Engineering and Applied Sciences, v. 9, p. 371-379.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1014281]

Khatik, V. M., and Nandi, A. K., 2018, A generic method for rock mass classification: Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, v. 10, no. 1, p. 102-116.

Khosronezhad, A., Pourkermani, M., Almasiyan, M., Bouzari, S., and Uromeihy, A., 2023, Landslide susceptibility zoning based on Rock Engineering System application to the Tehran case study: Terra Nova.

Komurlu, E., and Demir, S., 2019, Use of Rock Mass Rating (RMR) Values for Support Designs of Tunnels Excavated in Soft Rocks without Squeezing Problem: GeoScience Engineering, v. 65, p. 1-17.

Lowson, A., and Bieniawski, Z., Critical assessment of RMR based tunnel design practices: a practical engineer's approach, in Proceedings Proceedings of the SME, rapid excavation and tunnelling conference, Washington, DC2013, p. 180-198.

Mohammadi, H., and Azad, A., 2020, Applying Rock Engineering Systems Approach for Prediction of Overbreak Produced in Tunnels Driven in Hard Rock: Geotechnical and Geological Engineering, v. 38, no. 3, p. 2447-2463.

Naghadehi, M. Z., Jimenez, R., KhaloKakaie, R., and Jalali, S.-M. E., 2011, A probabilistic systems methodology to analyze the importance of factors affecting the stability of rock slopes: Engineering Geology, v. 118, no. 3, p. 82-92.

Pells, P., Bieniawski, Z., Hencher, S., and Pells, S., 2017, Rock quality designation (RQD): time to rest in peace: Canadian Geotechnical Journal, v. 54, no. 6, p. 825-834.

Singh, B., and Goel, R. K., 2011, Chapter 6 - Rock Mass Rating, in Singh, B., and Goel, R. K., eds., Engineering Rock Mass Classification: Boston, Butterworth-Heinemann, p. 45-62.

Yan-jun, S., Rui-xin, Y., Geng-she, Y., Guang-li, X., and Shan-yong, W., 2017, Comparisons of evaluation factors and application effects of the new [BQ] GSI system with international rock mass classification systems: Geotechnical and Geological Engineering, v. 35, p. 2523-2548.

Yang, Y., and Zhang, Q., 1998, The application of neural networks to Rock Engineering Systems (RES): International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 35, p. 727-745.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1014281]

Investigating the effective parameters on the stability system of tunnels using the Rock Engineering System (RES) method

Mehdi Talkhablou[1*], Seyed Mahmoud Fatemi Aghda[2], Habibullah Heydari Renani[3]
1. Assistant Professor, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran
2. Professor, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran
3. Phd Student, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

Received: 25 Jun 2022 Accepted: 12 Aug 2022

Abstract

The stabilization of underground spaces is one of the most challenging topics in engineering geology. There are several methods to determine the type of tunnel stabilization system, but most of these methods have several weaknesses. Therefore, the development of a method that comprehensively considers almost all parameters influencing tunnel stability and their interdependencies has not received sufficient attention. The aim of this research is to investigate the parameters influencing the stability of tunnels using the rock mechanics system method. In this paper, 6 tunnels with different geological characteristics were selected. The effective parameters on the primary stabilization of these tunnels were coded using the ESQ method. Subsequent analyses were performed using the RES rock engineering system method to estimate and evaluate the optimal tunnel stabilization system. The results showed that parameters such as weathering of the joint surface, backfill and joint spacing played a more effective role than other parameters. For comparison, the analyses were also carried out using the RMR rock mass ranking method. The comparison between the results of the RES and RMR methods showed that the results of the RES method are in better agreement with the actual tunnel conditions and the shotcrete thickness of the proposed stabilization system of the studied tunnels. Since there is no limit to the number of input parameters in this method and, on the other hand, the mutual influence of the parameters on each other is considered, the relationships obtained from the RES method in this research can be effectively used in engineering projects along with other methods.

Keywords: Underground space, Rock mass evaluation, Shotcrete, Initial support.

Introduction

The aim of the present study is to investigate the parameters influencing the stability of tunnels using the Rock Engineering System method. In this research, six different tunnels excavated in different lithological characteristics have been selected for study and analysis. These tunnels have different geotechnical conditions. The excavation method for all tunnels was mainly blasting and all tunnels were mapped during excavation. These tunnels are classified as deep to semi-deep, so the issue of surface weathering will have minimal impact on stability.

The use of the Rock Engineering System (RES) method has become very widespread in recent years. This method allows the interaction between two factors to be considered simultaneously. The Rock

*Corresponding author: Talkhablou@khu.ac.ir
DOI: http://doi.org/10.22034/JEG.2022.16.2.1014281

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1014281]

Engineering System method has become established as an effective approach to analyzing complex mechanisms and solving rock engineering problems (Hudson, 1992). According to the theory of the Rock Engineering System, all rock engineering classifications can be considered as a function of the interaction matrix factors. The selection of factors and their weighting in the rock engineering classification system is determined by the coding of the interaction matrix. Therefore, a comparative analysis between the RES and RMR methods can be carried out in the context of tunnel stability. This study includes a comparative analysis between the RES and RMR methods to evaluate their strengths and weaknesses.

Materials and Methods

In this study, six different tunnels with different geological characteristics were selected. Geological mapping of the tunnels was carried out first, followed by an investigation of the parameters required for both the RMR and RES methods. Due to similarities in the maintenance system and lithological homogeneity of the rock mass, the parameter values were averaged for each tunnel. Factors influencing the stability assessment, such as the engineering rock systems and the formation of the rock matrix, were determined on the basis of expert opinion, site-specific conditions and practical experience. In this study, 10 main factors affecting the stability of underground spaces were selected according to the conditions, the general quality of the rock mass and the variety of lithology. These factors are

P1: Intact rock strength, P2: Joint pattern, P3: Joint spacing, P4: Joint surface weathering, P5: Joint Separation, P6: Joint Surface Roughness, P7: Joint Filling, P8: Groundwater Condition, P9: In-situ Stress Condition, P10: Joint Orientation.

Each of these parameters was then classified into five categories based on engineering experience. Then, based on the existing classifications, the results of the Rock Engineering Systems (RES) method, similar to RMR, were correlated with tunnel stability. In this regard, based on existing studies, the tunnel stability index was classified into 5 categories based on RES data. The values obtained from the RES equations range from 0 to 100 and were divided into 5 categories with intervals of 20. Consequently, the category 0-20 represents the lowest value, while the category 80-100 represents the highest value, which allows a simpler comparison of the results with the RMR method.

Analysis

The values of the parameters influencing RMR and RES were estimated for all the tunnels studied. Analyses were then carried out on the basis of the existing equations, and the calculations relating to RMR and RES were presented. Based on the cause and effect diagrams of the 10 parameters analyzed for tunnel stability, the following points can be highlighted

- All the parameters considered are relatively interactive as they are measured along the C, E diagonal of the diagram.
- The factors with more interaction are P4: joint surface weathering, P5: Joint separation, while the factor with the least interaction in this case is P1: Intact rock strength.
- P4: joint surface weathering, P7: joint filling are the most important factors, while P2: joint pattern, P3: joint spacing have the least influence.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1014281]

Due to the generally good quality of the rock masses in the tunnels investigated, the evaluation of tunnel stability focused on the thickness of the shotcrete. The thickness of shotcrete required to stabilize the tunnels was estimated on the basis of existing studies. The results showed that for some of the tunnels, there are differences between the values estimated for the RMR and RES methods. For example, in Tunnels 1 and 6, the RES value for shotcrete thickness was in the range of 60-80, while the RMR value was in the range of 20-40. However, based on the design, a shotcrete thickness of 5 cm was determined for both tunnels to ensure stability.

This is because the rock in both tunnels is in good condition. However, the groundwater conditions reduce the rock mass rating (RMR) by up to 15 points using the RMR method. Meanwhile, the groundwater in each part of the tunnel can be completely variable depending on the condition of the joints. In such circumstances, the mutual effect of the joints on the groundwater and vice versa determines the final rock mass rating in the RES method. However, in the RMR method, groundwater is considered independent of whether the joints are sealed or have significant openings.

This difference can affect the final rating. However, when using shotcrete, two criteria are taken into account. The first is the Rock Mass Rating (RMR) and the second is the actual rock conditions during construction. Based on field observations, a shotcrete thickness of up to 5 centimeters was considered sufficient for Tunnels 1 and 6, given the favorable joint conditions, and the tunnels achieved full stability. The stabilized groundwater conditions made the initial stabilization very effective until the final lining system was installed.

Conclusion

The aim of the present study was to develop an indigenous method based on Rock Engineering Systems (RES) to provide recommendations for the initial support of tunnels. To achieve this, six tunnels with different engineering geological parameters in different regions of Iran were selected. Subsequently, 10 key parameters influencing tunnel stability were selected. Each of these parameters was divided into 5 different classes, and the values for these classes were estimated based on site visits and geological mapping of the tunnels. Finally, a mathematical relationship was derived for each tunnel by examining the relationship between different parameters and the influence of each parameter on the others. The results showed that the system is highly interactive, with many parameters showing similar interactions. Surface weathering, backfill, joint orientation and groundwater conditions were identified as the most dominant parameters, while pattern, spacing, joint opening and in situ stress were the most subordinate. In addition, the parameters of uniaxial compressive strength of intact rock and joint surface roughness were found to be the most susceptible. Furthermore, the parameters P4: joint surface weathering and P5: Joint separation show the highest interaction, while P1: Intact rock strength shows the least interaction. In addition, P4: Joint Surface Weathering and P7: Joint Filling have the most dominance over the system, and parameters P2: Joint Pattern and P3: Joint Spacing are under the dominance of the system.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1014281]