



Comparison of main rock mass classification methods with an attitude on determining the initial support

Mehdi Talkhablou^{1*}, Seyed Mahmoud Fatemi Aghda², Hashem Milani Cheghooshi³

1. Assistant Professor, Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

2. Professor, Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

3. Master of Science, Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

Article info	Abstract
<p>Article history Received: 01 October 2022 Accepted: 01 March 2023</p> <p>Keywords: Correlation of rock mass classification, RMR classification, Q classification, BQ classification, JH classification, Rock mass classification, Pearson correlation analysis.</p>	<p>Today, extensive studies are conducted to provide a suitable plan for underground space maintenance. One of the ways to achieve rock mass characteristics for engineering designs is to employ different rock mass classification methods. Rock engineering classifications are widely used in design's early stages. They can be a powerful tool for estimating rock mass stability if applied correctly. They can also provide a suitable maintenance system for underground spaces and predict rock mass behavioral characteristics. This research aims to investigate and compare valid rock mass classification methods with an attitude to determining the primary cover. In this research, firstly, it has been tried to use the database prepared from the published articles and also with 331 data from the geological mapping of the tunnels studied in this research, firstly, it has been tried with the data of 331 geological maps of the tunnels studied in this research, in which four classification systems, RMR, Q, BQ, and JH, have been employed to determine the quality of the rock mass, Determine the value of each classification, Then, their correlation relationship was determined through statistical analysis with SPSS software, Pearson correlation analysis and scatter plot in the form of suitable functions, and the new relationship with the highest correlation coefficient was presented. Also, by comparing the stabilization method implemented in the studied tunnels (the information extracted from the geological survey of the studied tunnels) and the proposed stabilization method by each of the introduced classification methods, the relationship and correlation coefficient of each were obtained. The results showed that JH classification can evaluate several types of rocks and suggest a suitable and efficient support system compared to other methods.</p>



Introduction

One of the ways to obtain the properties of rock mass for engineering designs (experimental, analytical and numerical design) is to use different methods of rock mass classification (Laderian and Abaspoor, 2012). Therefore, rock engineering

classifications are widely used in the early stages of design, and if they are used correctly, they can be a powerful tool for estimating the stability of the rock mass, providing a suitable maintenance system for underground spaces, and also predicting the behavioral characteristics of the mass for stone

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2023.8.2.106241>

*Corresponding author: Mehdi Talkhablou; **E-mail:** talkhablou@khu.ac.ir

How to cite this article: Talkhablou, M., Fatemi Aghda, M., Milani Cheghooshi, H., 2023. Comparison of main rock mass classification methods with an attitude on determining the initial support. Kharazmi Journal of Earth Sciences 8(2), 94- 116. <http://doi.org/10.22034/KJES.2023.8.2.106241>



(Rahmannejad and Mohammadi, 2007). Each of the RMR, Q, BQ and JH classification systems consists of several effective parameters, each of which is divided into levels. These parameters can be estimated with a set of field and laboratory operations, and according to the level at which the desired parameter is placed, a point is assigned to it. Finally, the scores of all parameters are added together and the final score of the rock mass in the desired system is obtained, and the qualitative assessment of the rock mass of the region and its geomechanical properties depends on this score. (Palmstrom and Broch, 2006); In most projects, with geological and geotechnical studies, the necessary information is collected to determine the desired parameters. But sometimes due to the lack of data, it is not possible to evaluate the mass of rock in the classification systems, therefore, in such a situation, proper relationships and correlations between these classifications and other classifications can be very useful and while evaluating the appropriateness of the state of the rock mass will lead to an economic and safe design. In addition, engineers are often eager to use mathematical relationships in their work so as not to face the limitations of practical work (Palmstrom and Broch, 2006). In this research, it has been tried to use the database prepared from the published articles and also by using the data from the geological mapping of the different tunnels studied in this research, in which of the four classification systems RMR, Q, BQ and JH have been used to determine the quality of the mass of rocks, first by performing statistical operations on the existing data, a new relationship between the described classification systems is presented, and then by comparing these relationships and the correlation coefficient between them, a

new relationship with the highest correlation coefficient will be presented. Then, by comparing the stabilization method implemented in the studied tunnels whose information is extracted from the geological mapping of these tunnels and the stabilization method proposed by each of the classification methods, the relationship and correlation coefficient of each of them is obtained and finally the stabilization method introduced with a high correlation coefficient.

Material and methods

In this research, 7 tunnels with a total length of 5121 meters have been used. 331 mappings have been used along this route. The tunnels studied in this research are placed in different positions and zones depending on the city where they are located. The most important criteria for the selection of these tunnels are the spread of geological distribution, variety of lithology, the type of tunnel under study and the availability of suitable data to study and check the effective parameters in the rock mass. The compressive strength of the rock masses during drilling using point load devices, Schmidt hammer and manual hydraulic jack was obtained by the relevant engineers and was placed in the mapping with an acceptable number. Also, the correlation between the classifications was investigated during a statistical activity using SPSS software and Pearson correlation analysis and scatterplot. In the continuation of this research, by using the score of each RMR, Q, BQ and JH classification and also by using the stabilization pattern of each of the introduced classification methods, the proposed stabilization method of each method has been obtained

Results and discussion

In this research, the four classification methods RMR, Q, BQ and JH were used in

different sections of the mentioned tunnels. Therefore, by using the published articles, in which these four systems were used to evaluate the properties of the rock masses, a database was prepared and using the data available in 331 geological mappings and also using the information of the articles prepared about these four classification systems, the amount of each of these classifications and their correlation relationship during a statistical activity was obtained. It was determined using SPSS software and Pearson's correlation analysis and scatterplot as linear and logarithmic functions. The results of this relationship are shown in Table 1 and Figures 1 and 2. According to the data of 331 geological mappings extracted during a statistical activity by the same consolidation software implemented in geological mapping and the proposed consolidation of each of the classifications, it was evaluated and

investigated. According to the results obtained from the correlation analysis and scatter diagram, due to various limitations, it is not possible to obtain a relationship between the specifications of the implemented stone screws and what was proposed, and also the specifications of the implemented steel frame with what was proposed. In this research, only the thickness of the shotcrete has been studied and evaluated and acceptable results have been obtained, and only the results of the analysis and evaluation of the thickness of the shotcrete implemented with the proposed values in different classifications of the rock mass have been studied. It should be noted that since the thickness of shotcrete proposed in the wall and roof of the tunnel is different, therefore, an average of them in different classifications has been examined, and the results of this evaluation are shown in Table 2 and Figure 2.

Table 1. Correlation relationship between different rock mass classifications

Comparison of correlation coefficient between different classifications				
Different classifications of rock mass	The correlation coefficient	determination coefficient	relationship Type	Correlation relationship
RMR and Q Classification	0.796	0.634	logarithmic	$RMR=44.67+8.88\ln(Q)$ (1)
RMR and BQ Classification	0.805	0.648	linear	$RMR=25.34+0.05BQ$ (2)
RMR and JH Classification	0.847	0.718	linear	$RMR=15.15+0.57JH$ (3)
Q and BQ Classification	0.727	0.529	logarithmic	$BQ=4.04E2+1.42e2\ln(Q)$ (4)
Q and JH Classification	0.701	0.492	logarithmic	$JH=5.75+11.66\ln(Q)$ (5)
BQ and JH Classification	0.787	0.619	linear	$BQ=-73.69+9.22JH$ (6)

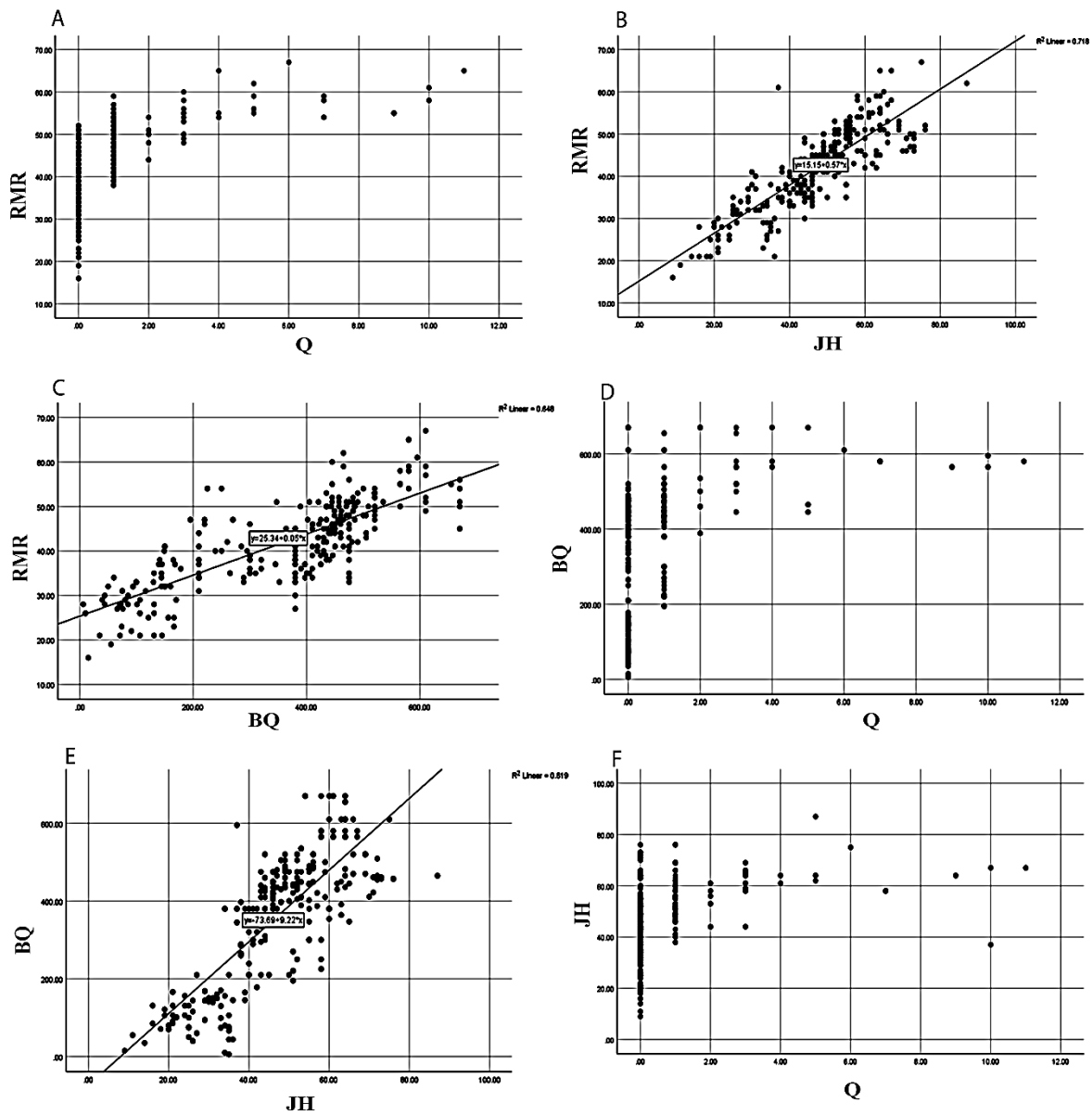


Fig. 1. Distribution chart between different classifications (RMR, Q, BQ, JH)

Each of the diagrams A, B, C, D, E, F shown in Figure 1 shows the relationship of each of the classifications in the following order:

A: Correlation between RMR and Q classification
 B: Correlation between RMR and JH classification

C: Correlation between RMR and BQ classification

D: Correlation between BQ and Q classification

E: Correlation between BQ and JH classification

F: Correlation between Q and JH classification

Table 2. The relationship and correlation coefficient between the thickness of shotcrete implemented (Y) and the suggested amount in different classifications (X)

Comparison of the correlation coefficient between the implemented consolidation and its proposed type in each rock mass classification				
Different classifications of rock mass	The correlation coefficient	determination coefficient	relationship type	Correlation relationship
Correlation relationship between the thickness of shotcrete implemented and its proposed type in RMR classification	0.644	0.428	linear	$Y = -7.56 + 2.09 X$ (7)
Correlation relationship between the thickness of shotcrete implemented and its proposed type in Q classification	0.657	0.431	linear	$Y = -5.89 + 1.59 X$ (8)
Correlation relationship between the thickness of shotcrete implemented and its proposed type in BQ classification	0.675	0.456	linear	$Y = 1 + 1.18 X$ (9)
Correlation relationship between the thickness of shotcrete implemented and its proposed type in JH classification	0.782	0.612	linear	$Y = -10.56 + 1.91 X$ (10)

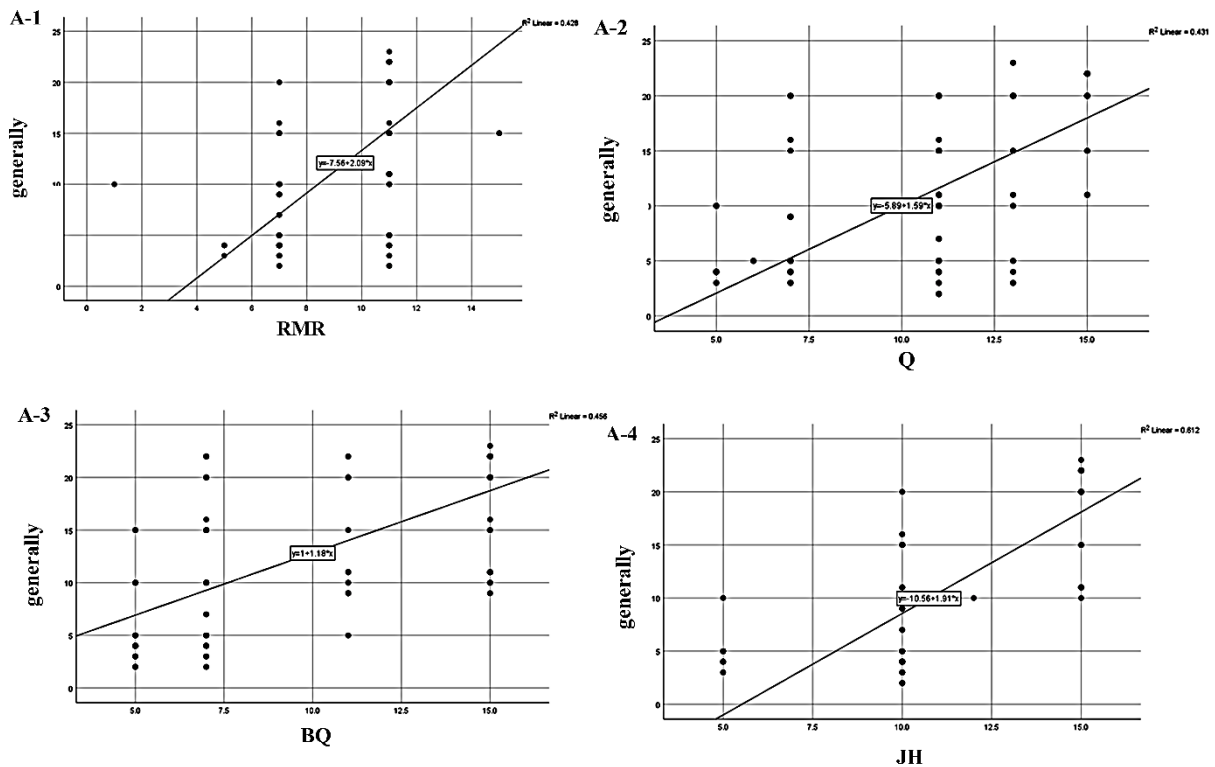


Fig. 2. Distribution chart between implemented consolidation (generally) and its proposed value in different classifications

Each of the A-1, A-2, A-3, A-4 graphs shown in Figure 2 shows the relationship between the proposed stabilization method of each of the classifications and the proposed method implemented in the geological

mapping of each of the introduced tunnels, respectively.

A-1: The proposed stabilization method of RMR classification and the proposed method implemented in geological mapping

A-2: The proposed stabilization method of Q classification and the proposed method implemented in geological mapping

A-3: The proposed stabilization method of BQ classification and the proposed method implemented in geological mapping

A-4: The proposed stabilization method of JH classification and the proposed method implemented in geological mapping.

Conclusion

According to the results obtained from the comparison and examination of the correlation relations and also the obtained correlation coefficient which is shown in Table 1, it was finally found that the JH classification system has a good relationship with the RMR classification system with the highest correlation coefficient of 0.847. Relationship (11), is a new equation obtained from this relation:

$$\text{RMR} = 15.15 + 0.57\text{JH} \quad (11)$$

Also, during the evaluation of the results of comparing the implemented consolidation with the proposed consolidation of each of the methods and determining the relationship and correlation coefficient of each of them, the results of which are shown in Table No. 2, it was concluded that the proposed stabilization method (suggested shotcrete) in The JH classification with a high correlation

coefficient (0.782) has a good relationship with the applied stabilization method (shotcrete) and is closer to the target. Therefore, relationship (12) is a new equation obtained through this relation:

$$Y = 10.56 + 1.91X \quad (12)$$




In this regard, Y represents the implemented consolidation and X represents the proposed consolidation in each classification.

According to the obtained results, it can be said that the JH method can evaluate several types of rocks and therefore propose a suitable and efficient support system compared to other methods, and this issue can make the new equations for the JH method able to Optimization of RMR, Q and BQ classification systems.

References

- Laderian, A. and Abaspoor, M, A., 2012. "The Correlation Between RMR and Q-systems in Parts of Iran" *Tunnelling and Underground Space Technology*, 27, 149-158.
- Palmstrom, A. and Broch, E., 2006. Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system. *Tunnels and Underground Space Technology*, 21(6), 575-593.
- Rahmannejad, R. and Mohammadi, H., 2007. "Comparison of Rock Mass Classification Systems," *Journal of Mining Science*, 43(4), 404-408.

CRedit authorship contribution statement

 Mehdi Talkhablou	Conceptualization, Methodology, Validation, Formal analysis, Data Curation, Writing-Review & Editing, Supervision, Project administration
 Seyed Mahmoud Fatemi Aghda	Methodology, Validation, Writing-Review & Editing, Funding acquisition
 Hashem Milani Cheghooshi	Software, Validation, Formal analysis, Investigation, Resources, Writing-Original Draft



مقایسه روش‌های معتبر طبقه‌بندی توده سنگ با نگرشی بر تعیین پوشش اولیه

مهدی تلخابلو^{۱*}، سید محمود فاطمی عقدا^۲، هاشم میلانی چقوشی^۳

۱. استادیار، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
۲. استاد، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
۳. کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۰۹ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۰	امروزه مطالعات گسترده‌ای جهت ارائه طرحی مناسب در نگهداری فضاهای زیرزمینی انجام می‌گیرد. یکی از راه‌های دستیابی به ویژگی‌های توده سنگ‌ها جهت طراحی‌های مهندسی استفاده از روش‌های مختلف طبقه‌بندی توده سنگ می‌باشد. از این رو طبقه‌بندی‌های مهندسی سنگ به طور گسترده‌ای در مراحل اولیه طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرند و اگر به طور صحیح به کار گرفته شوند می‌تواند ابزار توانمندی برای تخمین پایداری توده سنگ، ارائه سیستم نگهداری مناسب برای فضاهای زیرزمینی و همچنین پیش‌بینی ویژگی‌های رفتاری توده سنگ باشد. هدف اصلی از تحقیق حاضر بررسی و مقایسه روش‌های معتبر طبقه‌بندی توده سنگ با نگرشی بر تعیین پوشش اولیه می‌باشد. در این تحقیق ابتدا، سعی گردیده که با استفاده از بانک اطلاعاتی تهیه شده و بهره‌گیری از داده‌های ۳۳۱ ازبلیت زمین‌شناسی تونل‌های مطالعه شده در این تحقیق، که در آن‌ها از چهار سیستم طبقه‌بندی RMR، Q، BQ و JH برای تعیین کیفیت توده سنگ‌ها استفاده شده، مقدار هر یک از طبقه‌بندی‌ها مشخص شود. سپس رابطه همبستگی آن‌ها طی تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم افزار SPSS و تحلیل همبستگی پیرسون و نمودار پراکنش به صورت توابع مناسب تعیین شده و رابطه جدید با بالاترین ضریب همبستگی ارائه گردیده است. همچنین با مقایسه روش پایداری اجرا شده در تونل‌های مورد مطالعه (که اطلاعات آن از ازبلیت زمین‌شناسی تونل‌های مورد مطالعه استخراج شده) و روش پایداری پیشنهادی توسط هریک از روش‌های طبقه‌بندی معرفی شده، رابطه و ضریب همبستگی هریک از آنها به دست آمد. نتایج بدست آمده نشان داد که طبقه‌بندی JH می‌تواند چندین نوع سنگ را مورد ارزیابی قرار دهد و یک سیستم پشتیبانی مناسب و کارآمد را در مقایسه با سایر روش‌ها پیشنهاد نماید.
واژه‌های کلیدی طبقه‌بندی توده سنگ، طبقه‌بندی RMR، طبقه‌بندی Q، طبقه‌بندی BQ، طبقه‌بندی JH، تحلیل همبستگی پیرسون.	



مقدمه

بسیاری از سازه‌های مهندسی اغلب یا بر روی سطح زمین و یا با حفاری که در محیط‌های زیرزمینی صورت می‌گیرد، درون زمین بنا می‌شوند. معمولاً این سازه‌ها در تماس با محیط‌های سنگی شامل سنگ‌های بدون درزه و توده سنگ‌های درزه‌دار می‌باشند. از این رو طراحی ایمن و اقتصادی این

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2023.8.2.106241>

*نویسنده مسئول: مهدی تلخابلو talkhablou@khu.ac.ir

استناد به این مقاله: تلخابلو، م.، فاطمی عقدا، م.، میلانی چقوشی، ه. (۱۴۰۱). مقایسه روش‌های معتبر طبقه‌بندی توده سنگ با نگرشی بر تعیین پوشش اولیه، ایران. مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۸، شماره ۲، صفحه ۹۴ تا ۱۱۶.

<http://doi.org/10.22034/KJES.2023.8.2.106241>



برای تعیین پارامترهای مورد نظر جمع آوری می‌شود. اما گاهی به دلیل کمبود داده‌ها، امکان ارزیابی توده سنگ در سیستم‌های طبقه‌بندی وجود ندارد، از این رو در چنین شرایطی روابط و همبستگی‌های مناسب بین این طبقه‌بندی‌ها، می‌تواند بسیار مفید بوده و ضمن ارزیابی مناسب از وضعیت توده سنگ، منجر به ارائه طرحی اقتصادی و ایمن شود. به علاوه، مهندسان اغلب مشتاق هستند که از روابط ریاضی بهره گیرند تا با محدودیت‌های مربوط به کارهای عملی روبرو نشوند (Palmstrom and Broch, 2006). همچنین با تعریف روابط بین این طبقه‌بندی‌ها، می‌توان قسمت‌های انجام شده پروژه را به‌طور روزانه کنترل و از صحت آن اطمینان حاصل نموده و با اعتماد بیشتری نسبت به انتخاب سیستم‌های نگهداری موقت در شرایط خاص اقدام نمود (Frenzo et al., 2010).

در این تحقیق سعی گردیده که با استفاده از بانک اطلاعاتی تهیه شده و بهره‌گیری از داده‌هایی که از ازبلیت زمین‌شناسی تونل‌های مختلف مطالعه شده در این تحقیق استخراج شده و در آنها از چهار سیستم طبقه‌بندی RMR، Q، BQ و JH برای تعیین کیفیت توده سنگ‌ها استفاده شده، ابتدا با انجام عملیات آماری بر روی داده‌های موجود یک رابطه جدید بین سیستم‌های طبقه‌بندی موصوف ارائه شود و سپس با مقایسه این روابط و ضریب همبستگی بین آن‌ها، یک رابطه جدید با بالاترین ضریب همبستگی ارائه گردد. سپس با مقایسه روش پایدارسازی اجرا شده در تونل‌های مورد مطالعه که اطلاعات آن از ازبلیت

سازه‌ها و نیز ارائه روش حفاری و سیستم نگهداری مناسب برای فضا‌های زیرزمینی نظیر تونل‌ها، ارزیابی مناسب از ویژگی‌ها، رفتار تغییرشکلی و مقاومتی محیط سنگی موجود، تحت تنش‌های وارده، لازم و ضروری است. یکی از راه‌های دستیابی به ویژگی‌های توده سنگ‌ها جهت طراحی‌های مهندسی (طراحی تجربی، تحلیلی و عددی) استفاده از روش‌های مختلف طبقه‌بندی توده‌سنگ می‌باشد (Laderian and Abaspoor, 2012). از این رو طبقه‌بندی‌های مهندسی سنگ به طور گسترده‌ای در مراحل اولیه طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرند و اگر به طور صحیح به کار گرفته شوند می‌تواند ابزار توانمندی برای تخمین پایداری توده سنگ، ارائه سیستم نگهداری مناسب برای فضا‌های زیرزمینی و همچنین پیش‌بینی ویژگی‌های رفتاری توده سنگ باشد (Rahmannejad and Mohammadi, 2007).

هرکدام از سیستم‌های طبقه‌بندی RMR، Q، BQ و JH از چند پارامتر اثرگذار تشکیل شده که هر یک به سطوحی تقسیم می‌شوند. این پارامترها را می‌توان با مجموعه‌ای از عملیات صحرایی و آزمایشگاهی تخمین زد و با توجه به این که پارامتر مورد نظر در چه سطحی قرار دارد یک امتیاز به آن تعلق می‌گیرد. در نهایت امتیازهای همه پارامترها با هم جمع شده و امتیاز نهایی توده سنگ در سیستم مورد نظر به دست می‌آید که ارزیابی کیفی از توده سنگ منطقه و ویژگی‌های ژئومکانیکی آن، به این امتیاز بستگی دارد (Palmstrom and Broch, 2006). در اغلب پروژه‌ها با مطالعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی، اطلاعات لازم

زمین‌شناسی این تونل‌ها استخراج شده و روش پایداری‌سازی پیشنهادی توسط هریک از روش‌های طبقه‌بندی معرفی شده، رابطه و ضریب همبستگی هریک از آنها به دست آید و در نهایت روش پایداری‌سازی با ضریب همبستگی بالا معرفی شود.

مواد و روش‌ها

بانک اطلاعات جمع آوری شده

طبقه‌بندی RMR

طبقه‌بندی ژئومکانیکی یا امتیازدهی توده سنگ (RMR) اولین بار توسط بنیاووسکی (Bieniawski, 1973) در کمیته تحقیقات صنعتی و علمی افریقای جنوبی (CSIR) و بر پایه تجربیاتش در تونل‌های کم عمق در سنگ‌های رسوبی گسترش یافت. پس از آن این طبقه‌بندی چندین بار متحول شد. در سال ۱۹۷۴، کاهش امتیاز پارامترها از ۸ به ۶، در سال ۱۹۷۵، تعدیل امتیاز دهی، در سال ۱۹۷۶ تغییر در مرز کلاس‌ها به ضریبی از ۲۰ و در سال ۱۹۷۹

سازگاری با طبقه‌بندی ISRM در توصیف سنگ صورت گرفت. لذا همیشه باید مشخص شود که از کدام ویرایش از این طبقه‌بندی استفاده شده است. به منظور استفاده از سیستم طبقه‌بندی ژئومکانیکی، محل مورد نظر باید به چندین محدوده زمین‌شناسی ساختاری تقسیم شود به طوری که هر نوع از توده سنگ نماینده یک ساختار زمین‌شناسی مشخص باشد (Bieniawski, 1974). شش پارامتر مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر، شاخص کیفی توده سنگ، فاصله‌داری درزه‌ها یا ناپیوستگی‌ها، شرایط درزه‌ها، وضعیت آب زیرزمینی و جهت‌یابی درزه‌های هر واحد زمین‌شناسی، در این طبقه‌بندی مشخص می‌شود (Bieniawski, 1974). در جدول ۱ جزئیات سیستم طبقه‌بندی RMR و نحوه امتیازدهی این شش پارامتر ارائه شده است (Bieniawski, 1974). الگوی روش پایداری‌سازی پیشنهادی در این روش در جدول ۲ بیان شده است (Bieniawski, 1974).

جدول ۱- خلاصه‌ای از جزئیات سیستم طبقه‌بندی RMR

Table 1. Summary of the details of the RMR classification system

پارامتر	توصیف	محدوده امتیاز
R_{bs}	مقاومت فشاری تک محوره (اندیس بارنقطه‌ای)	15-0
R_{RQD}	RQD	20-3
R_{dj}	فاصله داری ناپیوستگی‌ها	20-5
R_{cj}	شرایط ناپیوستگی‌ها	30-0
R_w	شرایط آبهای زیرزمینی	15-0
R_{oj}	تعدیل جهت درزه‌ها	(-60)-0
RMR	امتیاز توده سنگ	100-0
	$R_{bs} + R_{RQD} + R_{dj} + R_{cj} + R_w + R_{oj}$	(1)

جدول ۲- راهنمایی برای حفاری و نگهداری تونل بر پایه سیستم امتیازدهی توده سنگ RMR

Table 2. Guidelines for tunnel excavation and maintenance based on RMR rock mass grading system

کلاس توده سنگ	روش حفاری	پوشش (سیستم نگهداری)		
		پیچ سنگ (قطر ۲۰)	شاتکریت	قاب فولادی
سنگ بسیار خوب $RMR = 81 - 100$	تمام مقطع؛ ران ۳ متری	بدون نیاز به نگهداری مگر در مواقع خاص نیاز به پیچ سنگ تصادفی		
سنگ خوب $RMR = 61 - 80$	تمام مقطع؛ پیشروی ۱ تا ۱/۵ متر؛ نگهداری کامل تا ۲۰ متر از سینه کار	پیچ سنگ در سقف به طول ۳ متر به صورت محلی، فاصله داری ۲/۵ متری و مش تصادفی	به ضخامت ۵۰ میلی متر در سقف	--
سنگ متوسط $RMR = 41 - 60$	طاق و پاتاق؛ ۱/۵ تا ۳ متر پیشروی در طاق؛ اجرای پوشش پس از هر ران انفجار؛ نگهداری کامل در فاصله ۱۰ متری سینه کار	پیچ سنگ سیستماتیک ۴ متری، فاصله ۱/۵ تا ۲ متر در سقف و دیوارها و مش فولادی در سقف.	به ضخامت ۱۰۰ تا ۱۵۰ میلی متر در سقف و ۳۰ میلی متر در دیوارها	--
سنگ ضعیف $RMR = 21 - 40$	طاق و پاتاق؛ پیشروی ۱ تا ۱/۵ متر در طاق؛ نصب پوشش همزمان با پیشروی به فاصله ۱۰ متری سینه کار	پیچ سنگ سیستماتیک به طول ۴ تا ۵ متر با فاصله ۱ تا ۱/۵ متر در سقف و دیوار همراه با مش فولادی	به ضخامت ۱۰۰ تا ۱۵۰ میلی متر در سقف و ۱۰۰ میلی متر در دیوارها	قاب سبک تا متوسط با فاصله ۱/۵ متر (در صورت نیاز)
سنگ بسیار ضعیف $RMR < 20$	حفاری چند مرحله‌ای؛ پیشروی ۱/۵ تا ۰/۵ متری در طاق؛ نصب پوشش همزمان با پیشروی؛ شاتکریت در کمترین زمان ممکن پس از انفجار	پیچ سنگ سیستماتیک به طول ۵ تا ۶ متر با فاصله ۱ تا ۱/۵ متر در سقف و دیوار همراه با مش فولادی؛ پیچ سنگ در کف	۱۵۰ میلی متر در سقف و ۱۵۰ میلی متر در دیوارها و ۵۰ میلی متر در سینه کار	قاب متوسط تا سنگین با فاصله ۰/۷۵ متر و در صورت نیاز استفاده از فورپولینگ و کف بند.

طبقه‌بندی Q

طبقه‌بندی Q توسط انستیتوی ژئوتکنیک نروژ توسط بارتون و همکاران (Barton et al., 1974) توسعه یافت. از سال ۱۹۷۴ که اولین طبقه‌بندی Q ارائه شده، پیشرفت قابل توجهی در فلسفه سیستم‌های نگهداری توده‌سنگ و تکنولوژی حفاری زیرزمینی بدست آمده است. به همین دلیل در طول زمان این طبقه‌بندی نیز دچار تغییراتی شده است. آخرین ویرایش این طبقه‌بندی تحت عنوان راهنمای استفاده از سیستم Q توسط انستیتوی ژئوتکنیک نروژ (NGI, 2015) ارائه شده است. این سیستم طبقه‌بندی در کنار طبقه‌بندی RMR پرکاربردترین سیستم طبقه‌بندی در حفاری فضاهای زیرزمینی در مهندسی سنگ محسوب می‌شود (NGI, 2015). مقدار Q توصیفی از پایداری

فضای زیرزمینی در توده‌سنگ درزه‌دار را ارائه می‌کند. مقادیر بالای این سیستم نشان دهنده پایداری خوب و مقادیر پایین نشان دهنده پایداری ضعیف است (NGI, 2015). این سیستم طبقه‌بندی بر اساس ۶ پارامتر محاسبه می‌شود. این شش پارامتر شامل شاخص درزه‌داری (توصیف کیفی سنگ)، عدد دسته درزه، عدد زبری درزه، عدد هوازگی درزه، شاخص کاهش آب درزه و شاخص کاهش تنش هستند (Barton et al., 1974; Grimstad and Barton, 1993).

در جدول ۳ خلاصه‌ای از جزئیات سیستم طبقه‌بندی Q بیان شده است (Barton et al., 1974). در جدول ۴ روش پایدارسازی پیشنهادشده توسط روش Q ارائه شده است (NGI, 2015).

جدول ۳- خلاصه‌ای از جزئیات سیستم طبقه‌بندی Q

Table 3. Summary of the details of the Q classification system

پارامتر	توصیف	محدوده	عبارت حاصل	توصیف عبارت
RQD	شاخص کیفیت توده سنگ	10-100	RQD/J _n (2)	اندازه نسبی بلوک‌های سنگ
J _n	تعداد دسته درزه‌ها	0.5-20		
J _r	شاخص زبری درزه‌ها	0.5-4	J _r /J _a (3)	مقاومت برشی بین بلوک‌های سنگ
J _a	عددتخریب درزه‌ها	0.75-20		
J _w	فاکتورکاهش به علت وجود آب در درزه‌ها	0.05-1	J _w /SRF (4)	تنش موثر
SRF	فاکتور کاهش برای شرایط تنش خاص	0.5-20		
Q	شاخص کیفیت تونل زنی	0.001-1000	$\frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$ (5)	

جدول ۴- راهنمایی برای حفاری و نگهداری تونل بر پایه سیستم امتیازدهی توده سنگ Q

Table 4. Guidelines for tunnel excavation and maintenance based on Q rock mass grading system

طبقه نگهداری	RRS	فاصله داری مرتبط به عدد Q
۱) بدون نیاز به نگهداری یا بولت نقطه ای	I	S1۲.۰۶ Φ ۱۶.۲۰ (Span ۱۰m)
۲) بولت نقطه ای (SB)		D۲۰.۶۰۲ Φ ۱۶.۲۰ (Span ۱۰m)
۳) بولت سیستماتیک، شاکریت تقویت شده یا مش به ضخامت ۵ تا ۶ سانتی متر، (B.Sfr)	II	S۱۳.۵۶ Φ ۱۶.۲۰ (Span ۱۰m)
۴) شاکریت تقویت شده یا مش به ضخامت ۹ تا ۱۱ سانتی متر و بولت، (E۵۰۰.Sfr)		D۴۵.۶۰۲ Φ ۱۶.۲۰ (Span ۱۰m)
۵) شاکریت تقویت شده یا مش به ضخامت ۱۲ تا ۱۴ سانتی متر و بولت، (E۷۰۰.Sfr)		D۵۵.۶۰۴ Φ ۲۰ (Span ۲۰m)
۶) شاکریت تقویت شده یا مش به ضخامت ۱۲ تا ۱۵ سانتی متر و بولت + قاب فولادی، شاکریت و بولت، (RRS I+ B(E۷۰۰.Sfr)	III	D۲۰.۶۰۲ Φ ۱۶.۲۰ (Span ۱۰m)
		D۵۵.۶۰۴ Φ ۲۰ (Span ۱۰m)
۷) شاکریت تقویت شده یا مش به ضخامت بیش از ۱۵ سانتی متر + قاب فولادی، شاکریت و بولت، (RRS II+ B(E۱۰۰۰.Sfr)		Special evaluation (Span ۲۰m)
۸) لاینینگ یا سگمنت بتنی، CCA یا Sfr، (RRS III - B(E۱۰۰۰.Sfr)	S۱۳.۰۶	لایه ساده ای از ۶ میلگرد، ۳۰ سانتی متر ضخامت شاکریت
۹) ارزیابی خاص		
فاصله بولت‌ها بر اساس ۲۰ mm قرار داده شده است.	D	لایه دوپل میلگرد
جذب انرژی در بتن (شاکریت) تقویت شده = E	Φ۱۶	قطر میلگرد ۱۶ میلی‌متر
نسبت نگهداری حفاری = ESR	c/c	فاصله داری قاب تقویت شده یا شاکریت، مرکز به مرکز.
نقاط خط چین فاصله داده بحرانی است.		

سرعت موج P در توده سنگ و آزمایشگاه به دست

می‌آید (Rui-Xin and Yan-Jun, 2015).

$$K_v = \frac{V_{pm}^2}{V_{Pr}^2} \quad \& \quad (0 \leq K_v \leq 1) \quad (6)$$

سرعت موج صوت در توده سنگ نه تنها به ترکیب و ساختمان سنگ بلکه به ناپیوستگی‌های سنگ، سیمان‌شدگی درزه‌ها و شرایط آب زیرزمینی وابسته است، لذا K_v نوعی ارزیابی از یکپارچگی توده سنگ است. در نهایت با استفاده رابطه (۷) می‌توان مقدار BQ را به دست آورد (Rui-Xin and Yan-Jun, 2015).

$$BQ = 90 + 3UCS + 250K_v \quad (7)$$

در استفاده از این سیستم دو شرط محدود باید مد نظر قرار گیرد.

طبقه بندی BQ

سیستم طبقه بندی BQ برای رده بندی مهندسی توده سنگ در انواع سنگ‌ها در کشور چین مورد استفاده قرار گرفته است (Rui-Xin and Yan-Jun, 2015). این سیستم بر پایه موارد مهندسی مختلف سنگ در این کشور توسعه یافته است. برای این طبقه بندی دو مرحله نیاز است. ابتدا دو ویژگی معمول که در مهندسی توده سنگ اهمیت دارند، یعنی مقاومت فشاری تک محوری و یکپارچگی سنگ و سپس سه فاکتور تصحیح شامل آب‌های زیرزمینی، جهت یابی درزه‌ها و حالت تنش‌های برجا تعیین می‌شوند. دو شاخص کمی شامل مقاومت فشاری تک محوری (UCS) و شاخص یکپارچگی سنگ (K_v) در محاسبات این طبقه بندی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقدار K_v با استفاده از

پارامتر مربوط به جهت‌یابی درزه‌ها و K_3 پارامتر مربوط به شرایط تنش‌های برجا) برای ویرایش مقدار BQ مورد استفاده قرار می‌گیرند. مقدار BQ اصلاح شده را به صورت [BQ] نشان می‌دهند و از رابطه (۸) محاسبه می‌شود (Rui-Xin and Yan- Jun, 2015):

$$[BQ] = BQ - 100(K_1 + K_2 + K_3) \quad (8)$$

در جدول ۵ خلاصه‌ای از محدوده امتیازدهی و جزئیات سیستم طبقه‌بندی BQ ارائه شده است (Rui-Xin and Yan-Jun, 2015). نحوه پایدارسازی روش BQ همانند روش پایدارسازی به روش RMR می‌باشد که در جدول ۲ ارائه شده است (Rui-Xin and Yan-Jun, 2015).

- زمانی که $UCS > 90K_v + 30$ باید از معادله $UCS = 90K_v + 30$ در محاسبه BQ استفاده کرد.

- زمانی که $K_v > 0.4 + 0.04UCS$ باشد از معادله $K_v = 0.4 + 0.04UCS$ در محاسبه BQ استفاده می‌شود.

در این سیستم طبقه‌بندی سنگ‌ها به ۵ دسته اصلی تقسیم می‌شوند (Rui-Xin and Yan-Jun, 2015):

(کلاس I, $BQ > 550$)، (کلاس II, $BQ = 451-550$)، (کلاس III, $BQ = 351-450$)، (کلاس IV, $BQ = 251-350$)، (کلاس V, $BQ < 250$).

با توجه به تاثیر شرایط زمین‌شناسی و حفاری سه ضریب (K_1 پارامتر شرایط آب زیرزمینی، K_2

جدول ۵- خلاصه‌ای از جزئیات سیستم طبقه‌بندی BQ

Table 5. Summarizes the details of the BQ classification system

پارامتر	توصیف		محدوده
K_1	آبهای زیرزمینی		0-1
K_2	جهت‌یابی درزه‌ها		0-0.6
K_3	تنش‌های برجا		0-1
BQ	مقاومت تک محوره	UCS	$90+3UCS+250K_v$
	یکپارچگی سنگ	K_v	
[BQ]	$BQ - 100(K_1 + K_2 + K_3)$		0-1000

سنگ (مقاومت تک محوره سنگ، هوازدگی، فاصله ناپیوستگی‌ها، شرایط ناپیوستگی‌ها)، می‌تواند سیستم‌های نگهداری از قبیل بولت، قاب فولادی و شاتکریت را پیشنهاد دهد (Akagi, 2001). در این

طبقه‌بندی JH

آکاگی (Akagi, 2001) روشی نوین برای طبقه‌بندی توده سنگ ارائه داد. این روش مخصوص تونل‌سازی بوده و با استفاده از برخی از پارامترهای

مجموع امتیازها به دست می آید. لازم به ذکر است که محدوده تغییرات سیستم JH از صفر تا ۱۰۰ می باشد (Akagi, 2001). در جدول ۶ خلاصه ای از جزئیات سیستم طبقه بندی JH و در جدول ۷ نحوه پایداری توسط این روش ارائه شده است (Akagi, 2001).

روش ابتدا سنگها در ۴ گروه دسته بندی می شوند که این دسته بندی در قالب سنگهای توده ای سخت، سنگهای توده ای متوسط و نرم، سنگهای مسطح متوسط و سنگهای مسطح نرم می باشد. در مرحله بعد پارامترهای ژئومکانیکی امتیاز بندی شده و در نهایت امتیاز JH توده سنگ مورد نظر از

جدول ۶- خلاصه ای از جزئیات سیستم طبقه بندی JH

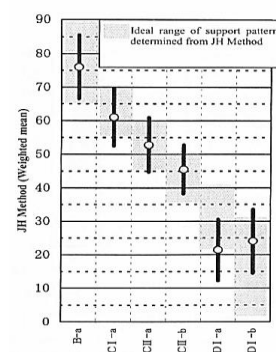
Table 6. Summary of the details of the JH classification system

گروه	پارامترها	توصیف پارامترها	محدوده تغییر
		امتیاز پارامترها	0-6
Grp1-Grp4	H _{bs}	مقاومت فشاری تک محوری	0-40
	H _a	هوازدگی	0-30
	H _{dj}	فاصله ناپیوستگی ها	0-30
	H _{cj}	شرایط ناپیوستگی ها	0-30
	H _w	تعدیل آب زیرزمینی	0-(-12)
	H _{oj}	تعدیل جهت یابی درزه ها	0-(-12)
		JH	$H_{bs} + H_a + H_{dj} + H_{cj} - H_w - H_{oj}$ (۹)

جدول ۷- راهنمایی برای حفاری و نگهداری تونل بر پایه سیستم امتیازدهی توده سنگ JH

Table 7. Guidelines for tunnel excavation and maintenance based on JH rock mass grading system

Patterns	Excavation length	Rock bolt spacing		Thickness of shotcrete	Steel rib	
		Length	Radial		Upper section	Lower section
B-a	2 m	3 m	1.5 m	5 cm	-	-
CI-a	1.5 m	3 m	1.5 m	10 cm	-	-
CII-a	1.2 m	3 m	1.5 m	10 cm	-	-
CII-b	1.2 m	3 m	1.5 m	10 cm	125 H	-
DI-a	1 m	3 m	1.2 m	15 cm	125 H	125 H
DI-b	1 m	4 m	1/2 m	15 cm	125 H	125 H



از آن در شکل ۲ ارائه شده است. اطلاعات کلی تونل های مورد مطالعه در این تحقیق در جدول ۸ ارائه شده است. مهم ترین معیارهای انتخاب این تونل ها، گوناگونی لیتولوژی و در دسترس بودن داده های مناسب جهت مطالعه و بررسی پارامترهای موثر در توده سنگ می باشد. با توجه به سنگ های

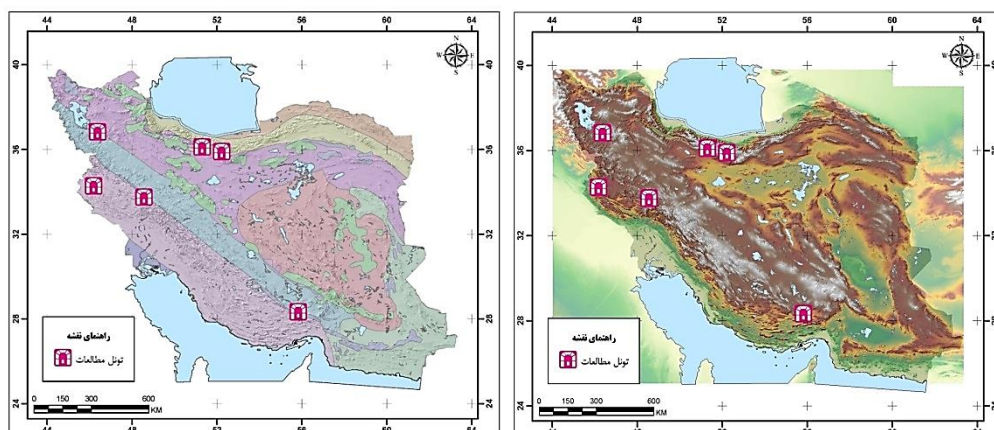
در این تحقیق داده های ۷ تونل که در مجموع به طول ۵۱۲۱ متر می باشد، مورد استفاده قرار گرفته است. پراکنش تونل های مورد مطالعه در زون های مختلف زمین شناسی ایران در شکل ۱ نشان داده شده است. در طول این مسیر ۳۳۱ ازبلیت زمین شناسی مورد استفاده قرار گرفته که نمونه ای

به هر تونل که قبلاً در محل حفاری شده، آماده و استخراج شده است. اطلاعات کلی در مورد این تونل‌ها و امتیاز نهایی هریک از طبقه‌بندی‌ها که الگوی امتیازدهی آنها باتوجه به جدول‌های ۵، ۳، ۱ و ۶ و با استفاده از داده‌های استخراج شده از مپینگ زمین‌شناسی بدست آمده در جدول ۸ و پراکندگی زمین‌شناسی آنها در شکل ۱ آورده شده است. مقاومت فشاری توده سنگ‌ها در حین حفاری با استفاده از دستگاه‌های بار نقطه‌ای و چکش اشمیت به دست آمده و در نقشه‌های چون‌ساخت زمین‌شناسی قرار گرفته است.

غالب و زون‌های گسله و برشی حاکم بر منطقه مورد مطالعه می‌توان گفت که از ۳۳۱ داده مپینگ که مورد مطالعه قرار گرفته، تقریباً ۴۰ درصد شامل ۱۲۱ مپینگ متعلق به سنگ‌های آهکی، ۳۵ درصد شامل ۱۱۱ مپینگ متعلق به سنگ‌های آذرین (اکثراً گرانیتی) و ۲۵ درصد شامل ۹۹ مپینگ نیز متعلق به سنگ‌های رسوبی (شیل و ماسه سنگ) می‌باشد. همچنین از این تعداد مپینگ، ۳۰ درصد در زون خردشده و گسله، ۵ درصد در زون برشی و ۲۵ درصد نیز در مناطقی با وجود دایک‌های بازالتی قرار گرفته است. دسته‌بندی عنوان شده با استفاده از داده‌های موجود در مپینگ زمین‌شناسی مرتبط

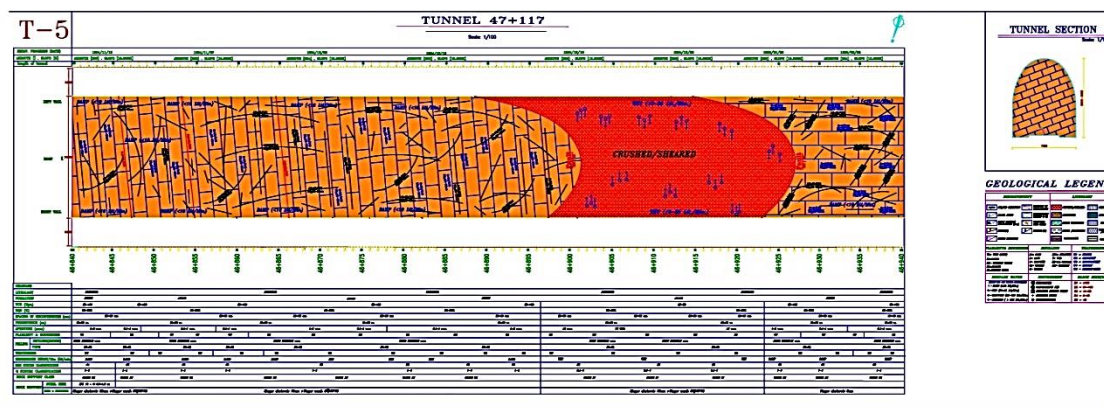
جدول ۸- اطلاعات کلی درباره تونل‌های مورد مطالعه Table 8. General information about the studied tunnels

JH	BQ	Q	RMR	متر از مورد مطالعه	موقعیت جغرافیایی	زون زمین‌شناسی	لیتولوژی	نوع تونل	تعداد مپینگ مطالعه شده	تونل
37-69	265-670	0.2-11.3	30-65	1115 m	جنوب آذربایجان غربی	ارومیه - بزمان	گرانیت	انتقال آب	111	1
16-60	71-485	0.03-1.62	21-54	1308 m	جنوب غربی لرستان	زاگرس	آهک و آهک شیلی	راه آهن	83	2
9-50	15-335	0.05-0.37	16-44	950 m	شمال باختری تهران	البرز	ماسه سنگ کربناته و شیل	جاده ای	30	3
33-87	130-610	0.24-6.13	21-65	143 m	کرمانشاه	زاگرس	آهک و آهک مارنی و کلسیتون	راه آهن	11	4
11-62	35-520	0.08-3.88	19-50	400 m	هرمزگان - شهر حاجی آباد	زاگرس	آهک	انتقال آب	27	5
26-76	6-509	0.07-1.17	23-52	1205 m	شمال تهران	البرز	توف و شیل	آزادراه- جاده‌ای	69	6 & 7



شکل ۱- نمایش پراکنش تونل‌های مورد مطالعه در زون‌های مختلف زمین‌شناسی ایران. سمت چپ (نقشه زمین‌شناسی) و سمت راست (نقشه ماهواره ای)

Fig. 1. Showing the distribution of studied tunnels in different geological zones of Iran. Left side (geological map), right side (satellite map)



شکل ۲- نمونه‌ای از پروفیل زمین‌شناسی مطالعه شده در تونل شماره ۲

Fig. 2. An example of a geological profile studied in tunnel 2.

در ادامه این تحقیق با استفاده از امتیاز هر طبقه‌بندی که در جدول ۸ اشاره شده و همچنین با استفاده از الگوی پایدارسازی هریک از روش‌های طبقه‌بندی معرفی شده که در جدول‌های ۲، ۴ و ۷ نشان داده شده است، روش پایدارسازی پیشنهادی هر یک روش‌ها به دست آمده است که نتایج آن در جدول ۹ ارائه شده است.

شکل ۲، نمونه‌ای از پروفیل زمین‌شناسی در تونل شماره ۲ که از انواع تونل‌های راه آهن در جنوب غربی لرستان واقع در زون زاگرس می‌باشد، را نشان می‌دهد. در این منطقه که به طول ۱۳۰۸ متر حفاری شده، بیشتر سنگ‌های آهکی حاکم هستند. در طول این مسیر از ۸۳ داده مپینگ استفاده شده است.

جدول ۹- بازه تغییرات پایداری اجرا شده و پایداری پیشنهادی در هر طبقه‌بندی

Table 9. The range of implemented stabilization changes and proposed stabilization in each classification

تحکیم تمامی تونل ها					
پایداری اجرا شده	پایداری‌های پیشنهادی				
اجرا شده در مپینگ	JH	BQ	Q	RMR	پایداری
2_23	5_15	0_15	5_25	1_15	شاتکریت (cm)
0_5	3_4	0_5	2_4	3_5	طول پیچ سنگ (m)
0_2	1_2	0_2	1_3	1_2	فاصله پیچ سنگ (m)
0_8	0_125 H	0_2	0_4	0_2	قاب فولادی (m)

تحلیل همبستگی پیرسون و نمودار پراکنش به صورت توابع خطی و لگاریتمی، ارتباط بین طبقه‌بندی‌های معرفی شده (RMR ، Q ، BQ و JH) در توده سنگ‌ها و زون‌های زمین‌شناسی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این ارتباط در جدول ۱۰ و شکل های ۳ تا ۸ ارائه شده است.

مقادیر پایداری اجرا شده در جدول ۹، از ۳۳۱ ازبلیت زمین‌شناسی استفاده شده در این تحقیق، استخراج شده است.

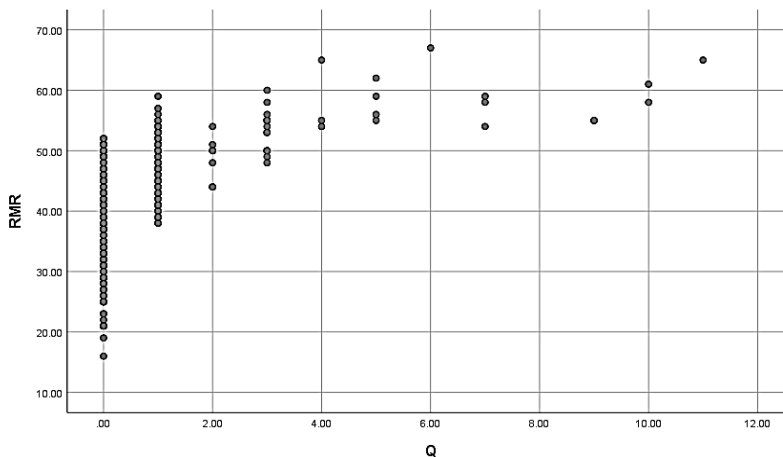
نتایج و بحث

در این تحقیق با توجه به نتایج حاصل از ۳۳۱ مپینگ زمین‌شناسی که اطلاعات آن در جدول ۵ آمده است و با استفاده از ارتباط آماری بین آن‌ها توسط نرم افزار آماری SPSS و به کمک روش

جدول ۱۰- رابطه همبستگی بین طبقه‌بندی‌های مختلف توده سنگ

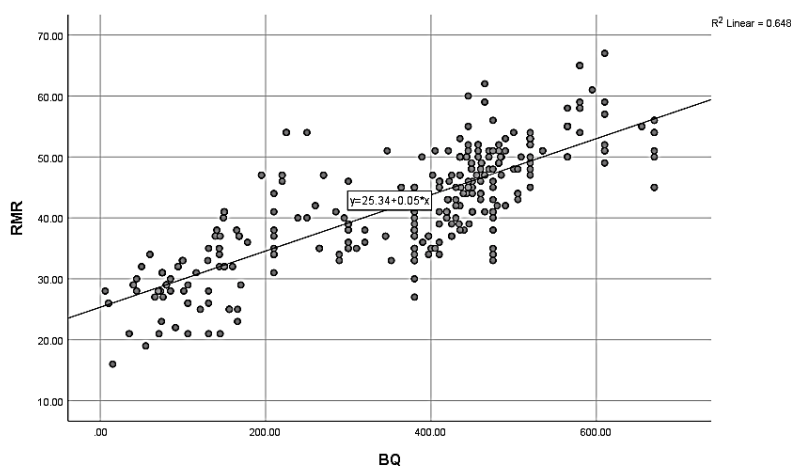
Table 10. Correlation relationship between different rock mass classifications

مقایسه ضریب همبستگی بین طبقه‌بندی های مختلف					
رابطه همبستگی	نوع رابطه	ضریب تعیین	ضریب همبستگی	طبقه‌بندی‌های مختلف توده سنگ	
$RMR=44.67+8.88\ln(Q)$	(۱۰)	لگاریتمی	0.634	0.796	طبقه‌بندی RMR و Q
$RMR=25.34+0.05BQ$	(۱۱)	خطی	0.648	0.805	طبقه‌بندی RMR و BQ
$RMR=15.15+0.57JH$	(۱۲)	خطی	0.718	0.847	طبقه‌بندی RMR و JH
$BQ=4.04E2+1.42e2\ln(Q)$	(۱۳)	لگاریتمی	0.529	0.727	طبقه‌بندی Q و BQ
$JH=50.75+11.66\ln(Q)$	(۱۴)	لگاریتمی	0.492	0.701	طبقه‌بندی Q و JH
$BQ=-73.69+9.22JH$	(۱۵)	خطی	0.619	0.787	طبقه‌بندی BQ و JH



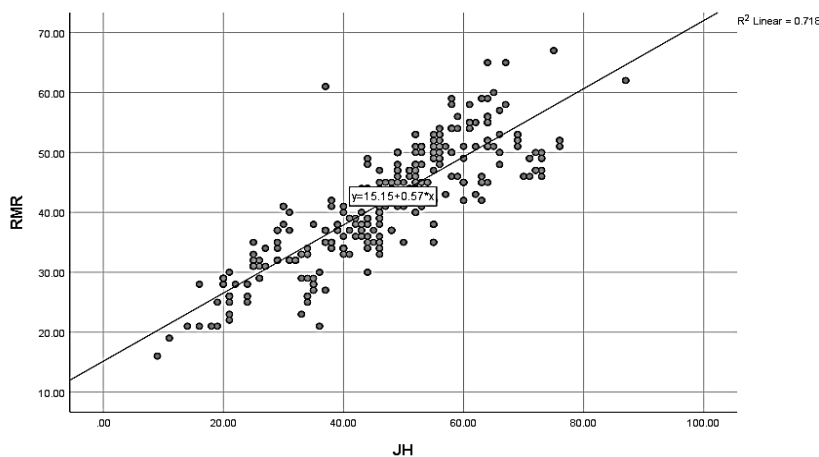
شکل ۳- نمودار پراکنش بین طبقه بندی های RMR و Q

Fig.3. Distribution chart between RMR and Q classifications



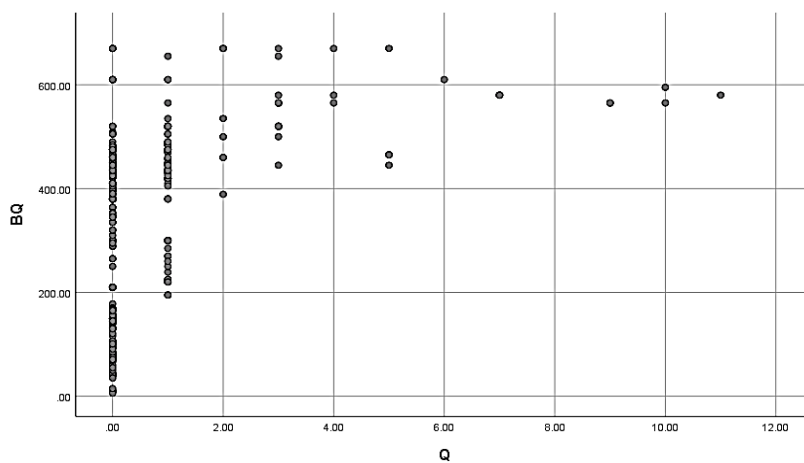
شکل ۴- نمودار پراکنش بین طبقه بندی های RMR و BQ

Fig.4. Distribution chart between RMR and BQ classifications



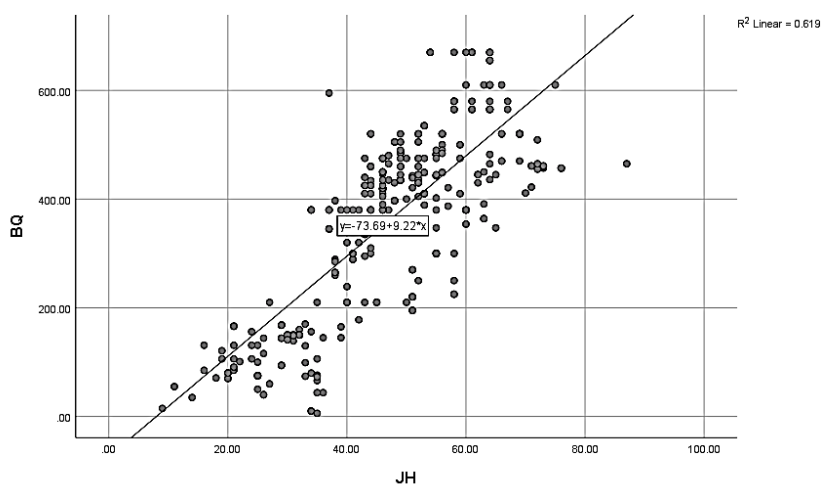
شکل ۵- نمودار پراکنش بین طبقه بندی های RMR و JH

Fig.5. Distribution chart between RMR and JH classifications



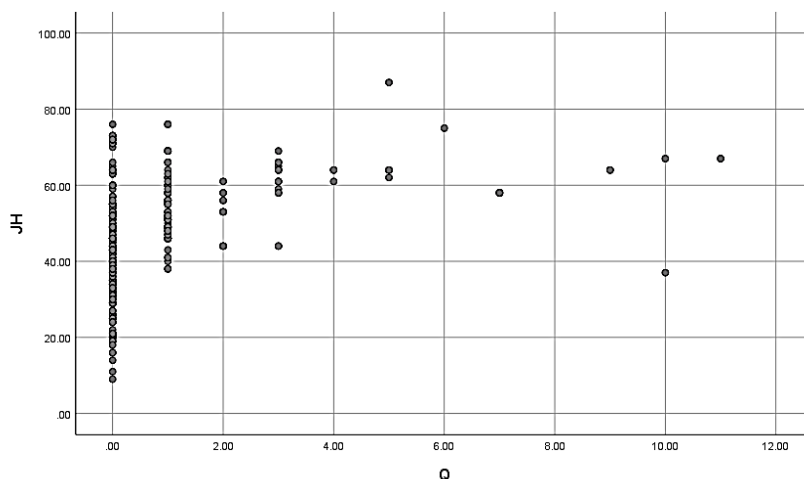
شکل ۶- نمودار پراکنش بین طبقه‌بندی های Q و BQ

Fig.6. Distribution chart between Q and BQ classifications



شکل ۷- نمودار پراکنش بین طبقه‌بندی های JH و BQ

Fig.7. Distribution chart between Q and JH classifications



شکل ۸- نمودار پراکنش بین طبقه‌بندی های Q و JH

Fig.8. Distribution chart between Q and JH classifications

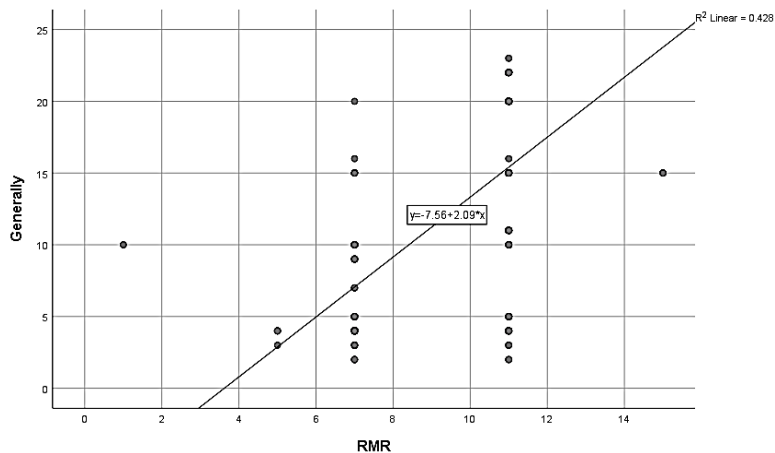
پرداخته شده است. لازم به ذکر است، از آنجایی که ضخامت پیشنهادی شاتکریت در دیواره و سقف تونل با هم متفاوت است، از این رو میانگینی از آن‌ها در طبقه‌بندی‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته که نتایج حاصل از آن در جدول ۱۱ و شکل‌های ۹ تا ۱۲ ارائه شده است.

به طور کلی در مورد پایدارسازی تونل‌ها آنچه در این تحقیق مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت و نتایج قابل قبولی از آن حاصل شد، ضخامت شاتکریت می‌باشد و به بررسی نتایج تحلیل و ارزیابی ضخامت شاتکریت اجراشده با مقادیر پیشنهادی در طبقه‌بندی‌های مختلف توده سنگ

جدول ۱۱- رابطه و ضریب همبستگی بین ضخامت شاتکریت اجرا شده (Y) و مقدار پیشنهادی در طبقه‌بندی های مختلف (X)

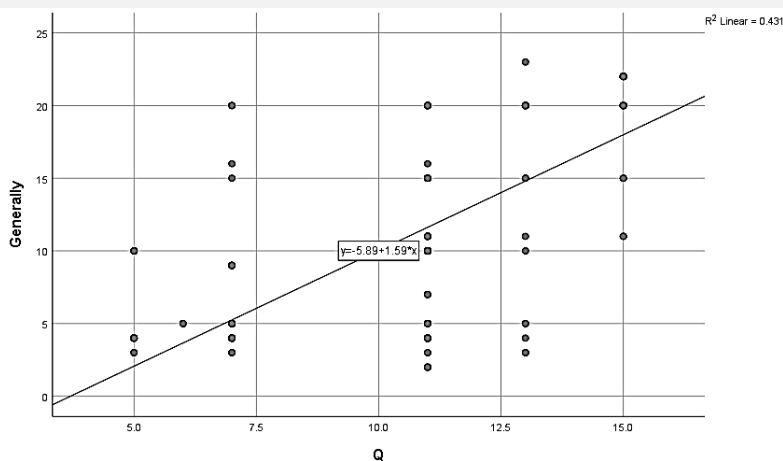
Table 11. The relationship and correlation coefficient between the thickness of shotcrete implemented (Y) and the suggested amount in different classifications (X)

مقایسه ضریب همبستگی بین پایدارسازی اجراشده و پایدارسازی پیشنهادی در هر یک از طبقه‌بندی‌های مختلف توده سنگ				
رابطه همبستگی	نوع رابطه	ضریب تعیین	ضریب همبستگی	طبقه‌بندی‌های مختلف توده سنگ
$Y = -7.56 + 2.09 X$ (16)	خطی	0.428	0.654	رابطه همبستگی بین ضخامت شاتکریت اجراشده و نوع پیشنهادی آن در طبقه‌بندی RMR
$Y = -5.89 + 1.59 X$ (17)	خطی	0.431	0.657	رابطه همبستگی بین ضخامت شاتکریت اجراشده و نوع پیشنهادی آن در طبقه‌بندی Q
$Y = 1 + 1.18 X$ (18)	خطی	0.456	0.675	رابطه همبستگی بین ضخامت شاتکریت اجراشده و نوع پیشنهادی آن در طبقه‌بندی BQ
$Y = -10.56 + 1.91 X$ (19)	خطی	0.612	0.782	رابطه همبستگی بین ضخامت شاتکریت اجراشده و نوع پیشنهادی آن در طبقه‌بندی JH



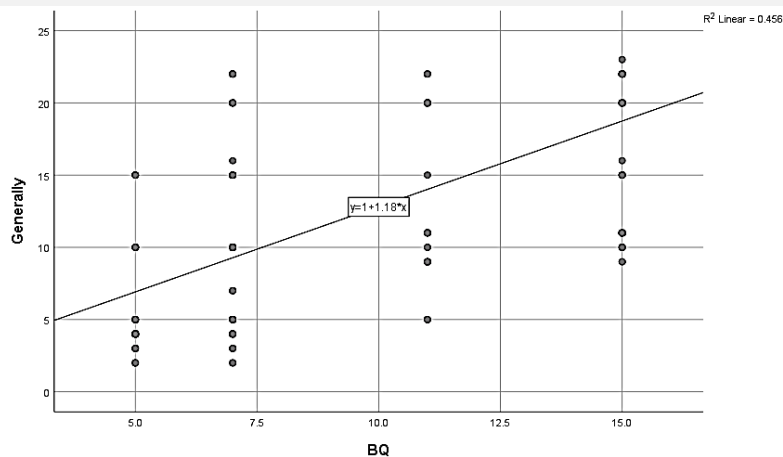
شکل ۹- نمودار پراکنش بین پایدارسازی اجراشده (Generally) و مقدار پیشنهادی آن در طبقه‌بندی RMR

Fig.9. Distribution chart between implemented stabilization (Generally) and its proposed value in RMR classifications



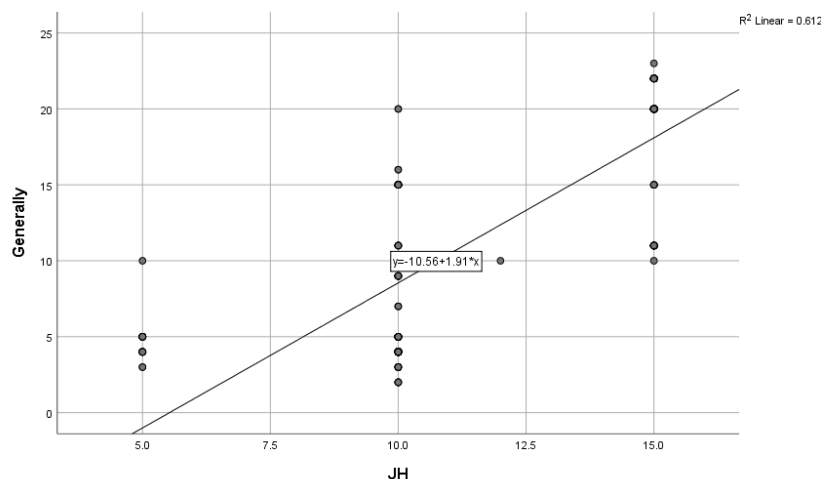
شکل ۱۰- نمودار پراکنش بین پایدارسازی اجراشده (Generally) و مقدار پیشنهادی آن در طبقه‌بندی Q

Fig.10. Distribution chart between implemented stabilization (Generally) and its proposed value in Q classifications



شکل ۱۱- نمودار پراکنش بین پایدارسازی اجراشده (Generally) و مقدار پیشنهادی آن در طبقه‌بندی BQ

Fig.11. Distribution chart between implemented stabilization (Generally) and its proposed value in BQ classifications



شکل ۱۲- نمودار پراکنش بین پایدارسازی اجراشده (Generally) و مقدار پیشنهادی آن در طبقه‌بندی JH
 Fig.12. Distribution chart between implemented stabilization (Generally) and its proposed value in JH classifications

نتیجه گیری

استفاده از روابط ریاضی در علوم مختلف مهندسی، بویژه در سال‌های اخیر، روندی رو به رشد داشته است. از جمله این روابط رابطه بین طبقه‌بندی‌های RMR، Q، BQ و JH بوده که به دلایل مختلفی همچون عدم اطلاعات کافی از توده سنگ‌های موجود در منطقه، داشتن محدودیت‌های زمانی و عملی در اجرای پروژه‌ها و نیاز به کنترل روزانه کارهای انجام شده برای اطمینان از صحت نتایج، همواره مورد توجه مهندسان بوده است. در این تحقیق از چهار سیستم طبقه‌بندی RMR، Q، BQ و JH در بخش‌های مختلف تونل‌های مورد مطالعه استفاده شد. از این رو ابتدا با استفاده از مقاله‌های منتشر شده، که در آن‌ها از چهار سیستم مذکور برای ارزیابی ویژگی‌های توده سنگ‌ها استفاده شده، بانک اطلاعاتی تهیه گردید. سپس با استفاده از داده‌های موجود و بهره‌گیری از بانک اطلاعاتی تهیه شده، مقدار هر یک از طبقه‌بندی‌ها به دست آمد. در گام بعدی رابطه همبستگی آن‌ها طی تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم افزار SPSS

و تحلیل همبستگی پیرسون و نمودار پراکنش به صورت توابع خطی و لگاریتمی تعیین شد. با توجه به نتایج حاصل از مقایسه و بررسی روابط و ضرایب همبستگی به دست آمده که در جدول ۱۰ نشان داده شده است، مشخص شد که سیستم طبقه‌بندی JH با سیستم طبقه‌بندی RMR با ضریب همبستگی 0.847، رابطه مناسبی دارد و در این راستا رابطه ۲۰، معادله جدیدی است که در تحقیق حاضر به دست آمده است.

$$RMR = 15.15 + 0.57JH \quad (20)$$

همچنین طی ارزیابی نتایج حاصل از مقایسه پایدارسازی اجراشده با پایدارسازی پیشنهادی هر یک از روش‌ها و تعیین رابطه و ضریب همبستگی هر یک از آن‌ها (جدول ۱۱)، این گونه نتیجه‌گیری شد که روش پایدارسازی پیشنهادی (شانکریت) در طبقه‌بندی JH با ضریب همبستگی (0.782)، رابطه مناسبی با روش پایدارسازی اجراشده دارد و به هدف نزدیک‌تر است. از این رو رابطه (۲۱)، طی این تحقیق به دست آمده است:

$$Y = 10.56 + 1.91X \quad (21)$$

شده و با توجه به اینکه انواع مختلف واحدهای سنگ‌شناسی وجود دارد، اگر تعداد مپینگ‌ها برای سایر واحدهای سنگ‌شناسی و شرایط متفاوت زمین‌شناسی وجود داشته باشد، قطعاً نتایج بهتری حاصل خواهد شد.

باتوجه به وجود پارامترهای مختلف زمین‌شناسی در هر یک از طبقه‌بندی‌ها، با مقایسه هر یک از این پارامترها می‌توان رابطه همبستگی بین آن‌ها را مورد بررسی قرارداد و باتوجه به نتایج به دست آمده ارزیابی بهتری نسبت پایداری توده سنگ و تونل مورد مطالعه داشت و نیز اطلاعات دقیق‌تری از مزایا و معایب هر یک از این پارامترها، در طبقه‌بندی‌های مختلف به دست آورد.

Y نشان دهنده پایداری اجرا شده و X نشان دهنده پایداری پیشنهادی در هر طبقه‌بندی می‌باشد.

با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که طبقه‌بندی JH می‌تواند چندین نوع سنگ را مورد ارزیابی قرار دهد و یک سیستم پشتیبانی مناسب و کارآمد را در مقایسه با سایر روش‌ها پیشنهاد نماید. همین موضوع می‌تواند باعث شود که معادلات جدید برای طبقه‌بندی JH قادر به بهینه‌سازی سیستم های طبقه‌بندی RMR، Q و BQ باشد. از آنجایی که در این تحقیق از مپینگ‌های زمین‌شناسی که بیشتر محدود به سنگ‌های آهکی، سنگ‌های آذرین (اکثراً گرانیتی) و سنگ‌های رسوبی (شیل و ماسه سنگ) بوده است، استفاده

References

- Akagi, W., 2001. A Proposal of New Rock Mass Classification for Tunneling, *Modern Tunneling Science and Technology*, p371-377.
- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock mechanics*, 6(4), 189-236.
- Bieniawski, Z. T., 1973. Engineering classification of jointed rock masses. *Civil Engineer in South Africa*, 15(12).
- Bieniawski, Z. T. 1974. Geomechanics classification of rock masses and its application in tunnelin. In *Proc. 3rd Int. Cong. Rock Mech.* 2, 27-32.
- Frenzo, D. C., Carrera, R. D., Munoz, F. B. and Garcia, J. A., 2010, "Correlation Between Bieniawski's RMR and Barton's Q Index in Low-Quality Soils," *Revista de la Constraction*, 9 (1), 107-119
- Grimstad, E. and Barton, N. 1993. Updating the Q-System for NMT. *Proc. int. symp. on sprayed concrete - modern use of wet mix sprayed concrete for underground support*, Fagernes. 46-66. Oslo: Norwegian Concrete Assn.
- Laderian, A. and Abaspoor, M. A., 2012. "The Correlation Between RMR and Q-systems in Parts of Iran" *Tunnelling and Underground Space Technology*, 27,149-158.
- NGI., 2015. "The Q-system handbook" *Rock Support Chart*, 34-35.
- Palmstrom, A. and Broch, E., 2006. Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system. *Tunnels and Underground Space Technology*, 21(6), 575-593.
- Rahmannejad, R. and Mohammadi, H., 2007. "Comparison of Rock Mass Classification Systems," *Journal of Mining Science*, 43 (4), 404-408.
- Rui-Xin, Y., and Yan-Jun, S., 2015. Correlation of Revised BQ System in China and the International Rock Mass Classification Systems. *Journal of Civil Engineering Research*, 5(2), 33-38.