

توسعه یک رابطه تجربی جدید بین سیستم‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ Q و RMR

محمد رضائی*^۱، شیما لطیفی^۲

پذیرش مقاله: ۹۸/۰۵/۱۳

دریافت مقاله: ۹۷/۱۲/۱۷

چکیده

طبقه‌بندی توده‌سنگ یکی از معیارهای مهم و کاربردی در طراحی حفاریات زیرزمینی و تخمین سیستم‌های نگهداری مربوطه است. دو سیستم Q و RMR از کاربردی‌ترین سیستم‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ هستند که برای تعیین دقیق مقدار عددی آنها، بررسی‌های زمین‌شناسی و مطالعات مکانیک سنگی مختلف لازم می‌باشد. با توجه به اهمیت این دو سیستم طبقه‌بندی، پرهزینه و زمان‌بر بودن جمع‌آوری داده‌های لازم به‌منظور تعیین پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه آنها، توسعه روابط تجربی معتبر بین دو سیستم مذکور ضروری است. در این تحقیق ابتدا بر اساس تحلیل آماری داده‌های اندازه‌گیری شده در تونل آب‌بر سد آزاد مریوان، روابط تجربی مختلفی به‌صورت خطی، چند جمله‌ای، نمایی، لگاریتمی و توانی بین دو سیستم Q و RMR ارائه شده است. سپس بر اساس شاخص ضریب تصمیم‌گیری، سطح معنی‌داری و آزمون فیشر (F) در تحلیل واریانس (ANOVA)، رابطه لگاریتمی به‌عنوان رابطه معتبر پیشنهاد شده است. رابطه پیشنهادی مشابه با رابطه بیناوسکی می‌باشد با این تفاوت که در ضرایب آن اصلاحاتی به‌منظور محلی‌سازی رابطه و به‌دست آوردن نتایج بهتر انجام گرفته است. در نهایت، اعتبارسنجی نتایج حاصله با استفاده از شاخص‌های آماری نشان داد که دقت رابطه پیشنهادی در این تحقیق بالاتر از روابط قبلی بوده و تطابق آن با داده‌های واقعی بیشتر می‌باشد.

کلید واژه‌ها: سد آزاد، طبقه‌بندی توده‌سنگ، تحلیل آماری، رابطه تجربی.

۱. عضو هیات علمی گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج m.rezaei@uok.ac.ir

۲. فارغ‌التحصیل کارشناسی معدن، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

به‌طور معمول، احداث سازه‌های مهندسی یا بر روی سطح زمین و یا در زیر زمین انجام می‌گیرد که در هر دو حالت با سنگ بکر و توده‌سنگ سر و کار خواهد داشت. از جمله فعالیت‌های مهندسی در این زمینه می‌توان به احداث فضاهای بزرگ زیرزمینی، تونل‌سازی، سدسازی و ... اشاره کرد که باعث اغتشاش در وضعیت اولیه بر جای توده‌سنگ شده و در نتیجه یک واکنش متقابل بین پارامترهای توده‌سنگ و سازه ایجاد می‌شود. شناسایی فرآیندهای موجود بین پارامترهای توده‌سنگ و مکانیزم‌های اندرکنش آن با سازه احداث شده نقش مهمی در شناخت رفتار مهندسی توده‌سنگ دارد. بنابراین، برای طراحی ایمن و اقتصادی این سازه‌ها به‌ویژه طراحی روش حفاری و سیستم نگهداری مناسب برای فضاهای زیرزمینی، شناخت مناسب از خصوصیات رفتار تغییر شکل و مقاومت محیط توده‌سنگ موجود تحت تنش‌های وارده، ضروری است. به عبارت دیگر، دستیابی به یک طراحی بهینه در فعالیت‌های مهندسی سنگ مستلزم شناسایی پارامترهای مؤثر موجود در محیط توده‌سنگ و روابط بین آنها است. در این راستا، شناسایی پارامترهای بحرانی، آگاهی از روابط بین آنها و چگونگی تأثیرگذاری هم‌زمان آنها بر یکدیگر در تعیین واکنش کلی سیستم توده‌سنگ ضروری است (Laderian and Abaspoor, 2012).

یکی از راه‌های ارزیابی خصوصیات توده‌سنگ به‌منظور انجام طراحی‌های مهندسی در سنگ، طبقه‌بندی آن از دیدگاه مهندسی است. در سیستم‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ، می‌توان روابط بین پارامترهای مؤثر توده‌سنگ، ساختگاه و سازه را هم‌زمان تجزیه و تحلیل کرده و اندرکنش آنها را مورد بررسی قرار داد. سیستم‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ به‌عنوان اولین ابزارهای لازم برای طراحی روش حفاری، تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری در حفاری‌های زیرزمینی و تونل‌زنی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سیستم‌ها به‌طور گسترده‌ای در مهندسی عمران، معدن، مکانیک سنگ و زمین‌شناسی مهندسی به‌ویژه در زمینه طراحی حفاریات زیرزمینی مورد

استفاده قرار می‌گیرند (Sayeed and Khanna, 2015). در بین سیستم‌های معمول طبقه‌بندی توده‌سنگ، شاخص ژئومکانیکی توده‌سنگ (Rock Mass Rating) یا RMR و طبقه‌بندی شاخص کیفی تونل‌زنی (Rock Tunneling Quality Index) یا Q جزو مهم‌ترین و کاربردی‌ترین سیستم‌های طبقه‌بندی مورد استفاده هستند. طبقه‌بندی RMR توسط بیناوسکی (Bieniawski, 1973) ارائه و بعداً توسط خود بیناوسکی (Bieniawski, 1989) اصلاح گردید. طبقه‌بندی توده‌سنگ Q توسط بارتن و همکاران (Barton et al., 1974) در مؤسسه ژئوتکنیک نروژ (Institute Norwegian Geotechnical) ارائه و در سال‌های بعد هم اصلاحاتی در آن صورت گرفته است (Barton, 2002). با توجه به اهمیت دو طبقه‌بندی RMR و Q و زمان‌بر و پرهزینه بودن تعیین پارامترهای مربوطه، ارزیابی ارتباط بین این دو طبقه‌بندی و ارائه روابط تجربی بین آنها همواره مورد توجه محققین قرار گرفته است (Milne and Potvin, 1992; Milne et al., 1998; Zhang, 2004). این روابط به مهندسان و طراحان کمک می‌کند تا بر اساس یکی از این سیستم‌ها، سیستم دیگر را پیش‌بینی نموده و از آن برای مقاصد مهندسی استفاده کنند. این امر باعث صرفه‌جویی در هزینه و زمان و در نهایت افزایش بازدهی پروژه‌های در دست احداث می‌شود. بر این اساس، تاکنون محققین مختلف روابط گوناگونی را بین این دو طبقه‌بندی ارائه کرده‌اند که بهترین آنها در جدول ۱ نشان داده شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود اکثر این روابط به‌صورت لگاریتمی می‌باشند.

با توجه به اهمیت ارتباط بین سیستم‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ RMR و Q، هدف از این مقاله توسعه یک رابطه تجربی جدید بین این دو سیستم طبقه‌بندی به منظور استفاده در شرایط منطقه‌ای و یا خصوصیات زمین‌شناسی مشابه است. بدین منظور، ابتدا داده‌های مورد نیاز برای محاسبه این دو سیستم طبقه‌بندی در تونل آب‌بر (Tailrace) سد آزاد مریوان اندازه‌گیری و پایگاه داده مناسب تهیه گردید. سپس با استفاده از نرم افزارهای اکسل و اسپراس و انجام تحلیل‌های

عنوان رابطه تجربی جدید بین این دو طبقه‌بندی ارائه شده است. از مزایای رابطه جدید می‌توان به استفاد از آن در پروژه‌های مهندسی حفاری به‌ویژه در موارد داخلی و با شرایط مشابه است که باعث صرفه‌جویی در هزینه و زمان لازم برای تعیین یکی از این دو سیستم طبقه‌بندی می‌شود.

مناسب، روابط مختلف خطی و غیر خطی بین دو سیستم مذکور توسعه داده شد. در نهایت با استفاده از شاخص ضریب تصمیم‌گیری، ضریب معنی‌داری و آزمون فیشر (F) در جدول تحلیل واریانس (Analysis of variance) یا ANOVA، رابطه با بهترین کارایی و قابلیت تخمین بالا به-

جدول ۱. مهم‌ترین روابط ارائه شده بین دو طبقه‌بندی RMR و Q.

No.	Equation/Relation	Reference
1	$RMR=5.9LnQ+43$	(Rutledge and Perston, 1978)
2	$RMR=5.4LnQ+52.2$	(Moreno Tallon, 1980)
3	$RMR=5LnQ+60.8$	(Cameron-Clarke and Budavari, 1981)
4	$RMR=10.5LnQ+41.8$	(Abad et al., 1984)
5	$RMR=9LnQ+44$	(Bieniawski, 1989)
6	$RMR=6.6535LnQ+35.533$	(Castro-Fresno et al., 2010)
7	$RMR=8.15LnQ+44.88$	(Laderian and Abbaspoor, 2012)
8	$RMR=42.87Q^{0.162}$	
9	$RMR=4.5268LnQ+43.635$	(Sayeed and Knhana, 2015)
10	$RMR=5.614LnQ+49.395$	(Soufi et al., 2018)

۲. مطالعه موردی

۲-۱. مشخصات و موقعیت جغرافیایی

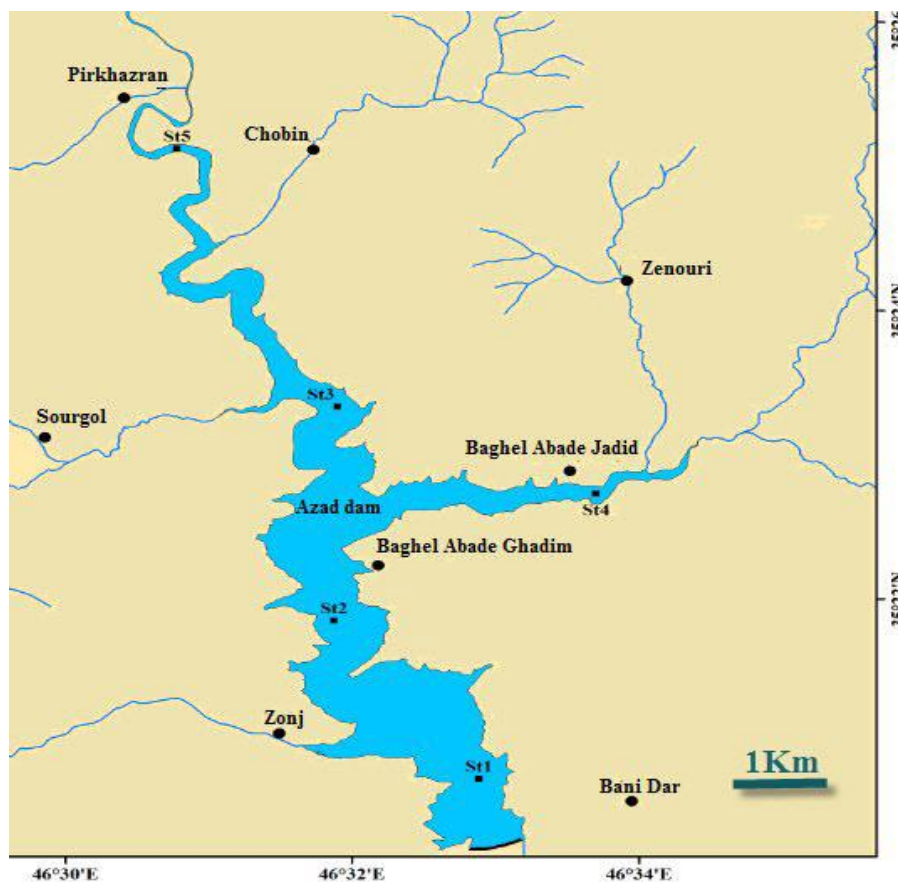
در این تحقیق، از توده‌سنگ ساختگاه سد آزاد مریوان به‌عنوان مطالعه موردی برای تعیین پایگاه داده مورد نیاز استفاده شده است. سد آزاد از نوع سنگریزه‌ای با هسته رسی است که تاج آن در طرح اولیه دارای طول ۶۰۰ متر، عرض ۱۲ متر و ارتفاع ۱۲۷ متر می‌باشد. این سد بر روی رودخانه کوماسی از سرشاخه‌های مهم رودخانه سیروان در مجاورت روستای "بنی‌در" از توابع شهرستان مریوان در استان کردستان قرار گرفته است. منطقه مورد مطالعه در فاصله بین ۱۷°۳۴ تا ۴۵°۳۵ عرض شمالی و ۲۳°۴۶ تا ۴۵°۴۶ طول شرقی قرار گرفته است. دسترسی به محل این سد از طریق جاده اصلی سنندج به مریوان (طی کردن مسافت ۷۵ کیلومتر از سنندج به طرف مریوان) و ۶ کیلومتر جاده اختصاصی روستای "بنی‌در" صورت می‌گیرد. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به سد آزاد نشان داده شده است (شرکت بین‌المللی استراتوس، ۱۳۸۷؛ معینی رودبالی و همکاران، ۱۳۹۰).

۲-۲. مشخصات زمین‌شناسی

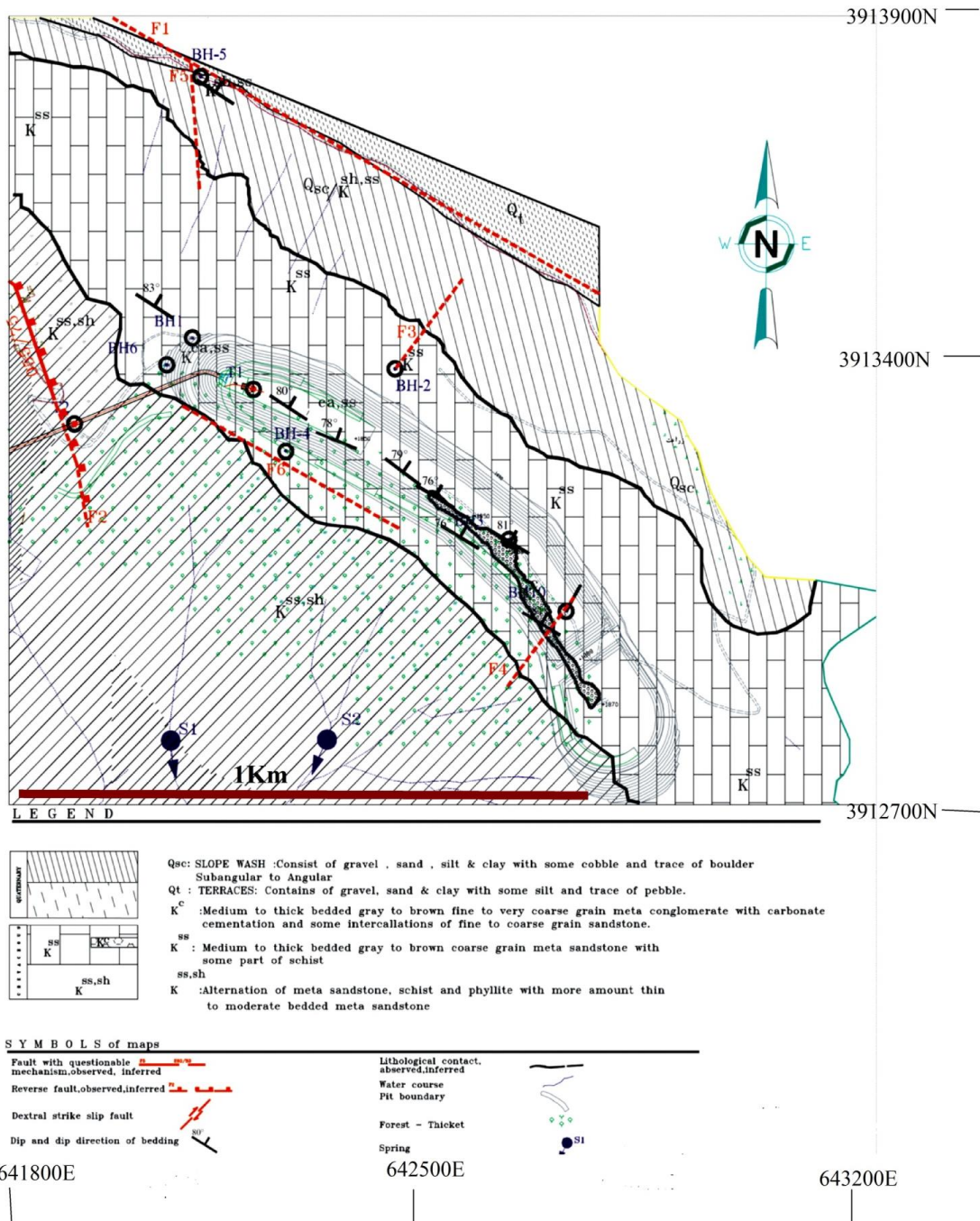
از لحاظ زمین‌شناسی، منطقه مورد مطالعه در محدوده زون سنندج- سیرجان (بخشی از کناره شمال غربی آن) قرار دارد. سنگ‌های ساختگاه محدوده سد آزاد شامل ماسه‌سنگ، شیست و فیلیت می‌باشد که در آن ماسه‌سنگ‌ها عمدتاً به‌صورت برجا و شیست‌ها در سطح خرد شده و دارای شیستوزیته بالا هستند. همچنین، عدسی‌های آهکی به‌صورت برجستگی‌هایی در برخی از ارتفاعات منطقه به چشم می‌خورد. از لحاظ چینه‌شناسی، سنگ‌های کرتاسه فوقانی تا عهد حاضر در منطقه رخنمون دارند. این سنگ‌ها از قدیم به جدید در بر گیرنده چهار نوع سنگ شامل سنگ‌های دگرگونی کرتاسه همراه با شیل‌های رسی و فیلیت، سنگ‌های کرتاسه-پالئوسن همراه با شیل‌های ماسه‌ای و آهکی، سنگ‌های پالئوسن-اوسن شامل شیل و ماسه‌سنگ با عدسی‌های آهکی، سنگ‌های آتشفشانی و نهشته‌های کواترنری شامل واریزه‌های سطحی و پادگانه‌های آبرفتی می‌باشند. از نقطه نظر تکتونیکی، گسل‌های کرگینه،

زمین‌شناسی، گسل‌های موجود در محدوده سد آزاد و محل گمانه‌های حفر شده در شکل ۲ نشان داده شده است.

ساتیله و سروآباد به ترتیب در فاصله ۴/۵، ۳۲ و ۲۳ کیلومتری شرق، شمال شرق و جنوب محدوده سد آزاد مریوان قرار گرفته‌اند (شرکت بین‌المللی استراتوس، ۱۳۸۷؛ معینی رودبالی و همکاران، ۱۳۹۰). با توجه به توضیحات فوق‌الذکر، شرایط



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و راه دسترسی به سد آزاد (شرکت بین‌المللی استراتوس، ۱۳۸۷).



شکل ۲. شرایط زمین شناسی، گسل‌های موجود و گمانه‌های حفر شده در محدوده تونل آب‌بر سد آزاد (Aalianvari et al., 2010).

نفوذپذیری و مشخصات ناپیوستگی‌ها و تأثیر جهت یافتگی درزه‌ها (با توجه به گمانه‌های حفاری شده) به‌عنوان اولویت اول و پارامترهای چگالی، تخلخل و رطوبت به‌عنوان اولویت دوم محاسبه گردید. لازم به ذکر است که آزمایشات فوق‌الذکر بر اساس استانداردهای انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ

۲-۳. مشخصات داده‌های اندازه‌گیری شده برای محاسبه سیستم‌های طبقه‌بندی RMR و Q به‌منظور اندازه‌گیری پارامترهای طراحی تونل آب‌بر سد آزاد مریوان، مقاومت فشاری (Unconfined Compressive Strength)، شاخص کیفیت توده‌سنگ (Rock Quality Designation)،

طبقه‌بندی فوق در جدول ۲ نشان داده شده است. (International Society for Rock Mechanics) انجام گرفته است (ISRM, 2007). مقادیر پایه برای محاسبه دو سیستم

جدول ۲. مقادیر پارامترهای پایه برای محاسبه دو سیستم طبقه‌بندی RMR و Q در ساختگاه سد آزاد مریوان.

Parameter	Sandstone	Schist and Phyllite
Unconfined compressive strength (UCS)	83 MPa	20 MPa
Rock quality designation (RQD)	50-86 %	51-88 %
Spacing of discontinuities	200-600	200-600
	60-200	60-200
Condition of discontinuities	Rough and sometimes smooth, low to moderate weathering, separation lower than 0.5-2.5 mm, none filling to calcite filling, length is 3-10 m	Rough to slightly rough and sometimes scratchy, low to moderate weathering, separation 0.5-2.5 mm, none filling to calcite filling, length varies from 1 m to more than 20 m
	Groundwater conditions	Dump to wet
Orientation of discontinuities	Unfavorable	Unfavorable

در بخش‌های مختلف ساختگاه سد آزاد مریوان اندازه‌گیری گردید. بر این اساس، خصوصیات آماری کل داده‌های مربوط به RMR و Q در جدول ۳ نشان داده شده است.

۳. توسعه‌ی رابطه جدید بین RMR و Q

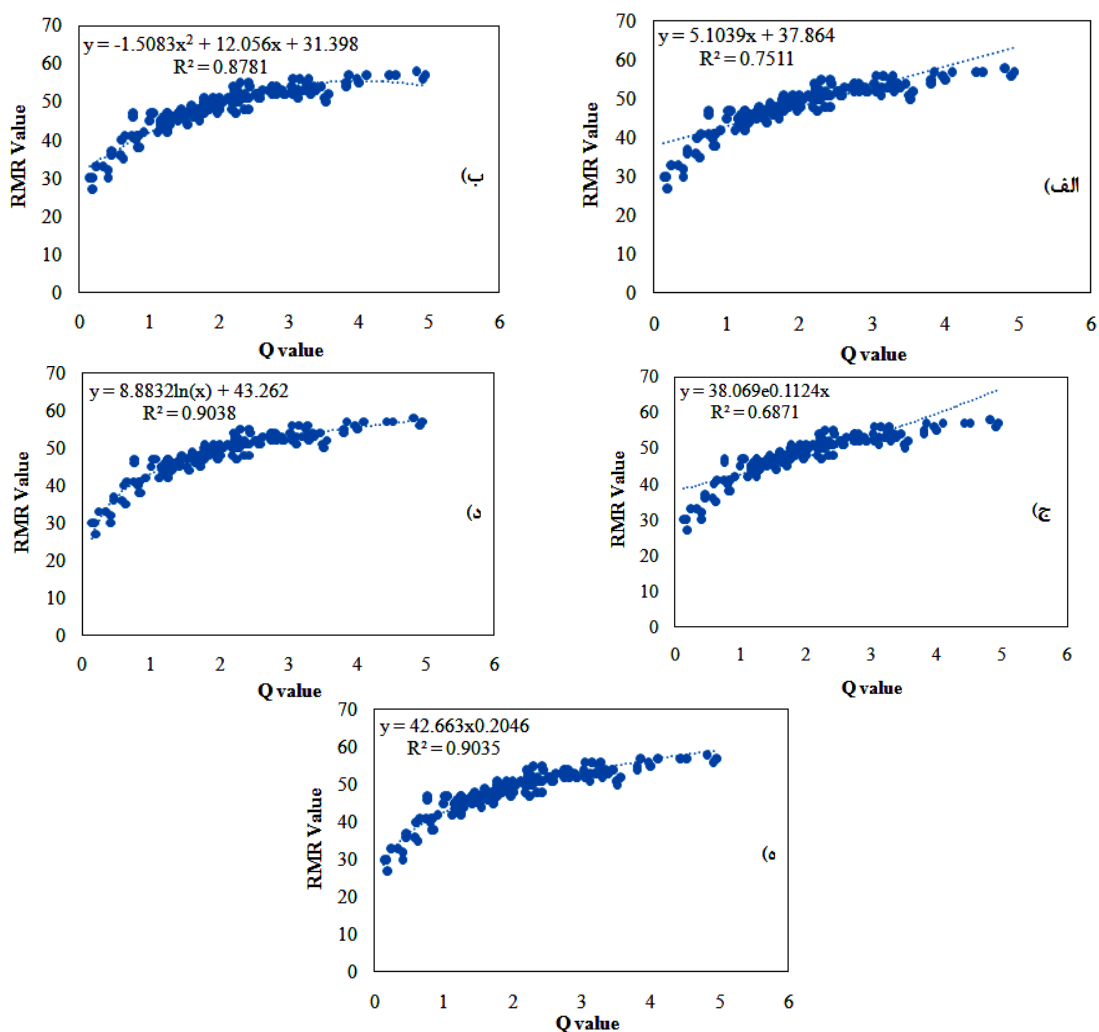
با توجه به پارامترهای محاسبه شده که در بخش قبلی و جدول ۲ اشاره شد، مقادیر دو سیستم طبقه‌بندی RMR و Q

جدول ۳. خصوصیات آماری داده‌های مورد استفاده.

Index	RMR	Q
Mean	48.27429	2.039657
Max	58	4.95
Min	27	0.14
Std dev.	5.768939	0.976816
Variance	33.28066	0.959653

لگاریتمی و توانی در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنین، نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) حاصل از مدل‌های آماری برازش شده برای تعیین بهترین مدل به منظور تعیین رابطه بهینه بین دو سیستم طبقه‌بندی RMR و Q در جدول ۴ نشان داده شده است. بعلاوه، برازش منحنی حاصل از مدل‌های آماری مختلف بر روی داده‌های مشاهده شده (واقعی) برای تعیین رابطه بین دو سیستم طبقه‌بندی فوق در شکل ۴ نشان داده شده است.

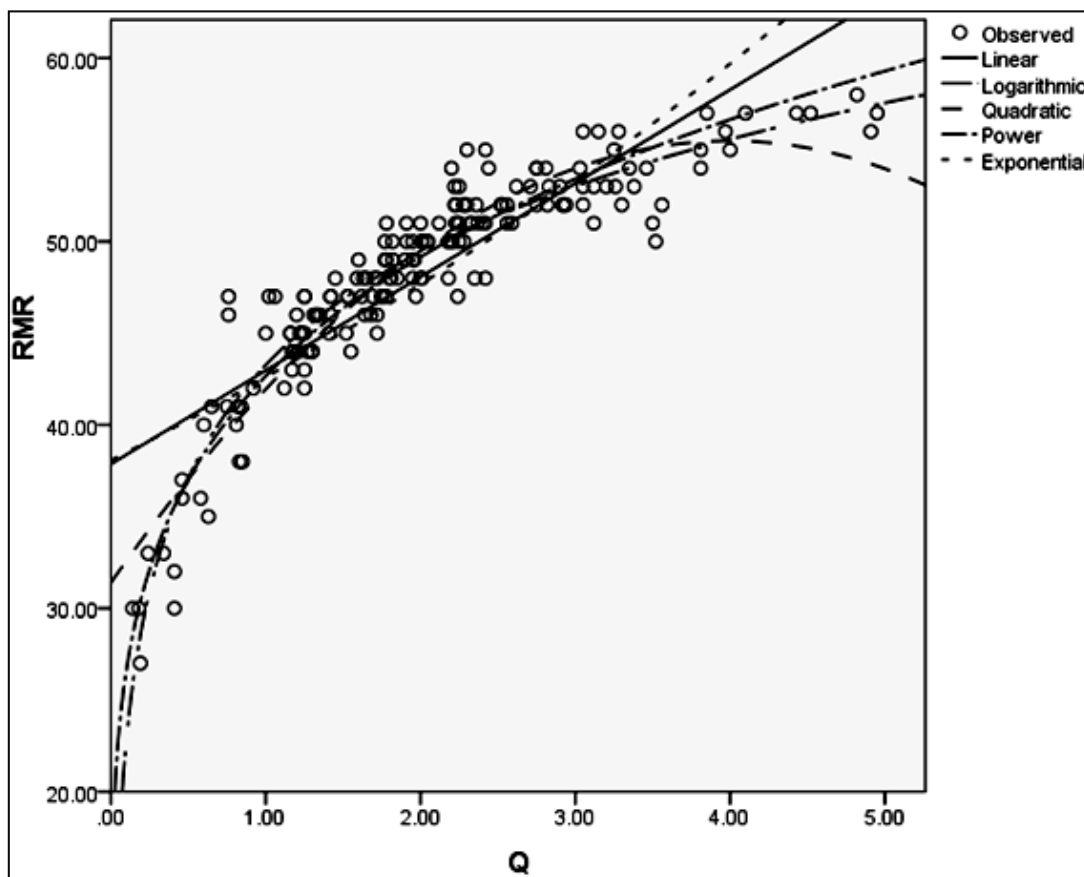
همانطور که قبلاً هم اشاره شد، هدف از تحقیق حاضر ارائه یک رابطه تجربی جدید بین دو سیستم طبقه‌بندی RMR و Q می‌باشد. بنابراین، بر اساس تحلیل‌های آماری صورت گرفته بر روی بانک اطلاعاتی تهیه شده با استفاده از نرم افزارهای SPSS و Excel، روابط تجربی جدید در فرم‌های مختلف بین این دو سیستم طبقه‌بندی توسعه داده شد. روابط ارائه شده شامل توابع خطی، چند جمله‌ای درجه دو، نمایی، لگاریتمی و توانی می‌باشند. ارتباط بین سیستم‌های طبقه‌بندی RMR و Q در حالت‌های مختلف خطی، چند جمله‌ای، نمایی،



شکل ۳. نمودار بین دو سیستم طبقه‌بندی RMR و Q: الف) تابع خطی، ب) تابع چند جمله‌ای درجه دو، ج) تابع نمایی، د) تابع لگاریتمی، ه) تابع توانی.

جدول ۴. نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) حاصل از مدل‌های آماری برازش شده برای تعیین بهترین مدل.

Model Type	Parameter	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F	Sig.
Linear	Regression	4349.778	1	4349.778	522.194	0.000
	Residual	1441.057	173	8.330		
	Total	5790.834	174			
Polynomial	Regression	5084.786	2	2542.339	619.350	0.000
	Residual	706.049	172	4.105		
	Total	5790.834	174			
Exponential	Regression	2.111	1	2.111	379.874	0.000
	Residual	0.961	173	0.006		
	Total	3.073	174			
Logarithmic	Regression	5233.554	1	5233.554	1624.685	0.000
	Residual	557.280	173	3.221		
	Total	5790.834	174			
Power	Regression	2.776	1	2.776	1619.937	0.000
	Residual	0.296	173	0.002		
	Total	3.073	174			



شکل ۴. منحنی حاصل از مدل‌های آماری مختلف برای تعیین رابطه بین سیستم‌های طبقه‌بندی Q و RMR.

دارای بیشترین میزان دقت بوده و به‌عنوان رابطه بهینه در نظر گرفته می‌شود. در واقع ضریب معنی‌داری مدل لگاریتمی قابل قبول بوده و در مقایسه با دیگر مدل‌ها دارای بیشترین مقدار ضریب تصمیم‌گیری ($R^2=0.9038$) و بیشترین مقدار فیشر ($F=1624.685$) می‌باشد. بنابراین، رابطه تجربی پیشنهادی بین دو سیستم طبقه‌بندی توده‌سنگ RMR و Q در تحقیق حاضر به‌صورت زیر می‌باشد:

$$RMR = 8.8832 \ln Q + 43.26 \quad (1)$$

۴. ارزیابی رابطه پیشنهادی

برای ارزیابی رابطه پیشنهادی بین سیستم‌های طبقه‌بندی RMR و Q در این تحقیق و مقایسه آن با روابط قبلی مشابه، از سه شاخص ارزیابی عملکرد مختلف شامل ضریب همبستگی (Correlation Coefficient)، جذر میانگین مربعات خطا (Root Mean Square Error) و میانگین خطای مطلق

برای انتخاب بهترین مدل آماری و رابطه بهینه بین دو سیستم طبقه‌بندی مورد بررسی در این تحقیق، از شاخص آماری ضریب تصمیم‌گیری (Determination Coefficient) یا R^2 و پارامترهای موجود در جدول آنالیز واریانس (ANOVA) استفاده می‌شود. بر این اساس، هر چه ضریب تصمیم‌گیری حاصله بیشتر باشد تابع دارای اطمینان و صحت بیشتری بوده و نتایج پیش‌بینی آن به مقادیر واقعی نزدیک‌تر خواهد بود. همچنین، با توجه به سطح اطمینان در نظر گرفته شده (۹۵٪) و بررسی ضریب معنی‌داری (Sig.) حاصل از مدل‌های مختلف آماری، می‌توان نتیجه گرفت که سطح معنی‌داری تمام مدل‌ها قابل قبول می‌باشد. بنابراین، از مقادیر فیشر (F value) برای انتخاب بهترین مدل برازش داده شده بر داده‌ها استفاده می‌شود. با در نظر گرفتن ضرایب تصمیم‌گیری به‌دست آمده در شکل ۳ و مقادیر پارامتر فیشر (F) و ضرایب معنی‌داری حاصله در جدول ۴، می‌توان نتیجه گرفت که رابطه لگاریتمی

بر اساس ۲۰٪ از داده‌ها (۳۵ سری داده) که در توسعه روابط جدید استفاده نشده است، شاخص‌های ارزیابی عملکرد ضریب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا و میانگین خطای مطلق برای رابطه پیشنهادی در این تحقیق و روابط قبلی مشابه محاسبه گردید که نتایج حاصله در جدول ۵ نشان داده شده است. همچنین، مقایسه میزان انطباق مقادیر RMR حاصل از رابطه جدید و روابط قبلی با مقادیر واقعی آن در شکل ۵ نشان داده شده است. مقادیر ضرایب همبستگی (R) به دست آمده در جدول ۵ برای روابط مختلف نشان می‌دهد که در بین روش‌های مورد مقایسه، رابطه پیشنهادی در این تحقیق دارای بیشترین ضریب همبستگی بوده و در نتیجه مقادیر حاصل از آن انطباق بیشتری با مقادیر واقعی دارد. همچنین با توجه به مقادیر RMSE و MAE به دست آمده، می‌توان گفت که رابطه پیشنهادی در این تحقیق دارای خطای کمتری نسبت به روش‌های مشابه قبلی می‌باشد. بعلاوه، در شکل ۵ هم مشاهده می‌شود که انطباق نتایج حاصل از رابطه پیشنهادی با مقادیر واقعی بیشتر از روابط قبلی می‌باشد. با این حال، نتایج حاصله به نتایج روابط پیشنهادی توسط بیناوسکی، آباد (Abad) و همکاران و لادریان و همکاران نزدیکتر است. بنابراین، با مقایسه ضرایب رابطه پیشنهادی و سه رابطه فوق‌الذکر، می‌توان نتیجه گرفت که در رابطه لگاریتمی بین دو سیستم طبقه‌بندی Q و RMR ضریب بهینه لگاریتم (A) بین ۸ تا ۱۰ و ثابت بهینه رابطه (B) بین ۴۲ تا ۴۵ می‌باشد.

(Mean Absolute Error) استفاده می‌شود. ضریب همبستگی یکی از شاخص‌های آماری مهم برای ارزیابی و اعتبارسنجی مدل‌ها است که هر چه مقدار آن برای یک مدل خاص به ۱ نزدیکتر باشد نشان دهنده دقت بالای آن مدل می‌باشد. از طرف دیگر، هر چه مقدار شاخص میانگین جذر مربعات خطا هم به صفر نزدیکتر باشد معرف دقت بالای مدل و انطباق بیشتر آن با مقادیر واقعی است. علاوه بر این، میانگین خطای مطلق هم برای تعیین قابلیت اعتماد و میزان خطای روش‌ها و مدل‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. هر چه مقدار این شاخص برای یک مدل خاص کمتر و یا به صفر نزدیکتر باشد نشان دهنده دقت و اعتبار بیشتر آن است. برای محاسبه شاخص‌های فوق‌الذکر از روابط زیر استفاده می‌شود (Khoshjavan et al., 2010; Sayadi et al., 2014; Rezaei et al., 2015; Tajeri et al., 2015):

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h}_i)(t_i - \bar{t}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h}_i)^2 \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t}_i)^2}} \quad (2)$$

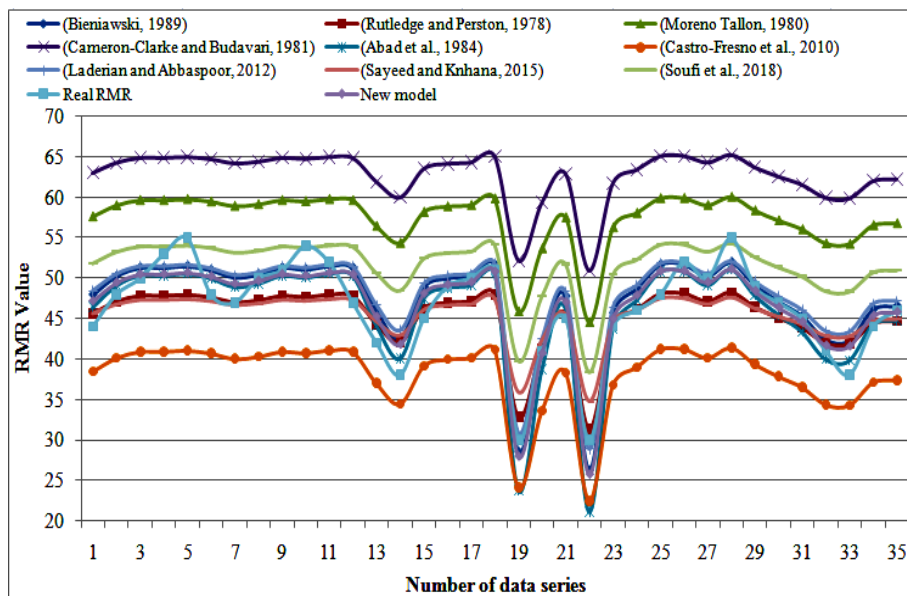
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - t_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i - t_i)}{n} \quad (4)$$

در روابط فوق، h_i و t_i به ترتیب i امین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده، \bar{h}_i و \bar{t}_i به ترتیب i امین مقادیر میانگین اندازه‌گیری شده و میانگین پیش‌بینی شده و n تعداد سری داده است.

جدول ۵. مقایسه نتایج حاصل از رابطه پیشنهادی با نتایج روابط قبلی

Equation/Relation	R	RMSE	MAE
(Rutledge and Perston, 1978)	0.838	3.21	1.94
(Moreno Tallon, 1980)	0.30	10.35	9.47
(Cameron and Budavari, 1981)	0.186	15.63	15.34
(Abad et al., 1984)	0.947	2.11	0.54
(Bieniawski, 1984)	0.940	1.95	0.80
(Castro-Fresno et al., 2010)	0.82	2.76	1.87
(Laderian and Abbaspoor, 2012)	0.92	1.90	0.51
(Sayeed and Knhana, 2015)	0.48	7.23	6.68
(Soufi et al., 2018)	0.63	5.12	3.65
Proposed in the current study	0.95	1.78	0.002



شکل ۵. مقایسه میزان تطابق نتایج حاصل از رابطه تجربی جدید و روابط قبلی با مقادیر واقعی.

۴. نتیجه گیری

طبقه‌بندی‌های RMR و Q جزو مهمترین ابزارهای ارزیابی خصوصیات توده‌سنگ هستند که تعیین مقدار آنها به منظور انجام طراحی‌های مهندسی در توده‌سنگ لازم می‌باشد. بنابراین در این تحقیق، بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده در ساختگاه سد آزاد مریوان، روابط تجربی مختلفی بین دو سیستم طبقه‌بندی توده‌سنگ RMR و Q ارائه شد. برای ارزیابی روابط ارائه شده و مقایسه عملکرد آنها، از شاخص ضریب تصمیم‌گیری و پارامترهای ضریب معنی‌داری و آزمون فیشر در جدول آنالیز واریانس (ANOVA) استفاده گردید. بر اساس شاخص‌های فوق، رابطه لگاریتمی به‌عنوان رابطه بهینه بین دو سیستم طبقه‌بندی مذکور پیشنهاد گردید. سپس با استفاده از شاخص‌های آماری ارزیابی عملکرد شامل ضریب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا و میانگین خطای مطلق، رابطه پیشنهادی با روابط موحود در این زمینه مقایسه گردید. نتایج مقایسه فوق نشان داد که ضریب همبستگی رابطه پیشنهادی در این تحقیق از روابط قبلی بیشتر و خطای حاصل از آن کمتر می‌باشد. همچنین، مشخص گردید که در

رابطه لگاریتمی بین دو سیستم مذکور، ضریب بهینه لگاریتم (A) بین ۸ تا ۱۰ و ثابت بهینه رابطه (B) بین ۴۲ تا ۴۵ است. با توجه به نتایج فوق، می‌توان نتیجه گرفت که رابطه تجربی پیشنهادی در این تحقیق دارای دقت کافی بوده و می‌توان از آن به‌عنوان روشی قابل اعتماد در تحلیلی‌های مهندسی سنگ و تخمین پارامترهای طراحی تونل بهره گرفت. از مزایای این تحقیق می‌توان به توسعه یک رابطه تجربی جدید با دقت بالا اشاره کرد که به مهندسان و طراحان کمک می‌نماید به‌طوری که با استفاده از یکی از این دو طبقه‌بندی، می‌توان دیگری را با دقت و قابلیت اطمینان بالا تخمین زد که باعث صرفه‌جویی در هزینه و زمان خواهد شد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان در اینجا لازم می‌دانند سپاس و قدردانی خود را از شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، شرکت بین‌المللی پیمانکاری استراتوس و پرسنل سد آزاد مریوان به خاطر کمک در تهیه و جمع‌آوری داده‌ها اعلام نمایند.

منابع

- شرکت بین‌المللی استراتوس، ۱۳۸۷. گزارش بررسی‌های ژئوتکنیکی و تحلیل پایداری دیواره معدن مصالح سنگی (منبع قرضه) سد آزاد. تهران. معینی رودبالی، ه.، کتیبه، ه.، گلابتونچی، ا.، ۱۳۹۰. تحلیل نشست مخزن ذخیره آب نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد و گزینش روش بهینه آب‌بندی. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۴، شماره ۲، صفحات ۴۱-۳۵.
- Aalianvari, A., Katibeh, H., Sharifzadeh, M., 2010. A new approach for computing permeability of fault zones case study: the upper reservoir of Azad pumped-storage power station in Iran. Arch. Min. Sci. 55(3): 605–621.
- Abad, J., Caleda, B., Chacon, E., Gutierrez, V., Hidlgo, E., 1984. Application of geomechanical classification to predict the convergence of coal mine galleries and to design their supports. In: 5th Int. Congress on Rock Mech, Melbourne, Australia, p. 15–19.
- Barton, N., 2002. Some new Q-value correlations to assist site characteristics and tunnel design. Int. J Rock Mech. Min. Sci. 39: 185–216.
- Barton, N., Lien, R., Lunde, J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mech. 6(4): 189–236.
- Bieniawski, Z.T., 1973. Engineering Classification of Jointed Rock Masses. South African Institution of Civil Engineers, Kelvin House, 75 Marshall Street Johannesburg, South Africa, p. 335-344.
- Bieniawski, Z.T., 1989. Engineering Rock Mass Classifications. John Wiley & Sons, New York.
- Cameron-Clarke, I.S., Budavari, S., 1981. Correlation of rock mass classification parameters obtained from bore core and insitu observations. Eng Geol. 17: 19–53.
- Castro-Fresno, D., Diego-Carrera, R., Ballester-Munoz, F., Alvez-Garcia, J., 2010. Correlation between Bieniawski's RMR and Barton's Q Index in Low-Quality Soils. Revista de la Construcción, 9(1): 107-119.
- ISRM., 2007. The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006. Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics, R. Ulusay and J.A. Hudson (Eds.), Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey.
- Khoshjavan, S., Mazlumi, M., Rezai, B., Rezai, M. 2010. Estimation of hardgrove grindability index (HGI) based on the coal chemical properties using artificial neural networks. Orient j. chem. 26(4): 1271-1280.
- Laderian, A., Abaspoor, M. A., 2012. The Correlation Between RMR and Q-systems in Parts of Iran. Tunn Undergr Sp Tech. 27: 149-158.
- Milne, D., Hadjigeorgiou, J., Pakalnis, R., 1989. Rock mass characterization for underground hard rock mines. Tunn Undergr Sp Tech. 13(40): 383–391.
- Milne, D., Potvin, Y., 1992. Measurement of Rock Mass Properties for Mine Design. ISRM Symposium, Eurock '92, Thomas Telford, London, p. 245–250.
- Moreno Tallon, E., 1980. Application de Las Clasificaciones Geomechanicas a Los Tuneles de Parjares, II Cursode Sostenimientos Activosen galeriasy Tunnels. Foundation Gomez-Parto, Madrid (Singh and Goel, 1999).
- Rezaei, M., Asadizadeh, M., Majdi, A., Hossaini, M. F., 2015. Prediction of representative deformation modulus of longwall panel roof rock strata using Mamdani fuzzy system. Int. J. Min. Sci. Technol. 25(1): 23-30.
- Rutledge, J. C., Perston, R. L., 1978. Experience with engineering classifications of rock. In: Proc. Int. Tunnelling Sym, Tokyo, p. A3.1–A3.7.
- Sayadi, A.R, Tavassoli, S.M.M., Monjezi, M., Rezaei, M., 2014. Application of neural networks to predict net present value in mining projects. Arab. J. Geosci. 7(3): 1067-1072.
- Sayeed, I., Khanna, R., 2015. Empirical correlation between RMR and Q systems of rock mass classification derived from Lesser Himalayan and Central crystalline rocks. International Conference on Engineering Geology in New Millennium, New Delhi, India.
- Singh, B., Goel, R.K., 1999. Rock Mass Classification, A Practical Approach for Civil Engineering. first ed. Elsevier Science, ISBN 0080430139.
- Soufi, A., Bahi, L., Ouadif, L., Kissai, J.E., 2018. Correlation between Rock mass rating, Q-system and Rock mass index based on field data. MATEC Web of Conferences, 149, 02030: 1-7.

- Tajeri, S., Sadrossadat, E., BolouriBazaz, J., 2015. Indirect estimation of the ultimate bearing capacity of shallow foundations resting on rock masses. *Int. J Rock Mech. Min. Sci.* 80: 107–117.
- Zhang, L., 2004. *Drilled Shafts in Rock Analysis and Design*. A. A. Balkema Pub., Taylor & Francis Group Plc.