بررسی جایگاه سنگ‌های مارنی در سیستم‌های طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ مطالعه موردی: ساختگاه سد دوستی

حامد رضایی*؛ دانشگاه گلستان
ماشاله خامه‌چیان؛ دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ: دریافت ۹۲/۷/۲٤ **پذیرش** ۹٤/۵/۳۱

چکیده

با انتخاب ۲۲۲ متر از مغزه‌های حفاری در محور سرریز ساختگاه سد دوستی از سنگ‌های مارنی سازند آب تلخ و انجام طبقه‌بندی تودهٔ سنگ در سیستم‌های RQD، RSR، RMR و Q، نمونه‌های بررسی شده در رده‌های مختلف طبقه‌بندی‌های مذکور قرار گرفت و فروانی هریک به‌دست آمد. نتیجه تحقیق نشان می‌دهد که طبقه‌بندی RMR مناسب‌ترین روش ارزیابی تودهٔ سنگ مارن بررسی شده است و بیش‌ترین هم‌بستگی را با شاخص RQD نشان می‌دهد. اعتبارسنجی روابط مختلف بین Q-RMR با استفاده از نسبت خطا (ER) نشان می‌دهد که رابطهٔ کامرون و همکاران (۱۹۸۱) و مورنو (۱۹۸۲) دارای کم‌ترین نسبت خطا است و در سنگ‌های مارنی بررسی شده دارای بیش‌ترین اعتبار است. رابطهٔ بنیاوسکی (۱۹۸۹) تعیین‌کننده حدپایینی منحنی Q-RMR و رابطهٔ کامرون و همکاران (۱۹۸۱) حد بالایی این رابطه در سنگ‌های مارنی است.

واژه‌های کلیدی: طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ، سنگ‌های مارنی، زمین‌شناسی مهندسی، سد دوستی، سازند آب تلخ

* **نویسنده مسئول** rezaiy.hamed@gmail.com

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.3.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3427]

مقدمه

امروزه طبقه‌بندی توده‌سنگ از گام‌های اساسی در طراحی تجربی سازه‌های مهندسی وابسته به محیط سنگ است. محققان تلاش‌های گسترده‌ای برای ارائه روش طبقه‌بندی جامع و آسان از فهم محیط زمین انجام دادند ولی برحسب کاربرد، روش‌های متعددی وجود دارد که در هر پروژه‌ای نیاز به اعمال ضریب و اصلاح است [۱]. از جمله این روش‌ها می‌توان به شاخص کیفیت سنگ (RQD)، امتیازدهی ساختاری سنگ (RSR)، امتیازدهی ژئومکانیکی سنگ (RMR) و طبقه‌بندی کیفیت توده سنگ (Q) اشاره کرد [۲]. سیستم‌های طبقه‌بندی، زمین‌شناسان مهندسی را قادر می‌سازد تا ویژگی‌ها و رفتار محیط زمین را به‌صورت عددی به طراحان معرفی کنند. نتایج آزمایش‌های روی سنگ بکر به تنهایی نمی‌تواند ویژگی توده‌سنگ را به خوبی بیان‌کند، بنابراین یکی از روش‌ها طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ است. در طراحی و نگه‌داری تونل [۲]، پایدارسازی و پهنه‌بندی دامنه‌های سنگی مشرف بر جاده‌ها [۳]، مخازن و پی سدها [٤]، ساختمان‌ها و دامنه معادن روباز، در تحلیل پایداری ترانشه گودبرداری‌ها، معیارهای شکست سنگ [٥] استفاده از سیستم‌های طبقه‌بندی توده سنگ معمول است. از مقادیر سیستم‌های طبقه‌بندی با ارائه روابط تجربی به‌طور گسترده برای محاسبهٔ میزان نفوذ ماشین حفاری [٦] و تعیین ویژگی‌های توده سنگ مثل مقاومت و مدول‌های ارتجاعی و برشی [۷] استفاده می‌شود. با این حال، استفاده از این سیستم‌ها هنوز محدودیت‌های فراوانی دارد، به‌طوری‌که در استفاده از این سیستم‌ها در زون‌های گسلی و مناطق کاملاً برش خورده کارایی آن‌ها دچار ابهام می‌شود [۸]. در سنگ‌های لایه‌ای که از جنس‌های مختلف با ویژگی‌های ژئومکانیکی متفاوت تشکیل می‌شوند، میانگین‌گیری از مقادیر ویژگی‌ها بر اطمینان بخشی از روش تحلیل اثر می‌گذارد [۹].

سنگ‌های مارنی از جمله سنگ‌های سست و ضعیف در مهندسی به‌شمار می‌روند و رفتار دوگانه‌ای از خود بروز می‌دهد و این رفتار تابع میزان رس و آهک است. هرچه درصد آهک افزایش یابد، خواص مهندسی آن بهبود می‌یابد و اما هرچه درصد رس افزایش یابد، رفتار سنگ مارن به‌سمت رفتار خاک پیش می‌رود [۱۰]. به همین دلیل مارن‌ها برخی از ویژگی‌های

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.3.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3427]

خاک را دارند و آزمایش‌های مکانیک خاک نیز روی آن انجام می‌شود. سنگ‌های مارنی به شدت متأثر از شرایط محیط خود هستند؛ بنابراین در ارزیابی آن‌ها باید این شرایط را لحاظ کرد. برای مثال وقتی در معرض رطوبت در هوای آزاد قرار می‌گیرند، شکفته شده و ساختار اولیه آن‌ها متلاشی می‌شوند؛ در این وضعیت دیگر نمی‌توان براساس ویژگی‌های اولیه سنگ که قبل از شکفتگی داشته، درباره خواص مهندسی آن قضاوت کرد.

بررسی‌های انجام شده، نشان می‌دهد که پارامترهای ژئومکانیکی مارن‌ها بسیار متنوع و دامنهٔ تغییرات آن نسبت به سنگ‌های دیگر بیش‌تر است. برای نمونه، عدد RMR در مارن‌ها کم‌تر از ۵۰٪ سنگ‌های آهکی است و مقدار Q تا ۱۶ برابر کم‌تر از یک سنگ آهک است [۱۱]. بنابراین، در تحلیل‌ها و طراحی‌ها استفاده از نتایج رده‌بندی این سنگ‌ها با نبود اطمینان مواجه می‌شود.

در بسیاری از طراحی‌های تجربی، پارامترهای مختلف از طریق سیستم‌های طبقه‌بندی توده سنگ برآورد می‌شود؛ برای تعیین مدول تغییرشکل (E_m) سنگ از RMR به فراوانی استفاده می‌شود [۱۲]، [۱۳]، [۱٤]. با این‌حال، اعتبارسنجی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که روابط تجربی جهانی برای سازندهای ایران قابلیت اعتماد کمی دارد [۱۵]، از این رو، باید پذیرفت که هر رابطهٔ تجربی مختص ناحیه و نوع سنگ بررسی شده است.

شاخص RQD به‌دلیل دست‌یابی آسان و ارزان از پرکاربردترین پارامتر ارزیابی ویژگی‌های ژئومکانیکی سنگ‌ها به‌شمار می‌رود. از آن‌جا که این شاخص تابع تعداد و فاصله بین شکستگی‌ها است، در سنگ‌های نرم و سست همانند مارن‌ها به‌تنهایی نمی‌تواند معرف ویژگی‌های ژئومکانیکی سنگ باشد [۱۰]، [۱٦].

ویژگی‌های سطوح ناپیوستگی نظیر زبری، بازشدگی، پرشدگی، فاصله‌داری، مقاومت سطح درزه‌ها در سیستم‌های طبقه‌بندی به‌کار می‌رود. این ویژگی‌ها در سنگ‌های آرژیلیتی و به‌خصوص مارن‌ها، اثر متفاوتی نسبت به سنگ‌های شکننده و ترد دارد، برای نمونه مقاومت برشی سطح درزه‌های سنگ‌های سخت با افزودن لایهٔ نازکی از ماده پرکننده رسی افت زیادی خواهد کرد [۱۷]، [۱۸] و یا زبری سطح درزه‌ها در سنگ‌های سخت اثر مهمی بر کیفیت سنگ

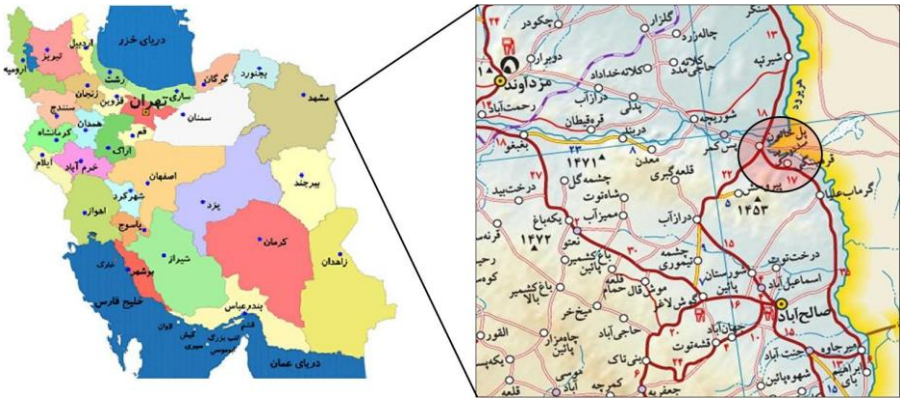
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.3.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3427]

دارد، در صورتی‌که در سنگ‌های مارنی این ویژگی‌ها اثر خیلی کم‌تری بر کیفیت سنگ دارند. به‌عبارت دیگر، مقاومت برشی مارن‌ها بیش‌تر تابع مقاومت چسبندگی است.

هدف از این تحقیق دست‌یابی به روابط تجربی بین سیستم‌های طبقه‌بندی سنگ مارن در ساختگاه سد دوستی و اعتبارسنجی آن بر پایه تحلیل های آماری است.

معرفی محدودهٔ بررسی شده

سنگ‌های مارنی بررسی شده مربوط به سازند آب تلخ از مجموعه حوضهٔ رسوبی کپه داغ است. این سازند ساختگاه سد دوستی واقع بر رودخانه مرزی سرخس (شمال شرق ایران) را تشکیل داده است. سد دوستی دارای مختصات جغرافیایی ″۵۰ ′۰۹ °۶۱ طول شرقی و ″۳۰ ′۵۶ °۳۵ عرض شمالی است. این سد در ۱۸۰ کیلومتری شرق مشهد و در حدود ۷۵ کیلومتری جنوب سرخس و در حدود ٤ کیلومتری بالادست پل‌خاتون قرار دارد و روی رودخانه مرزی هریررود احداث شد. نزدیک‌ترین آبادی به این سد روستای قره‌سنگی است که در ۵۰۰ متری شمال آن (پایین دست) قرار دارد (شکل ۱). سد دوستی از نوع خاکی با هسته سیلتی قائم است. عرض هسته ۳٦ متر و ارتفاع آن از بستر رودخانه ۷۸ متر و تراز نرمال آب ۷٤ متر است. طول تاج سد ٦۵۵ متر و عرض آن ۱۵ متر است. حجم عملیات خاکی حدود ٦ میلیون متر مکعب و حجم مخزن ۱۲۵۰ میلیون مترمکعب است [۱۰].

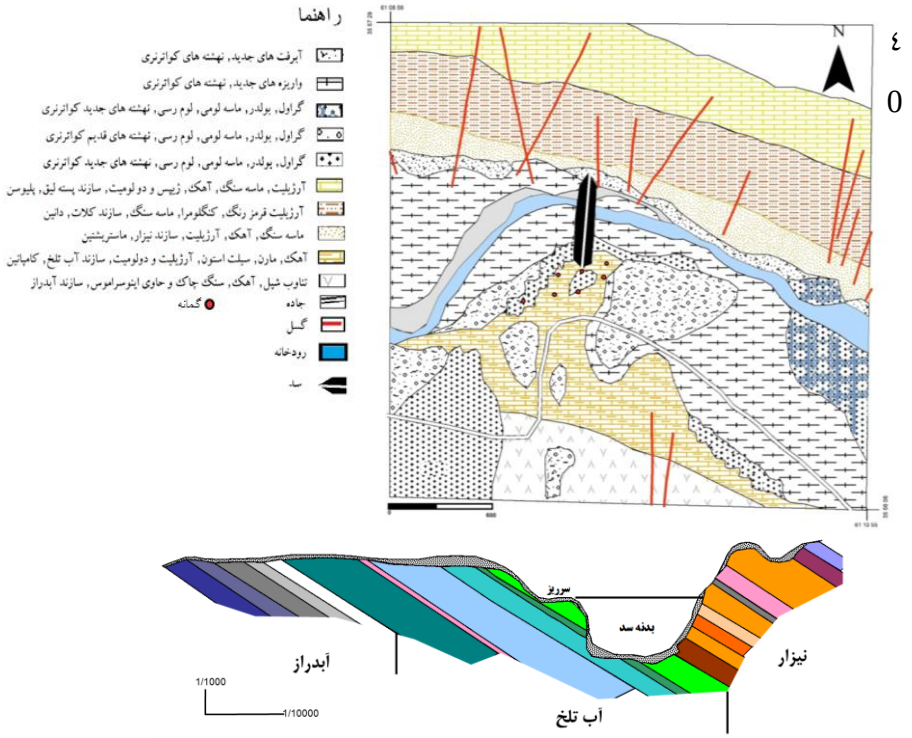


شکل ۱. موقعیت ساختگاه سد دوستی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.3.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3427]

زمین‌شناسی محل سد

محور سد روی یال شرقی یک تاقدیس بزرگ از مجموعه سازندهای حوزهٔ کپه داغ قرار دارد و رودخانه هریرود در این محل دارای امتداد شرقی- غربی است (جهت جریان به سمت غرب). مقطع دره در محل احداث سد به‌صورت V شکل است و این رودخانه بستر خود را در قسمت فوقانی سازند آب تلخ و قسمت تحتانی سازند نیزار حفر کرده است و سنگ‌های مارن، شیل و آهک‌های مارنی در دیواره چپ سد مربوط به سازندهای آبدراز و آب تلخ است و سنگ‌های سخت آهکی و ماسه‌سنگی در جناح راست سد به سازند نیزار تعلق دارد (شکل۲). روی آن‌ها واحدهای ماسه‌سنگ و آهک و سیلتستون سازند کلات قرار گرفته است. رسوبات قرمز رنگ سازند پسته‌لیق در جناح راست بر سازند کلات نهشته شده‌اند. مرتفع‌ترین بخش زمین‌شناسی که در جناح راست مشاهده می‌گردد مجموعه آهکی، ماسه سنگ سازند چهل‌کمان است [۱۰].



شکل ۲. نقشه زمین شناسی منطقه مطالعاتی و مقطع آن در امتداد طول سد دوستی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.3.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3427]

روش تحقیق

برای طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ در ساختگاه سد دوستی، داده‌های ۲۲۲ متر مغزه‌های استحصالی از ۷ گمانه حفاری‌شده در پی سرریز سد گردآوری شد. از این میان به متراژ ۱۳۱ متر از مغزه‌های تازه و بدون هوازدگی مورد ارزیابی و رده بندی قرار گرفت (جدول۱). جنس آن‌ها از انواع سنگ‌های مارنی سازند آب تلخ شامل مارن- رس، مارن رسی، مارن و مارن آهکی است.

جدول۱. مشخصات گمانه‌های بررسی شده در طبقه‌بندی توده‌سنگ

نام گمانه	S_2	S_5	S_7	S_{10}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	جمع
عمق حفاری به متر	۵۰	۲۲	۲۰	٤۵	۲۵	٤۵	۱۵	۲۲۲
متراژ مورد ارزیابی	۹/۳ تا ۵۰	۱۹ تا ۲۱	۸/۵ تا ۲۰	۱۵/٤ تا ٤۳	۷/۳ تا ۲۵	۲٤ تا ٤۵	٤ تا ۱۵	۱۳۱/۵
تعداد طبقه‌بندی	۱٤	۲	۷	۱٤	۱۱	۷	۵	٦۰

با اندازه‌گیری ویژگی‌های سطوح ناپیوستگی مورد نظر در سیستم‌های طبقه‌بندی، فراوانی هر رده در سیستم‌های RQD، RSR، RMR و Q تعیین شد (جدول های ۲، ۳، ٤ و۵).

جدول ۲.طبقه بندی ساختاری سنگ (RSR) و فراوانی نمونه‌های بررسی شده

بارسنگ lb/ft^2	٦/٤	٤/٤	۳/۱	۲	۱/۲	۰/۵۵		
RSR	۱۰ تا ۲۰	۲۰ تا ۳۰	۳۰ تا ٤۰	٤۰ تا ۵۰	۵۰ تا ٦۰	٦۰ تا ۷۰	> ۷۰	
تعداد	۰	٤	۲۱	۵	۱٤	۸	۸	
فراوانی	۰	٦/۷	۳۵	۸/۳	۲۳/۳	۱۳/۳	۱۳/۳	

جدول ۳. طبقه‌بندی ژئومکانیکی (RMR) و فراوانی نمونه‌های بررسی شده

کیفیت	خیلی ضعیف	ضعیف	نسبتاً خوب	خوب	خیلی خوب
RMR	<۲۰	۲۱ تا ٤۰	٤۱ تا ٦۰	٦۱ تا ۸۰	۸۱ تا ۱۰۰
تعداد	۰	۱۸	۳۵	۷	۰
فراوانی	۰	۳۰	۵۸/۳	۱۱/۷	۰

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.3.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3427]

جدول ٤. طبقه‌بندی کیفیت توده‌سنگ (Q) و فراوانی نمونه‌های بررسی شده

کیفیت	بی‌نهایت ضعیف	فوق‌العاده ضعیف	خیلی ضعیف	ضعیف	نسبتاً خوب	خوب	خیلی خوب	فوق‌العاده خوب	بی‌نهایت خوب
Q	۰/۰۱ تا ۰/۰۰۱	۰/۰۱ تا ۰/۱	۱/ ۰تا ۱	۱ تا ٤	٤ تا ۱۰	۱۰تا٤۰	٤۰ تا ۱۰۰	۱۰۰ تا ٤۰۰	٤۰۰ تا۱۰۰۰
تعداد	۰	۱۸	٤۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰
فراوانی	۰	۳۰	۷۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۵. طبقه‌بندی کیفیت سنگ (RQD) و فراوانی نمونه‌های بررسی شده

کیفیت	بسیار ضعیف	ضعیف	متوسط	خوب	خیلی خوب
RQD	<۲۵	۲۵ تا ۵۰	۵۰ تا ۷۵	۷۵ تا ۹۰	۹۰ تا ۱۰۰
تعداد	۰	۸	۲۲	۱۰	۲۰
فراوانی	۰	۱۳/۳	۳٦/۷	۱٦/۷	۳۳/۳

پارامترهای آماری شامل شاخص‌های گرایش مرکزی (میانگین، میانه و نما)، شاخص‌های پراکندگی (انحراف معیار، کج شدگی، کشیدگی و دامنه) و ضریب تغییرات در نرم افزار SPSS محاسبه شد (جدول ٦) و هیستوگرام و منحنی های فراوانی هر سیستم طبقه‌بندی ترسیم شد (شکل ۳).

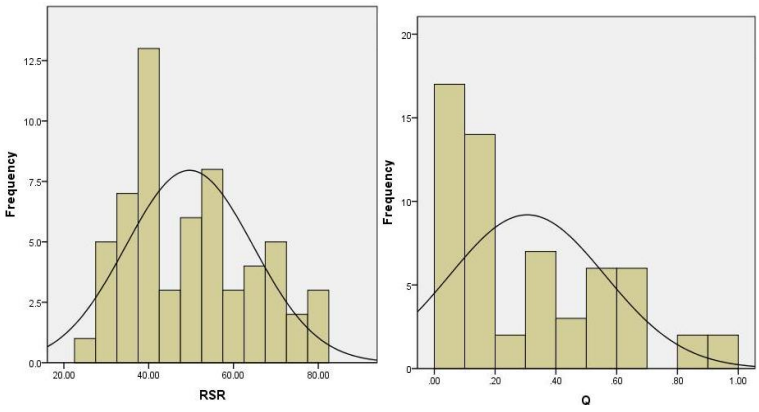
سه شاخص مرکزی میانه، میانگین و نما هرچه بهم نزدیک‌تر باشند، نشان‌دهندهٔ همگنی بیش‌تر و تغییرات کم‌تر در سیستم‌های طبقه‌بندی دارد و منحنی توزیع فراوانی را به‌سمت منحنی نرمال نزدیک می‌کند. شاخص انحراف معیار، میزان انحراف هر داده از میانگین را نشان می‌دهد [۱۹]. هرقدر انحراف بیش‌تر باشد، داده‌ها دارای پراکندگی بیش‌تری هستند. ضریب تغییرات از نسبت انحراف معیار به میانگین به‌دست می‌آید. انحراف معیار به نوع پارامتر وابسته است ولی ضریب تغییرات مستقل از مقدار پارامتر است. به‌عبارت دیگر ضریب تغیرات، انحراف معیار نرمال شده به میانگین است [۱۹]. از این رو، شاخص مناسبی برای ارزیابی محسوب می‌شود. کج‌شدگی، درجه انحراف دنباله‌های منحنی را نشان می‌دهد. در واقع کج شدگی معیاری از وجود یا تقارن نداشتن در توزیع فراوانی است. .کج‌شدگی مثبت یعنی منحنی توزیع به‌سمت مقادیر بزرگ‌تر کج شده است و کج‌شدگی منفی، تمایل منحنی توزیع را

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.3.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3427]

به‌سمت مقادیر کوچک‌تر نشان می‌دهد. شاخص کشیدگی، میزان کوتاهی و یا بلندی توزیع را نشان می‌دهد. هرچه بزرگ‌تر باشد، منحنی توزیع کشیده‌تر می‌شود. تفاضل بزرگ‌ترین داده (حداکثر) و کوچک‌ترین (حداقل) داده در یک مجموعه از داده‌ها، دامنه نامیده می‌شود. دامنه فقط به تغییرات مقادیر ابتدا و انتهای جامعه آماری وابسته است و به تغییراتی که در درون جامعه روی می‌دهد، توجه ندارد [۱۹].

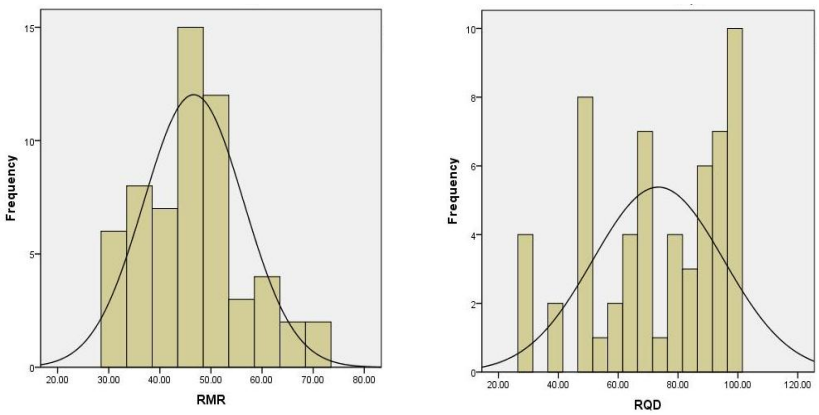
جدول ٦. پارامترهای آماری سیستم‌های طبقه‌بندی انجام شده روی سنگ‌های مارنی بررسی شده

پارامتر آماری	RSR	RMR	Q	RQD
میانه	٤۹/٦	٤٦/٦	۰/۳۰٦	۷۳/٤
میانگین	٤۹	٤٦	۰/۱۸۸	۷۷
نما (مد)	۳۹	٤٤	۰/٦۳	۱۰۰
انحراف معیار	۱۵/۰۳	۹/۷۸	۰/۲۵٦	۲۱/۸٦
ضریب تغییرات	۳۰/٦۷	۲۱/۲	۱۳٦/۱	۲۸/٤
کج شدگی	۰/۳۵۵	۰/۵۳	۰/۸۲۱	−۰/٤٦۷
کشیدگی	−۱/۰٤۱	−۰/۰۹	−۰/۳۵٤	−۰/۹۱۷
حداقل	۲۵	۳۱	۰/۰۲	۲۹
حداکثر	۷۸	۷۱	۰/۹٤	۱۰۰



شکل ۳. هیستوگرام و منحنی‌های فراوانی سیستم‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ مارنی بررسی شده

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.3.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3427]



ادامه شکل ۳. هیستوگرام و منحنی‌های فراوانی سیستم‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ مارنی بررسی شده

یافته‌های تحقیق

سنگ‌های مارنی بررسی شده در ٦۰ رده طبقه‌بندی از چهار سیستم RSR، RMR، Q و RQD ارزیابی شدند و برپایه شاخص‌های آماری تجزیه و تحلیل شده تا بهترین سیستم طبقه‌بندی معرفی شود.

بیش‌ترین فراوانی در سیستم RSR در رده ۳۰-٤۰ قرار دارد. شاخص‌های مرکزی آن‌ها با هم برابر نیستند و ضریب تغییرات آن ۳۰/٦۷ درصد است. دامنهٔ مقادیر بین ۲۵ تا ۷۸ درصد است و نشان‌دهندهٔ آن است که دامنهٔ وسیعی از مقادیر را در بر می‌گیرد. منحنی توزیع فراوانی آن سه نمایی است و سنگ‌های مارنی بررسی شده را در سه طبقه معرفی می‌کند.

در سیستم RMR بیش‌ترین فراوانی در محدوده ٤۱-٦۰ است و شاخص‌های مرکزی بیش‌ترین نزدیکی را با هم دارند. ضریب تغییرات آن دارای کم‌ترین مقدار است و منحنی توزیع فراوانی آن تک‌نمایی است و سنگ‌های مارنی بررسی شده را عمدتاً در ردهٔ نسبتاً خوب محدود می‌کند.

در سیستم Q بیش‌ترین فراوانی در محدوده ۰/۱ تا ۱ قرار دارد و ردهٔ خیلی ضعیف را معرفی می‌کند. شاخص‌های مرکزی آن با هم برابر نیستند و ضریب تغییرات آن بسیار زیاد است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.3.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3427]

شاخص RQD با دامنهٔ تغییرات ۷۱ کیفیت سنگ را بین ۲۹ تا ۱۰۰درصد نشان می‌دهد. بیش‌ترین فراوانی مربوط به ردهٔ متوسط بین ۵۰ تا ۷۵ درصد است. شاخص‌های مرکزی با هم متفاوت است و منحنی توزیع فراوانی چندنمایی است و نشان‌دهندهٔ تنوع در مقادیر RQD در سنگ‌های بررسی شده است.

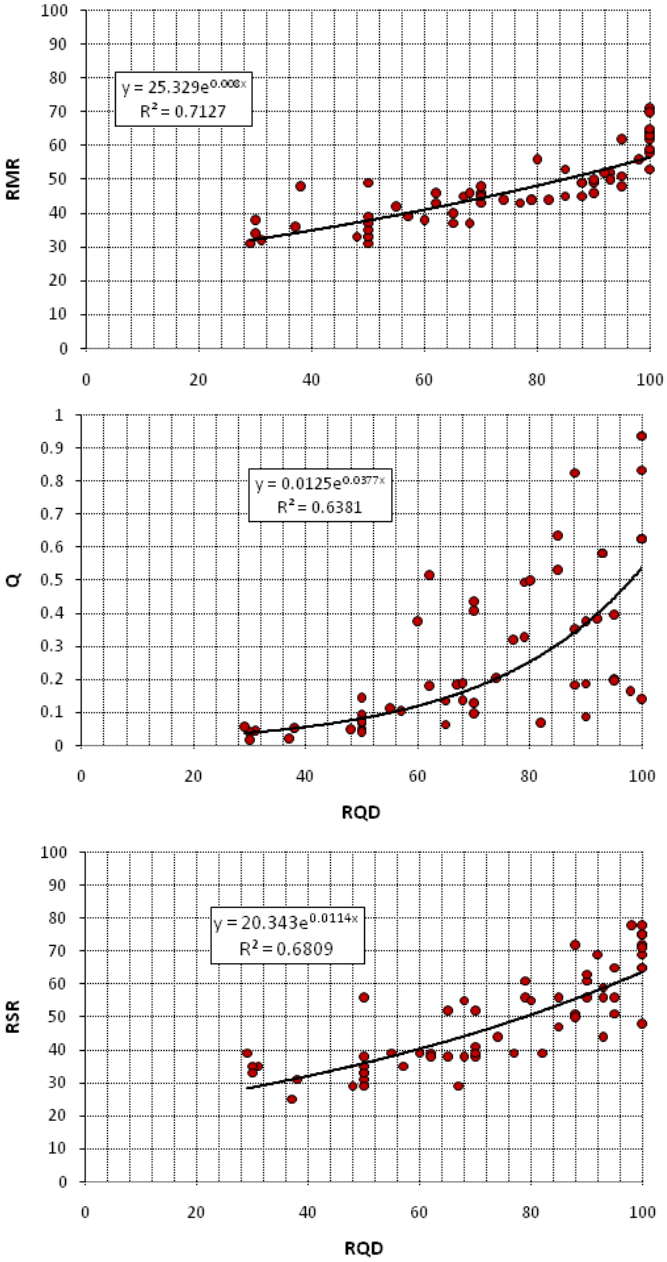
از آن‌جاکه هر سیستم طبقه‌بندی باید بتواند کیفیت نوعی سنگ را در رده‌های کم‌تر محدود کند در این میان تنها طبقه‌بندی Q است که تودهٔ سنگ مارنی را در دو رده محدود کرده است. اما شاخص‌های آماری روش طبقه‌بندی RMR را مناسب‌تر از بقیه معرفی می‌کند.

شاخص کیفیت سنگ (RQD) یکی از ابزارهای ساده و رایج در ارزیابی و رده‌بندی توده-سنگ است و این شاخص در ارتباط با سیستم‌های دیگر رده‌بندی توده‌سنگ قرار دارد (شکل٤). چنان‌که دیده می شود، شاخص RQD بیش‌ترین هم‌بستگی را با سیستم RMR نشان می‌دهد. این شاخص معرف زون‌های خرد شده و میزان شکنندگی توده‌سنگ است ولی در سنگ‌های مارنی به‌علت داشتن رفتار خمیری و تاثیرپذیری از محیط دارای رفتاری نرم و شکل‌پذیر هستند. برای همین است که منحنی توزیع فراوانی آن چندنمایی و دارای کشیدگی و کج‌شدگی منفی است و نشان‌دهندهٔ آن است که سنگ‌های مارنی دارای تنوع زیاد از لحاظ شاخص کیفیت سنگ هستند. بر اساس این شاخص بیش از ۵۰ درصد نمونه‌ها در رده خوب و خیلی‌خوب قرار دارند. از این رو، از این شاخص به تنهایی نمی‌توان سنگ‌های مارنی را رده‌بندی کرد.

بحث و نتیجه‌گیری

انواع سیستم‌های رده‌بندی توده‌سنگ دارای رابطهٔ مستقیم با یک‌دیگر هستند. یکی از رایج‌ترین روابط بین سیستم‌های طبقه‌بندی، رابطهٔ تجربی بین RMR و Q است. محققان روابط متعددی بین این دو سیستم پیشنهاد کردند (جدول۷). اغلب روابط ارائه شده در پروژه‌های عمرانی که متشکل از توده‌های سنگی متعدد است؛ اشاره‌ای به نوع سنگ ندارد. در سیستم طبقه‌بندی RMR-Q روابط بین این دو در سنگ‌های مارنی متفاوت از بقیه است (شکل۵).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.3.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3427]



شکل ٤. رابطهٔ بین شاخص کیفیت سنگ (RQD) با سیستم‌های رده‌بندی RSR ، RMR و Q

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.3.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3427]

نکتهٔ مهم و اساسی که در ارائه این روابط تجربی بدان اشاره نشد، تعداد نمونه‌های آنالیز شده و دامنهٔ تغییرات RMR و Q است. چرا که اعتبار روابط تجربی تابع دامنهٔ اعداد مقایسه شده است. چنان‌که در شکل ۵ مشاهده می‌شود در مقادیر Q<۱ اختلاف در روابط بین Q-RMR زیاد است از طرفی این رده از سنگ‌ها دارای حساسیت بیش‌تری در تحلیل پایداری هستند و از این لحاظ نیز استفاده از روابط محافظه کارانه باید باشد. در سنگ‌های مارنی بررسی شده نیز بیش‌ترین فراوانی در رده‌بندی Q بین ۰/۱ تا ۱ قرار دارد.

جدول ۷ . مقادیر a و b در رابطهٔ RMR=a lnQ + b ارائه شده به‌وسیلهٔ محققان مختلف

a	۹	۱۰/۵	۱۳/۵	٤۳	٦۰/۸	٥٥/۲	٥/٤	٤/۲	٦/٦۳	٥/۹	۹/٥	٦/۸۱	۲/۸	٦/۸
b	٤٤	٤٤	٤۳	٦۰/۸	٥٥/۲	٥۰/٦	۳٥/٥	٤۳	٤٤	٤۲/۳	٤٥/۲	٥۷/٦
مرجع	[۲]	[۲۰]	[۲۰]	[۲۰]	[۲۰]	[۲۱]	[۲۰]	[۲۱]	[۲۲]	[۲۳]	[۲٤]	[این تحقیق]

هم‌چنین رابطهٔ ارائه شده بین RSR و Q به‌وسیلهٔ محققان با رابطهٔ موجود در سنگ‌های مارنی متفاوت است (جدول۸). رابطهٔ بین RSR و RMR نیز این وضعیت را نشان می‌دهد (جدول۹). نتیجه این‌که عامل جنس سنگ و شرایط ناپیوستگی در توده‌سنگ، در سنگ‌های مختلف رفتار متفاوتی را نشان می‌دهد و به‌نظر می‌آید تحقیق در خصوص ارائه روابط حاکم بر سیستم‌های طبقه‌بندی در سنگ‌های مختلف باید بیش‌ترانجام پذیرد.

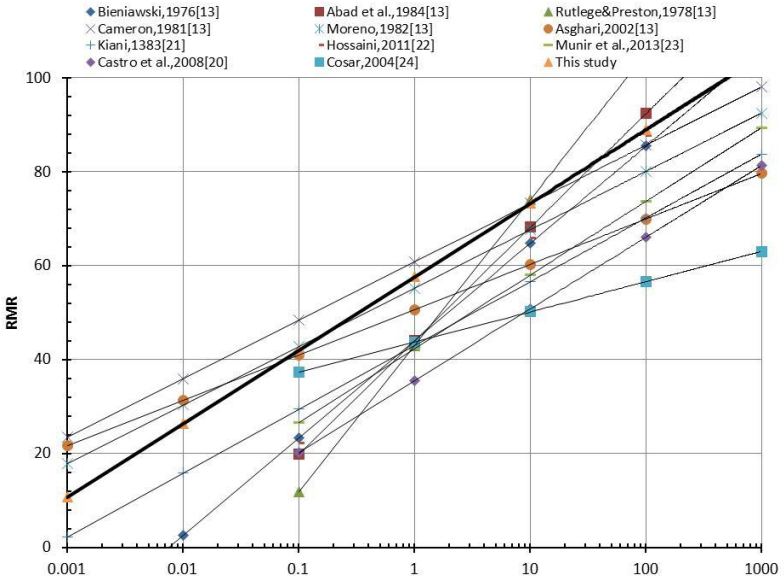
جدول ۸ . مقادیر a و b در رابطه RSR=a lnQ+b ارائه شده توسط محققین مختلف

a	۱۳/۳	٦	٥/۹	۹/٤
b	٤٦/٥	٤٦	٤٥/۹	٦٤/٥
مرجع	[۲۰]	[۲۳]	[۲۳]	[این تحقیق]

جدول۹ . مقادیر a و b در رابطه RSR=a RMR+b ارائه شده به‌وسیلهٔ محققان مختلف

a	۰/۷۷	۰/۷۸	۰/۸٤	۱/۲۲
b	۱۲/٤	۱۷	۱۰/۳	-۷/۲۲
مرجع	[۲۰]	[۲۳]	[۲۳]	[این تحقیق]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.3.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3427]



شکل۵. مقایسهٔ روابط بین RMR-Q در سنگ‌های مارنی بررسی شده با روابط محققان

در سنگ‌های مارنی بررسی شده بیش‌ترین هم‌بستگی بین RQD و RMR وجود دارد (جدول ۱۰). با کنترل آزمون t (t-student) روابط بین سیستم‌های رده‌بندی در سطح معنی‌داری قرار دارد.

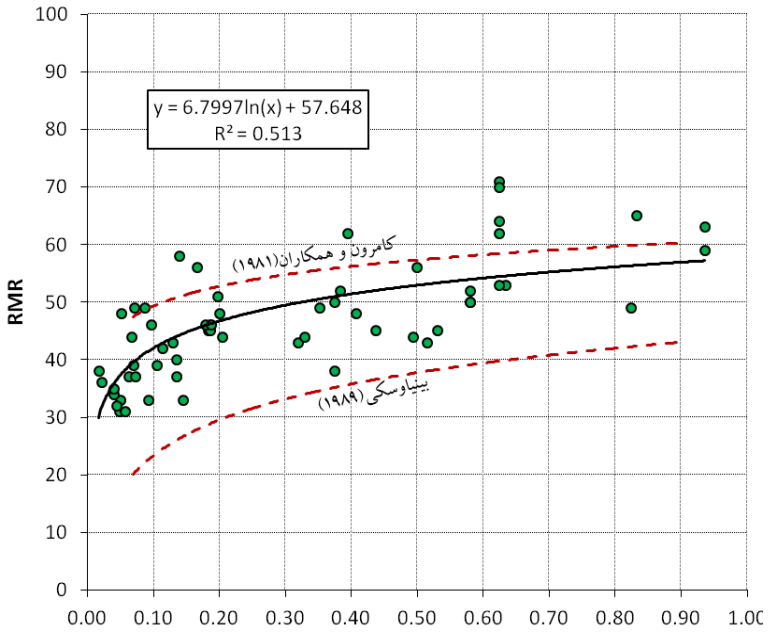
جدول ۱۰. ضریب هم‌بستگی(r) بین سیستم‌های رده‌بندی توده‌سنگ در سنگ‌های مارنی بررسی شده

سیستم	RQD	Q	RMR	RSR
RQD	۱			
Q	۰/۷۹۸	۱		
RMR	۰/۸٤٤	۰/۷۲۰	۱	
RSR	۰/۸۲٥	۰/٦۲۲	۰/۸۱٥	۱

در بسیاری از موارد دیده شده که از روابط تجربی بین RMR و Q برای مقاصد مختلف استفاده می‌شود. این دو روش طبقه‌بندی کاربردهای بسیاری در طراحی تجربی سازه‌های مهندسی دارند [۱۳]. محدودهٔ تغییرات رابطه بین Q-RMR در سنگ‌های مارنی بررسی شده بین دو رابطهٔ کامرون و همکاران (۱۹۸۱) و بینیاوسکی (۱۹۸۹) است [۱۳]. رابطهٔ بینیاوسکی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.3.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3427]

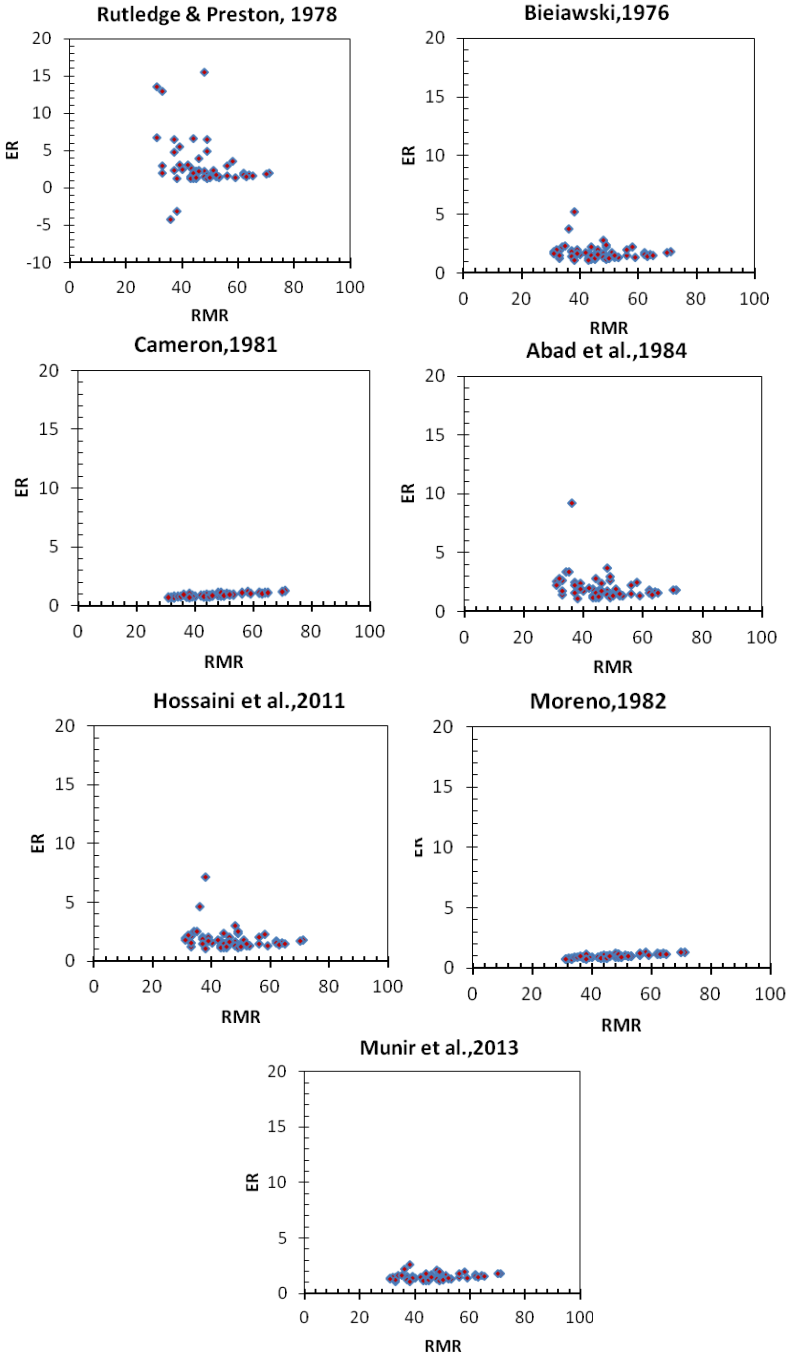
حد پایینی ارتباط بین این دو سیستم را در مارن‌ها را نشان می‌دهد البته چنان‌چه ضریب تعدیل راستای پروژه نسبت به امتداد سطوح ناپیوستگی اعمال شود، رابطهٔ به‌دست آمده بین سنگ‌های مارنی به رابطهٔ بینیاوسکی نزدیک می‌شود (شکل٦). هم‌چنین مقادیر تغییرات Q بین ۰/۰۰۱ تا ۱ است در صورتی‌که روابط ارائه شده Q از ۰/۰۰۱ تا ۱۰۰۰ است. در صورتی‌که مقادیر کم حساسیت بیش‌تری برای بررسی دارد.



شکل٦. رابطهٔ بین سیستم‌های رده‌بندی Q-RMR در سنگ‌های مارنی بررسی شده

به‌منظور اعتبارسنجی روابط ارائه شده به‌وسیلهٔ محققان مختلف با مقادیر واقعی به‌دست آمده از سنگ‌های مارنی بررسی شده، از پارامتر نسبت خطا (ER) استفاده شده است (شکل۷). هرچه این نسبت به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهندهٔ اعتبار بیش‌تر آن رابطه برای استفاده است. با مقایسه روابط مختلف تجربی، ملاحظه می‌شود که میانگین نسبت خطای رابطهٔ کامرون (۱۹۸۱) و مورنو (۱۹۸۲) در محدوده واحد است و استفاده از آن‌ها در سنگ‌های مارنی بیش‌ترین اعتبار را دارد. چنان‌که در شکل ٦ دیده می شود. نمودار کامرون (۱۹۸۱) به منحنی به‌دست آمده در این تحقیق تشابه زیاد داشته و نزدیک به آن است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.3.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3427]



شکل۷. نسبت خطا (ER) روابط تجربی محققان برای کاربرد در سنگ‌های مارنی بررسی شده

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.3.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3427]

نتیجه تحقیق این است که طبقه‌بندی RMR مناسب‌ترین سیستم طبقه‌بندی در سنگ‌های مارنی بررسی شده است که با RQD نیز هم‌بستگی بیش‌تری نشان می‌دهد. رابطهٔ بین دو سیستم Q-RMR در سنگ‌های مارنی بررسی شده بیش‌ترین انطباق و هم‌بستگی را با رابطهٔ کامرون و همکاران (۱۹۸۱) دارد.

منابع

1. Ghiasi V. Husaini O.H., Rostami J., Zainuddin B., Ghiasi S., Huat B.K., Ratnasamy M., "Geotechnical and geological studies of NWCT tunnel in Iran focusing on the stabilization analysis and design of support :A case study. Scientific Research and Essays", 6 (1) (2011) 79-97.
2. Bieniawski Z.T., "Engineering Rock Mass Classifications", Wiley, New York (1989) 251.
3. Robert H., "An evaluation of slope stability classification, ISRM EUROCK", Sociedade Portuguesa de Geotecnia. Portugal, Madeira, Funchal (2002) 3-32.
4. Romana M., "DMR (an adaptation of RMR), a new geomechanics classification for using dams foundations", Universidad politechnica de Valencia, Spain (2004).
5. Edelbro C., "Evalution of rock mass strength", Lulea University of technology (2004).

٦. احمدی م.، نجاتی ح.، *تخمین ضریب بهره‌وری TBM بر اساس شاخص‌های سیستم طبقه‌بندی مهندسی سنگ و نیروی نفوذ ماشین*، نشریهٔ مهندسی معدن ، دورهٔ پنجم، شمارهٔ دهم (۱۳۸۹) ٦٥-۷۲.

۷. دادخواه ر.، اجل‌لوئیان ر.، هاشمی‌اصفهانیان م.، محمدی‌کوجانی ج.، *برآورد پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ‌های دربرگیرنده مسیر تونل‌های متروی اصفهان قطعه جنوبی(صفه-آزادی)*، مجموعه مقالات نهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه تربیت معلم تهران (۱۳۸٤) ۸٤-۹۱.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.3.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3427]

8. Hosseinitoudeshki V., Vosoughikargazloo A.A., Noori Gheidari M.H., Sarveram H., "Influences of crushed fault zone in the stability of Zaker-Sorkhedizaj tunnel", NW Iran. Middle-East Journal of Scientific Research 12 (10) (2012) 1426-1434.

۹. بشیرگنبدی م.، ارومیه‌ای ع. ، نیکودل م.ر.، لشکری‌پور غ. ر.، *ارزیابی کارآیی رده‌بندی RMR در پیش‌بینی رفتار مهندسی سازند شمشک در حفریات زیرزمینی منطقهٔ سیاه بیشه*، مجموعه مقالات ششمین کنفرانس زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران (۱۳۸۸) ۷۵۳-۷٦٤.

۱۰. رضایی ح.، *خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سنگ‌های مارنی ساختگاه سد دوستی*، *پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی*، دانشگاه تربیت مدرس (۱۳۷۹) ۲۰٤.

۱۱. امیری ص.، محمدی ا.، *برآورد پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ‌های واقع در محل ساختگاه سد خرسان ۳*، هشتمین همایش انجمن زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه فردوسی مشهد (۱۳۹۲) ۷۱٦-۷۲۲.

12. Ramamurthy T., "Penetration rate of TBMs". World Tunnel Congress-Underground Facilities for Better Environment and Safety", India (2008) 1552-1563.

۱۳. اجل‌لوئیان ر.، داوودی د.، *رده‌بندی توده سنگ، روشی کاربردی در مهندسی عمران*، ترجمه، انتشارات فن آوران (۱۳۸۲) ۳٤۹.

14. Palmstroom A., Singh R.,"The deformation modulus of masses comparisons between in- situ tests and indirect estimates", Tunneling Underground Space Technol, Vol. 16 (2001) 31-115.

۱۵. بشری ع.، *اعتبارسنجی آماری روابط تجربی تعیین مدول تغییرشکل پذیری توده سنگ*، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن، دانشگاه تهران (۱۳۸۸) ۱۲٤.

16. Verman M., Singh B., Viladkar M.N., "Effect of Tunnel Depyh on Modulus of Deformation of Rock Mass", J.L.Jethwa Rock Mech. Rock Engng.Vol.30 (3) (1997) 121-127.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.3.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3427]

17. Mehrotra V.K., "Estimation of engineering parameters of rock mass", Ph.D. Thesis Department of Civil Engineering, University of roorkee, India (1992).

۱۸. زارع م.، ترابی س.ر.، *مطالعه آزمایشگاهی تأثیر مواد پرکننده برمقاومت برشی ناپیوستگی‌های سنگی*، هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز (۱۳۸۸).

۱۹. رضایی ح.، تقوی س.ا.، *کاربرد آمار در علوم زمین*، انتشارت دانشگاه گلستان، (۱۳۹٤) ۳۵۱.

20. Castro F., Diego C., Ballester M., Alvarez G., "Correlation between Bieniawski's RMR and Barton's Q Index in Low-Quality Soils", Revista de la Construccion, Vol. 9 (2010) 107-119.

۲۱. کیانی ر.، *مزایای برآورد پارامترهای ژئومکانیکی در مقایسه با آزمایشات برجا و معرفی یک رابطه جدید*، طرح ملی گاوشان – تونل انتقال آب گاوشان (۱۳۸۳) ۱-۱۳.

22. Hossaini S.M., Nezhadshahmohamad F., Dadkhah M., "Stability Assessment and Support Design for Water Deviation Binary Tunnels of Bakhtiyari Dam-Iran", 11th Underground Coal Operators Conference, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy (2011) 99-104.

23. Munir K., Farooq K., Mujtaba H., "A comparative analysis of rock mass classification systems for Hydropower projects of Pakistan", Pakistan Journal of Science, Vol.(65), No.(1) (2013) 108-113.

24. Cosar S., "Application of rock mass classification systems for future support design of the DIM tunnel near alanya", In partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science in Mining engineering (2004).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.3.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3427]