

## بررسی پارامترهای ژئومکانیک ماده و توده سنگ سازند آسماری (مطالعه موردی: ساختگاه سد خرسان-۳)

مجتبی نوری سرتنگی<sup>۱\*</sup>، غلامرضا لشکری پور<sup>۲</sup>، ناصر حافظی مقدس<sup>۳</sup>، محمد غفوری<sup>۴</sup>، حسین صادقی<sup>۵</sup>

۱- دانشجوی دکتری زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد [M.noori281@gmail.com](mailto:M.noori281@gmail.com)

۲- استاد گروه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استاد گروه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

۴- استاد گروه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

۵- استادیار گروه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

### چکیده

برآورد پارامترهای مقاومتی توده سنگ یکی از مهمترین مسائل مهندسی سنگ می‌باشد. بررسی پارامترهای ژئومکانیک و در نهایت طبقه‌بندی مهندسی توده‌های سنگی در مرحله امکان‌پذیری و طراحی اولیه یک پروژه، که اطلاعات جامع بسیار کمی در رابطه با خواص ژئوتکنیکی توده‌های سنگی، مقدار تنش و مشخصات آب‌شناسی در دسترس می‌باشد، می‌تواند بسیار مفید و سودمند باشد. هدف اصلی استفاده از یک سیستم طبقه‌بندی این است که بتوان پارامترهایی را دسته‌بندی نموده و با استفاده از نتایج آنها، ماهیت توده سنگ و چگونگی رفتار مهندسی آن را در شرایط مختلف فراهم آورد. از آنجایی که مشخصات توده سنگ در طراحی حفاری، طراحی نگهدارنده‌ها، طراحی شیب و دیگر موارد مورد نیاز می‌باشد. بر این اساس لازم دیدیم تا پارامترهای مقاومتی ساختگاه سد خرسان-۳ را بدست آورده تا بتوان با آنالیز این داده‌ها زمان پایداری تونل، طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده سنگ با استفاده از روش  $RMR, Q, GSI$  را محاسبه کرده و ارتباط بین پارامترهای مقاومتی توده سنگ با میزان مدول الاستیسیته و تغییر شکل را از روابط مختلف محاسبه و با همدیگر مقایسه کنیم.

کلید واژه: آهک آسماری، طبقه‌بندی ژئومکانیک، سد خرسان-۳،  $RMR, Q, GSI$

### ۱- مقدمه

دزره‌نگاری، حفر گمانه‌های اکتشافی و مغزه‌گیری، آزمایش نفوذپذیری و تهیه نمونه به منظور انجام آزمون‌های آزمایشگاهی می‌باشد. مطالعات آزمایشگاهی نیز شامل آزمون‌ای تعیین خصوصیات فیزیکی و ژئومکانیکی سنگ‌ها می‌باشد.

### ۲- چینه‌شناسی منطقه

محدوده مورد مطالعه در ناحیه چین‌خورده زاگرس واقع است. مطالعات زمین‌شناسی این منطقه به منظور اکتشاف نفتی توسط شرکت ملی پخش فراورده‌های نفتی ایران انجام شده است. مطابق نقشه‌های منتشر شده از طرف شرکت مذکور محدوده محل سد خرسان-۳ در ناحیه زاگرس چین‌خورده و روی تاق‌دیس لکی واقع شده است. که خود ساختگاه سد بر روی سازند آسماری واقع شده است. خلاصه‌ای از سازندهای رخنمون‌یافته در این منطقه از قدیم به جدید شامل سازندهای سروک، گورپی، آسماری، گچساران، آغاچاری و بختیاری را شامل می‌شود (نوری سرتنگی م. و همکاران، ج- ۱۳۹۰).

سد خرسان-۳ در استان چهارمحال و بختیاری در ۴۰ کیلومتری جنوب شهرستان لردگان و بر روی رودخانه خرسان در حال ساخت می‌باشد. ساختگاه سد در طول شرقی حدود ۲۵ ۵۸ ۵۰ و عرض شمالی ۱۴ ۵۰ ۳۱ در نزدیکی شهر سردشت قرار دارد. سد بتنی دو قوسی نازک با ارتفاع ۱۹۵ متر و حجم بتن یک میلیون متر مکعب برای بدنه سد و حجم مخزن بالغ بر ۱۱۵۸ میلیون متر مکعب می‌باشد. از جمله اهداف ساخت این سد می‌توان تولید ۱۰۰۰ مگاوات ساعت انرژی سالیانه، مهار سیلاب، افزایش تولید انرژی در سدهای پایین‌دست، کنترل رسوبات رودخانه و افزایش عمر سدهای پایین‌دست، اشتغالزایی، پرورش آبزیان، افزایش جاذبه گردشگری و... می‌باشد. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی طرح و نقشه زمین‌شناسی ساختگاه سد را نشان می‌دهد.

مطالعات انجام شده در این پژوهش به صورت صحرایی و آزمایشگاهی انجام شده است. مطالعات صحرایی شامل عملیات

عمدتاً صخره‌ساز بوده و شیب توپوگرافی آنها بیش از ۷۵ درجه می‌باشد. در بالا دست محور سد واحد آسماری بالایی تنوع لیتولوژیکی بیشتری را از خود نشان می‌دهد.

براساس نقشه‌های زمین‌شناسی تهیه شده در مرحله اول مطالعات، آسماری فوقانی به چهار زیر واحد تقسیم‌بندی

شده است با علائم UAS1 تا UAS4

• واحد UAS1: از آهک‌های قهوه‌ای روشن تا کرم رنگ و ضخیم لایه تشکیل شده است که ضخامت کلی آنها حدود ۳۵ متر می‌باشد.

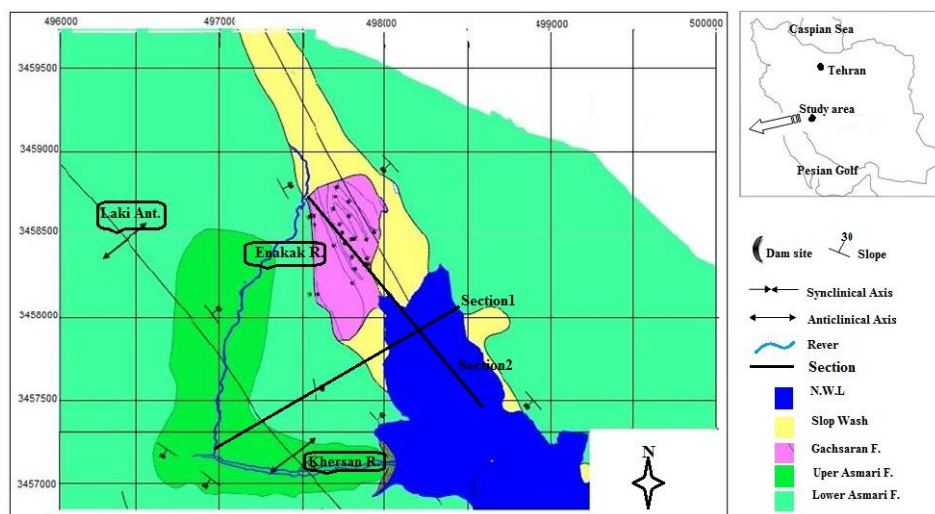
• واحد UAS2: شامل تناوبی از آهک ضخیم لایه تا متوسط لایه همراه با میان لایه‌های آهک مارنی می‌باشد. ضخامت کلی این واحد حدود ۸۰ متر برآورد می‌گردد.

• واحد UAS3: از مارن‌های ضخیم لایه، آهک و آهک مارنی و مارلستون با ضخامتی حدود ۸۰ متر تشکیل گردیده است.

• واحد UAS4: از آهک ضخیم لایه تا متوسط به همراه درصد کمی آهک مارنی تشکیل یافته است. ضخامت کلی این واحد حدود ۴۵ متر می‌باشد. قابل ذکر است جهت جریان رودخانه تابعی از روند تاقدیس‌ها و ناودیس‌های منطقه است عامل لیتولوژی نقش مهمی در شکل‌دهی مسیر رودخانه دارد به طوری که در سازندهای نرم رودخانه دارای پیچ و خم‌های متعدد و دارای بستر عریض می‌باشد.

سازند آسماری با ضخامت حدود ۵۰۰ متر در اغلب سیستم‌های سدسازی زاگرس وجود دارد. این سازند نقش مهمی در شکل‌گیری منطقه مورد مطالعه دارد و توسط سنگ آهک با میان لایه‌های مارنی که به واحدهای آسماری بالایی و پایینی تقسیم می‌شود. آسماری تحتانی شامل ۲۵۰ متر از آهک مارنی با میان لایه‌هایی از آهک و دولومیت و آسماری فوقانی با ضخامت ۲۳۵ متر متشکل از سنگ آهک توده‌ای و در زیر آسماری سازند پابده و گورپی قرار دارد که متشکل از خاک رس، شیل و مارن می‌باشد. منطقه مورد مطالعه توسط تاقدیس‌های ریگ، شورم و لکی به موازات زاگرس (شکل ۱)، تاقدیس ریگ در سمت شرق دریاچه سد و متشکل از آسماری کارستیک و تاقدیس شوروم در سمت غرب دریاچه و تاقدیس لکی میان شوروم و ریگ واقع شده است. (نوری سرتنگی م. و همکاران، ج- ۱۳۹۰).

سنگ‌های تشکیل‌دهنده محدوده تکیه‌گاه‌ها و پی سد را سازند آسماری تشکیل می‌دهد. این سازند به دلیل تنوع لیتولوژیکی و خصوصیات چینه‌شناسی به دو بخش آسماری پائینی (LAS) و آسماری بالایی (UAS) تقسیم شده است. مرز بین دو واحد مذکور را آهک‌های فسیل‌دار و آواری تشکیل می‌دهد. بخش بالایی آسماری از آهک‌های ضخیم لایه به رنگ قهوه‌ای روشن همراه با میان لایه‌هایی از جنس مارلستون (که دارای درصد بسیار کمی می‌باشند) تشکیل یافته‌اند. لایه‌های ضخیم آهکی در ترازهای بالاتر

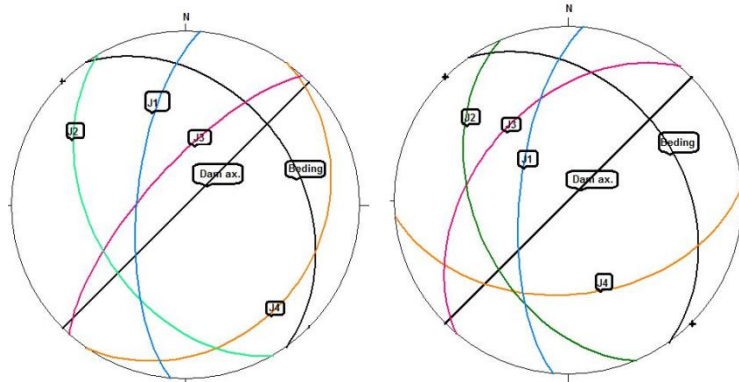


شکل (۱): موقعیت جغرافیایی طرح سد (آبان پژوه)

### ۳- زمین‌شناسی ساختمانی

می‌دهد که علاوه بر صفحات لایه‌بندی که دارای جهت-شیب و شیب و شیب ۳۵/۵۵ می‌باشند. چهار دسته اصلی وجود دارد که در جدول (۱) توصیف و به روش (Prist 1985) ترسیم شده که در شکل (۲) مشاهده می‌شود.

با بررسی‌های میدانی و با استفاده از وسایل موجود تعداد گسل و درزه‌های اصلی ثبت شده در جناح راست و چپ به ترتیب ۲۷ و ۱۲ عدد می‌باشد، از آوردن مشخصات تک تک این گسل‌ها خوداری شده است. تجزیه و تحلیل اطلاعات جمع‌آوری شده درزه‌ها در تکیه‌گاه راست نشان



شکل (۲): دسته درزه‌های تکیه‌گاه راست (راست)، تکیه‌گاه چپ (چپ)

جدول (۱): دسته درزه‌های موجود در تکیه‌گاه راست (راست)، تکیه‌گاه چپ (چپ) سد خرسان-۳

دسته درزه	تکیه‌گاه راست		تکیه‌گاه چپ	
	شیب / امتداد	نوع درزه	شیب / امتداد	نوع درزه
J1	۶۵/۲۷۰	برشی	۶۵/۲۷۵	برشی
J2	۴۰/۲۵۰	کششی	۴۵/۲۴۰	کششی
J3	۴۵/۳۱۰	کششی	۷۰/۳۱۰	کششی
J4	۴۵/۱۷۵	برشی	۲۰/۱۲۵	برشی

### ۴- طبقه‌بندی ژئومکانیکی سنگ ساختمانی

ارزیابی مقاومت توده سنگ‌های درزه‌دار کار مشکلی است. آزمون‌های آزمایشگاهی روی نمونه‌های بکر نمی‌توانند نمایش‌دهنده خواص توده سنگ در یک حجم بزرگ باشند. از سوی دیگر انجام آزمایشات گران‌قیمت برای تعیین مقاومت‌های بر جای توده سنگ به ویژه در مراحل ابتدایی پروژه، توجیه‌پذیر نیست.

جهت طبقه‌بندی سنگ ساختمانی آزمایش‌های زیر انجام شد که به ترتیب توصیف خواهند شد:

- ارزیابی خصوصیات ژئوتکنیکی منطقه مورد مطالعه
- آزمایش تعیین مشخصات فیزیکی سنگ سالم ( چگالی، درصد تخلخل، درصد جذب آب، شاخص دوام)
- آزمایش تعیین پارامترهای مقاومتی سنگ سالم ( UCS، برزیلی، برش مستقیم، مقاومت فشاری سه محوره)

- تعیین معیار هوک و براون
- تغییر شکل‌پذیری سنگ سالم (مدول الاستیسیته استاتیکی، مدول الاستیسیته دینامیکی)

• طبقه‌بندی توده سنگ با روش (RMR, Q, GSI) روش‌هایی که امروزه کم و بیش برای حل این مشکل مد نظر قرار می‌گیرند استفاده از معیارهای گسیختگی تجربی مانند معیار موهر-کولمب یا معیار هوک - براون است. در این روش‌ها پارامترهای مورد نیاز توده سنگ به کمک روش‌های مختلف از جمله طبقه‌بندی توده سنگ‌ها از دیدگاه مهندسی برآورد می‌شوند. (کارخیران، ا، ۱۳۹۰)

استفاده از طبقه‌بندی‌های توده سنگ به عنوان روش‌های تجربی در طراحی روش حفاری و نگهداری فضاهای زیر زمینی در توده سنگی به دلیل سریع و راحت بودن، امروز

توسط Deere 1986 در شکل (۳) مشاهده می‌کنید (نوری سرتنگی م. و همکاران ۱۳۹۶). به طور کلی با توجه به نتایج به دست آمده از حفاری ۷ گمانه در محدوده محور سد، علیرغم وجود زون‌های با کیفیت بد تا بسیار بد مقادیر RQD برای واحد آسماری بالایی حدود ۶۲٪ و برای آسماری پایینی ۶۶٪ برآورد می‌شود که هر دو واحد سنگی را در کلاس متوسط قرار می‌دهد (نوری سرتنگی م. ۱۳۹۰).

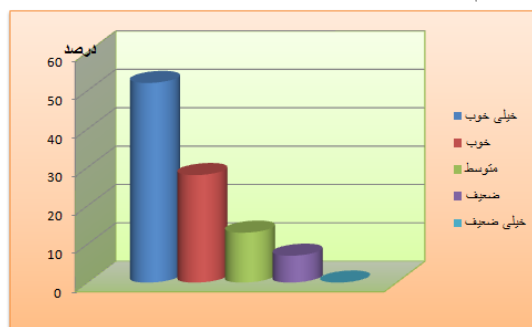
**نفوذپذیری:** ضریب نفوذپذیری برحسب تعریف Lancaster-Jones (1975) به میزان آب جذب شده در واحد طول گمانه در یک زمان مشخص تحت یک فشار خاص که این فشار بستگی به جنس، عمق و بازشدگی توده سنگ دارد محاسبه می‌گردد. از آنجایی که داده‌های حاصل از آزمایش لوژان اساس و پایه طراحی پرده آبند می‌باشد. (Houlsby (1990 پیشنهاد می‌کند که هرگاه میزان لوژان کمتر از ۳ باشد نیازی به اجرای پرده نمی‌باشد. اما زمانی که لوژان بین ۱۰-۳ می‌باشد اجرای یک ردیف گمانه تزریق و در صورتی که بیش از ۱۰ باشد اجرای چند ردیف گمانه ضروری می‌باشد (Uromeihy et al., 2011). نتایج آزمایشات لوژان اندازگیری شده در سد خرسان-۳ در شکل (۴) نمایش داده شده است به طور کلی بیش از ۹۰٪ از گمانه‌های حفر شده در سازند آسماری لوژان کمتر از ۱۰ دارند که می‌تواند نرخ هوازدگی و شکستگی‌های توده سنگ را ارزیابی کند همچنین مکانیزم جریان آب با انجام آزمایش لوژان به صورت فشار پله‌ای محاسبه گردید که نشان‌دهنده این است که حدود ۸۰٪ از آزمایشات رفتار خطی از خود نشان داده‌اند که در شکل نشان داده شده است.

بسیار رایج و گسترده شده است (گنبدی، ۱۳۸۸). هدف اصلی به کارگیری یک سیستم طبقه‌بندی این است که بتوان مشخصه‌هایی را با استفاده از تکنیک‌های ساده ارزیابی، سنجش و دسته‌بندی کرده و با بهره‌گیری از نتایج چنین گروه‌بندی‌هایی امکان برآورد ماهیت ذاتی ماده و چگونگی رفتار آن در شرایط مختلف مهندسی را فراهم آورد. طبقه‌بندی توده سنگ استخوان‌بندی اصلی رویه طراحی تجربی را تشکیل داده و در مهندسی سنگ به طور گسترده استفاده می‌شود. از آنجایی که رفتار مهندسی توده سنگ به مشخصات سنگ سالم و ناپیوستگی‌ها و نیز وضعیت آب زیرزمینی بستگی دارد، بدون شک حضور سه پارامتر زیر به عنوان طبقه‌بندی توده سنگ لازم است، یک پارامتر به عنوان معرف مشخصه‌های سنگ سالم، یک پارامتر به عنوان معرف ناپیوستگی‌ها و در نهایت پارامتر دیگر شرایط آب زیرزمینی را توصیف می‌کند (فاروق، ۱۳۷۸).

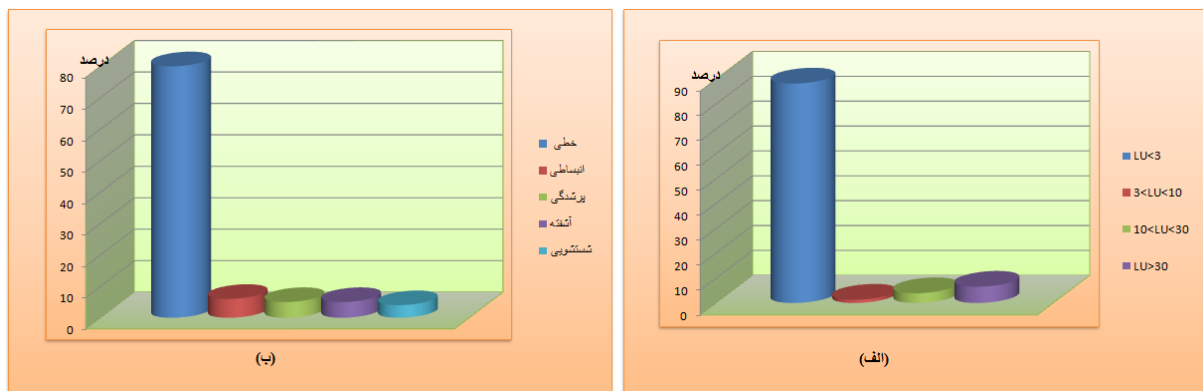
استفاده از طبقه‌بندی‌های توده سنگ به عنوان روش‌های تجربی در طراحی روش حفاری و نگهداری فضاهای زیرزمینی در توده سنگی به دلیل سریع و راحت بودن، امروز بسیار رایج و گسترده شده است (گنبدی، ۱۳۸۸).

#### ۵- ارزیابی خصوصیات ژئوتکنیکی منطقه مورد مطالعه

**شاخص کیفی توده سنگ:** شاخص کیفی توده سنگ (RQD)، اغلب به عنوان یک پارامتر برای تعیین خصوصیات دسته درزه‌ها در یک توده سنگ و همچنین نشان دادن کیفیت توده سنگ ساختگاه استفاده می‌شود (Uromeihy et al. 2011). به منظور بررسی و ارزیابی ژئوتکنیکی سنگ بستر ساختگاه و تأسیسات وابسته آن، اطلاعات بدست آمده از گمانه‌های اکتشافی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت که با توجه به تقسیم‌بندی ارائه شده



شکل (۳): تغییرات RQD ساختگاه سد خرسان-۳



شکل (۴):

(الف) نتایج آزمایشات لوژان ساختگاه سد خرسان-۳ (ب) مکانیزم رفتارنگاری آب در گمانه‌های ساختگاه سد خرسان-۳

### ۶- آزمایش تعیین مشخصات فیزیکی سنگ سالم

تعیین گردید و همچنین به منظور بررسی مقاومت نمونه‌های سنگی در مقابل تر و خشک شدن متوالی و نیز فرسایش، مجموعاً تعداد ۲۵ نمونه طی مراحل مختلف مطالعات انجام شده تحت آزمایش اندازه‌گیری دوام و وارفتگی در مقابل آب طی دو سیکل متوالی قرار گرفتند. خلاصه نتایج مربوط به این آزمایش در جدول (۲) نشان داده شده است که رتبه‌بندی دوام سنگ براساس طبقه‌بندی گمبل (1971 - Gamble) نیز در این جدول آورده شده است.

در مجموع جهت انجام آزمایش چگالی تعداد ۵۰ نمونه در شرایط خشک و ۵۴ نمونه در شرایط اشباع اندازه‌گیری گردید و از آنجایی که یکی از ویژگی‌های مهم نمونه‌های سنگی در طراحی‌های مکانیک سنگ میزان درصد تخلخل سنگ است تعداد آزمایش برابر با چگالی انجام پذیرفت که میانگین داده‌های حاصل در جدول (۲) نمایش داده شده است.

از آنجایی که درصد جذب آب بستگی به میزان و نوع رس و همچنین تخلخل سنگ دارد با اندازه‌گیری تعداد ۶۰ نمونه میزان جذب آب در نمونه‌های مختلف سازند آسماری

جدول (۲): نتایج آزمایش تعیین مشخصات فیزیکی سنگ سالم (چگالی، درصد تخلخل، درصد جذب آب، شاخص دوام)

نوع سنگ	واحد	وزن واحد حجم (gr/cm <sup>3</sup> )		تخلخل (%)	جذب آب (%)	شاخص دوام (%)	طبقه بندی گمبل
		خشک	مرطوب				
LI	UAS1	۰/۱± ۲/۶	۰/۱± ۲/۷	۲/۱ ± ۳/۲/	۰/۶ ± ۱/۱	۹۳	متوسط به بالا
	UAS2	۰/۱± ۲/۶	۲/۶	۲/۰ ± ۴/۰	۰/۷ ± ۱/۵	۹۹	خیلی بالا
	LAS	۰/۱± ۲/۶	۰/۱± ۲/۶	۲/۱ ± ۳/۸	۰/۸ ± ۱/۳	۹۸	بالا
MLS	UAS1	۰/۱± ۲/۶	۲/۶	۱/۹ ± ۴/۵	۰/۵ ± ۱/۵	۹۹	خیلی بالا
	UAS2	۰/۱± ۲/۶	۰/۱± ۲/۶	۰/۹ ± ۳/۵	۰/۳ ± ۱/۴	۹۹	خیلی بالا
	UAS3	۲/۶	۲/۶	۱/۲	۰/۱ ± ۰/۵	۹۶	بالا
	LAS	۰/۱± ۲/۶	۰/۱± ۲/۶	۲/۵ ± ۴/۳	۰/۸ ± ۱/۵	-	-
M	UAS2	۲/۵	۲/۶	۱/۱ ± ۷/۰	۰/۴ ± ۲	۹۶	بالا
	LAS	۰/۱± ۲/۵	۰/۱± ۲/۶	۱/۵ ± ۴/۲	۰/۳ ± ۱	۹۸	خیلی بالا

کند. یکی از قدیمی‌ترین آزمایش‌های تعیین مقاومت برشی آزمایش برش مستقیم است در این آزمایش تنش‌های وارد بر سطحی که در آن گسیختگی رخ می‌دهد در سراسر آزمایش مستقیماً کنترل می‌شود. برای اندازه‌گیری پارامترهای مقاومت برشی ( $\phi$ ,  $c$ ) درزه‌ها در نمونه‌های سنگی در ساختگاه سد، مجموعاً ۲۶ آزمایش برش مستقیم انجام شد. نتایج این آزمایش در جدول (۳) نمایش داده شده است (نوری سرتنگی و همکاران، ب- ۱۳۹۰).

۷-۴- مقاومت برشی سه‌محوری: برای اندازه‌گیری این آزمایش در مجموع تعداد ۲۸ آزمایش بر روی آهک، آهک مارنی و مارن ساختگاه سد خرسان-۳ انجام پذیرفت که نتایج این آزمایش به صورت خلاصه شده در جدول (۳) نمایش داده شده است.

#### ۸- تعیین معیار هوک و براون

به منظور تعیین پارامترهای  $m_i$  و مقاومت تک‌محوری سنگ‌ها ( $\sigma_c$ )، از اطلاعات آزمایش‌های سه‌محوری (۱۴) نمونه که در آنها شرایط تنش‌های حداکثر و حداقل در دسترس بود) به عنوان ورودی برنامه RocLab استفاده شد. نتایج مربوط به این پارامترهای در جدول (۴) نمایش داده شده‌اند. همان‌طور که پیداست پارامترهای بدست آمده برای معیار هوک-براون سنگ‌ها، بطور قابل توجهی پراکنده می‌باشند که علت آن را می‌توان به تنوع سنگ‌شناسی از مارن تا آهک دانست.

#### ۷- آزمایش تعیین پارامترهای مقاومتی سنگ سالم

۷-۱- مقاومت فشاری تک‌محوری: آزمایش مقاومت تراکمی تک‌محوری مطابق با استاندارد ASTM D2938 بر روی مغزه‌هایی با قطر ۵۴ میلی‌متر و نسبت طول به قطر ۲ تا ۲/۵ برابر انجام گرفت (STM, USA, 2002). یکی از اساسی‌ترین پارامترهای مقاومتی سنگ است که معمولاً برای بررسی قابلیت حفاری توده سنگ و فروروی ابزار برش در سطح آن و نیز ارزیابی مقاومت سنگ در مقابل فشار به کار می‌رود (Farrokh E, et al 2009). هر چند سنگی با مقاومت کمتر برای عملیات حفاری تونل‌ها ایده‌آل محسوب می‌شود ولی باید اذعان داشت که مقاومت را تحت تأثیر خود قرار دهد، به طوری که افزایش کم تنش جانبی نسبت به مقاومت تک‌محوری، پیامدهایی مانند خزش، خردشدگی و ورقه شدن سنگ را در پی داشته و در نهایت تنش جانبی کم شده حفر تونل با مشکل مواجه خواهد شد. بنابراین توده سنگی با مقاومت کمتر از 49 مگاپاسکال ممکن است نتواند در برابر بار فشارهای جانبی مقاومت کند (کرمی م. و همکاران ۱۳۹۳). بنابراین جهت انجام این آزمایش تعداد ۴۰ نمونه در حالت خشک و ۵۲ نمونه در حالت اشباع اندازه‌گیری و میانگین آنها در جدول (۳) ذکر شده است (نوری سرتنگی و همکاران، الف- ۱۳۹۰).

۷-۲- مقاومت کششی تک‌محوری غیرمستقیم: این آزمایش براساس استاندارد ASTM D3967 بر روی مغزه‌ها با قطر 54 میلی‌متر و نسبت ضخامت به قطر ۰,۵ انجام پذیرفت (STM, USA, 1996). به منظور تعیین این آزمایش از روشی تحت عنوان تست برزلی استفاده می‌کنیم. جهت تعیین مقاومت کششی سنگ ساختگاه سد خرسان-۳ تعداد ۱۵ مورد آزمایش در حالت خشک و ۲۰ آزمایش در حالت اشباع اندازه‌گیری شد.

۷-۳- برش مستقیم: در همه مسائل مربوط به پایداری سنگ از قبیل طراحی تونل‌ها، دیوارهای حائل و سطوح لغزش، داشتن اطلاعات کافی راجع به مقاومت خاک و سنگ ضروری است. لیکن می‌توان گفت که مقاومت برشی، عمده‌ترین عامل در تعیین رفتار خاک و سنگ می‌باشد. مقاومت برشی، مقاومت داخلی در واحد سطح آن است، یعنی مقاومتی که می‌تواند برای تاب آوردن در برابر گسیختگی و لغزش در امتداد هر صفحه دلخواه خود بسیج

جدول (۳): خلاصه نتایج آزمایش پارامترهای مقاومتی سنگ سالم (مقاومت تک محوری، و ...)

نوع سنگ	واحد	مقاومت تراکمی تک محوری (MPa)		مقاومت فشاری		مقاومت برشی مستقیم		مقاومت کششی (MPa)	
		خشک	مرطوب	C (MPa)	$\phi$ (°)	$\phi b$ (°)	Ave. $\phi b$ (°)	خشک	مرطوب
Li	UAS1	۳۰±۸۰	۲۶±۶۹	-	-	۳۶		۲/۱±۸/۳	۲/۶±۸/۱
	UAS2	۲۱±۷۰	۲۸±۵۹	۶/۷±۱۳	۷±۵۳	۳۴	۳۴	۲/۲±۸/۲	۱±۶/۵
	LAS	۲۰±۶۵	۱۸±۵۱	۶/۵	۱±۴۴	۳۳		۲/۴±۸/۳	۲/۵±۷/۴
MLS	UAS1	۱۰±۷۰	۲۰±۶۵	۶/۷±۱۴/۵	۵±۵۵			۲/۲±۵/۶	۲/۱±۷/۳
	UAS2	۲۵±۶۶	۲۰±۴۵	۳/۶±۳/۸	۴±۴۵		۳۴	۱/۵±۶	۱/۱±۹/۸
	UAS3			۱/۱±۱۱/۸	۲±۵۳			۱/۳±۵/۸	۱/۴±۶/۶
	LAS	۱۰±۴۰	۱۳±۴۵	-	-			۱/۱±۶/۸	۲/۴±۵/۴
M	UAS2	۲۱	۱۷	۸/۳±۱۴/۲	۱۲±۴۷				
	LAS	۳۵±۳	۱۶±۶	۱۱/۳±۲/۳	۴۵±۵	۳۱	۳۱	۱±۳	۱/۲±۲/۹

#### ۹- مدول‌های تغییر شکل پذیری استاتیکی و دینامیکی: تغییر شکل پذیری سنگ سالم

استاتیک نیاز به نمونه‌گیری مستقیم از ناحیه مورد نظر دارد و تجهیزات آزمایشگاهی خاصی به منظور دستیابی به نتایج خوب مورد نیاز می‌باشد (Hongkui, G et al, 2011). لذا به علت هزینه و زمان زیاد مورد نیاز در این روش، نمی‌توان مقادیر مدول یانگ استاتیک را برای تمام اعماق سازندهای زیرزمینی به طور مستقیم با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی بدست آورد. در مقابل روش‌های دینامیکی ساده‌تر کم‌هزینه‌تر و نیازمند وقت کمتری است. در این روش با توجه به لرزه‌نگاری یا چاه‌پیمایی صوتی پروفایل پیوسته‌ای از پارامترهای الاستیک تحت شرایط درجا به دست آورد (کریم‌نژاد، م، ۱۳۹۲). علاوه بر مدول یانگ، برخی پارامترهای مکانیک سنگ دیگر همچون مدول برشی، مدول حجمی و ضریب پواسون سنگ‌ها را نیز می‌توان با استفاده از سرعت امواج برشی و امواج فشاری عبوری از سنگ‌ها به دست آورد. (Jaeger, et al, 1976) خلاصه نتایج آزمایش‌های تعیین پارامترهای الاستیک سنگ سالم (جدول ۴) و سرعت امواج فشاری و برشی و مدول یانگ دینامیکی نمونه سنگ‌های و ساختگاه سد خرسان-۳ در جدول (۵) ذکر شده است.

نسبت پواسون سنگ‌های آهکی آسماری بین ۰,۱۵ تا ۰,۴۵ (به طور متوسط ۰,۳۰) است (سهرابی س. و همکاران ۱۳۹۵). برای محاسبه مدول یانگ معمولاً شیب خط مماس در تنشی معادل ۵۰ درصد مقاومت نهایی اندازه‌گیری می‌شود که به آن مدول مماسی می‌گویند و با  $E_t$  نمایش داده می‌شود. کمیت دیگری به نام نسبت مدولی اندازه‌گیری شده که عبارت است از نسبت مدول مماسی به حداکثر مقاومت تراکمی تک محوری می‌باشد (Stagg K.g., et al, 1979). نسبت مدولی سنگ آهک‌های متوسط (M) و پایین (L) است. طبق رده‌بندی دیر و میلر هم تمامی سنگ آهک‌ها در رده سنگ‌های با مقاومت تراکمی تک محوری متوسط (C) قرار دارند. در ضمن با توجه به تغییر رطوبت طبیعی نمونه در مراحل مختلف مغزه‌گیری و آماده‌سازی، برای رده‌بندی از حالت خشک نمونه استفاده شده است (قبادی، م. ح. و همکاران ۱۳۹۳). مدول یانگ یکی از پارامترهای الاستیک سنگ‌هاست که بسته به روش تعیین آن به دو نوع استاتیک و دینامیک تقسیم‌بندی می‌شوند. آزمایشات استاتیکی که بر روی نمونه سنگ‌های گرفته شده از سازندهای زیرزمینی انجام می‌شود مقادیر مدول یانگ استاتیک را با اندازه‌گیری تغییر شکل سنگ تحت فشار بدست می‌آورند. با توجه به شرایط بارگذاری واقعی اغلب مقادیر استاتیک در تحلیل مهندسی سنگ‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما آزمایش

جدول (۴): خلاصه نتایج آزمایش‌های هوک و براون و تعیین پارامترهای الاستیک سنگ سالم

نوع سنگ	واحد	مدول الاستیک (استاتیک) (GPa)		مدول پواسون (استاتیک)		هوک و براون	
		خشک	مرطوب	خشک	مرطوب	mi	$\sigma_c$ (MPa)
Li	UAS1	۳۲±۱۱	۲۹±۳	۰/۱۶±۰/۰۶	۰/۱۹±۰/۰۶	۸/۳	۶۰
	UAS2	۲۹±۱۰	۲۸±۱۴	۰/۲۰±۰/۰۵	۰/۲۲±۰/۰۵		
	LAS	۲۷±۹	۲۱±۱۰	۰/۱۹±۰/۰۴	۰/۲۱±۰/۰۷	۸	۱۰۰
MLS	UAS1	۳۳±۸	۳۴±۱۴	۰/۱۵±۰/۰۴	۰/۱۸±۰/۰۶		
	UAS2	۲۱±۱۵	۲۰±۷	۰/۱۶±۰/۰۵	۰/۱۹±۰/۰۵		
	UAS3	۶	۷	۰/۱۹	۰/۱۳		
	LAS	۱۶±۷	۱۶±۱۱	۰/۱۵±۰/۰۳	۰/۲۰±۰/۰۶	۷/۵	۹۳
M	UAS2	۱۳	۳	۰/۲۴	۰/۱۵		
	LAS	۹±۳	۴±۱	۰/۲۰±۰/۰۴	۰/۲۳±۰/۰۱۶	۵/۷	۶۷

جدول (۵): سرعت امواج فشاری و برشی و مدول یانگ دینامیکی نمونه سنگهای ساختگاه سد خرسان-۳

نوع سنگ	واحد	سرعت امواج فشاری (m/s)		سرعت امواج برشی (m/s)		مدول یانگ دینامیکی (GPa)	
		خشک	مرطوب	خشک	مرطوب	خشک	مرطوب
Li	UAS1	۴۵۷۰±۵۷۵	۴۷۴۱±۶۱۷	۲۶۹۹±۳۱۷	۲۷۳۸±۳۴۵	۴۷±۱۰	۴۹±۱۲
	UAS2	۴۶۷۲±۷۱۷	۵۰۲۸±۵۹۳	۲۷۴۸±۳۵۹	۲۷۶۸±۲۶۹	۴۹±۱۳	۵۱±۱۰
	LAS	۴۳۳۶±۱۰۸۷	۴۲۷۷±۱۲۲۵	۲۵۳۷±۴۷۲	۲۴۷۶±۵۸۶	۴۴±۱۶	۴۹±۳۹
MLS	UAS1	۴۶۰۶±۴۶۵	۴۹۸۹±۲۶۰	۲۶۹۳±۴۴۲	۲۷۵۳±۳۲۱	۴۸±۱۴	۵۱±۱۲
	UAS2	۳۹۵۱±۴۶۰	۴۰۷۸±۷۴۴	۲۲۸۰±۲۸۱	۲۳۴۹±۳۰۹	۳۴±۸	۳۶±۱۱
	UAS3	۳۷۷۵	۳۶۱۱	۲۲۰۹	۲۱۰۳	۴۴	۲۹
	LAS	۳۸۱۲±۶۸۵	۴۴۸۱±۷۴۰	۲۲۲۵±۴۸۴	۲۴۸۰±۴۳۹	۳۳±۱۲	۴۲±۱۴
M	LAS	۳۵۲۶±۶۱۹	۳۴۳۹±۱۴۰۹	۲۰۰۴±۳۷۱	۱۹۸۹±۹۰۳	۲۷±۹	۲۹±۲۴

#### ۱۰- طبقه‌بندی توده‌سنگ ساختگاه سد خرسان-۳ با روش RMR

$A_1$  مقاومت تراکمی تک‌محوره سنگ (UCS)،  $A_2$  شاخص کیفی سنگ (RQD)،  $A_3$  فاصله ناپیوستگی‌ها،  $A_4$  وضعیت ناپیوستگی‌ها،  $S_1$  وضعیت آب زیرزمینی،  $B$  جهت ناپیوستگی با تعیین مقدار هر کدام از پارامترها و امتیاز مربوط به آن می‌توان RMR نهایی را بدست آورد و کیفیت توده سنگ را ارزیابی نمود. مجموع ۵ پارامتر نخست به عنوان RMR پایه معرفی می‌شوند. پارامتر آخر دارای امتیاز منفی می‌باشد و جمع جبری آن با RMR پایه، RMR نهایی نامیده می‌شود (Aksoy,2008).

روش طبقه‌بندی توده سنگ RMR توسط Bieniawski در سال ۱۹۷۳ معرفی شد و از آن زمان به بعد این سیستم رده‌بندی چندین بار دچار تغییرات اساسی شد که تجدیدنظرهای مهم در سال ۱۹۷۴، ۱۹۷۵، ۱۹۷۶، ۱۹۸۹ انجام گرفت که در بین آنها نسخه ۱۹۷۶ و ۱۹۸۹ اغلب مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای بدست آوردن امتیاز توده سنگی از رابطه زیر استفاده می‌شود (Palmstrom,2008)

$$RMR=A_1+A_2+A_3+A_4+A_5+B \quad \text{رابطه (۱)}$$



ساختگاه در مرحله دوم مطالعات، و نیز بررسی وضعیت شکستگی‌ها در مغزه‌های بدست آمده از گمانه‌های اکتشافی، امتیاز مربوط به فاصله‌داری درزه‌ها، شرایط آن‌ها و وضعیت رطوبت آن‌ها، به عنوان سه پارامتر دیگر مورد استفاده قرار گرفت.

ششمین پارامتر در روش RMR، وضعیت تمایل درزه‌ها نسبت به جهت تونل‌زنی می‌باشد که در طبقه‌بندی RMR89 بدست آمده است، مجموعاً نسبتاً مناسب (Fair) تشخیص داده شده است.

جدول (۶ و ۷) میزان امتیاز پارامترهای RMR در آسماری بالایی و پایینی نشان می‌دهد و همچنین شکل (۵) قسمت هاشورزده موقعیت سنگ‌های منطقه در رده‌بندی RMR را نمایش می‌دهد.

یکی از شاخص‌های مهم دربرآورد کلی میزان خردشدگی توده سنگ که به عنوان یکی از پارامترهای طبقه‌بندی RMR با RQD (میزان شاخص کیفیت سنگ) می‌باشد. در بررسی‌های انجام شده بر روی مغزه‌های اخذ شده از گمانه‌های اکتشافی حفر شده، در ترازهای مختلف (با فاصله عمودی ۲۰ متر از یکدیگر) در دو جناح ساختگاه محاسبه شده است. که نتایج بدست آمده در شکل (۳) خلاصه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود میزان شاخص کیفیت سنگ در واحد آسماری بالایی بین ۵۰ تا ۹۰ درصد و در واحد آسماری پایینی بین ۴۵ تا ۷۰ درصد تعیین شده است. با توجه به درزه‌نگاری‌های دقیق انجام شده در جناحین در مراحل مطالعاتی مختلف، درزه‌نگاری‌های انجام شده در گالری‌های اکتشافی جناحین

جدول (۶): طبقه‌بندی توده‌های سنگی در واحد آسماری بالایی (RMR(89)

پارامتر	امتیاز
۱- مقاومت سنگ دست نخورده ۷۴-۵۰ مگاپاسکال	۷
۲- میانگین کیفیت مغزه‌های حفاری (RQD) ۹۰٪-۵۰٪ (برحسب لوگ گمانه‌ها)	۲۰-۱۳
۳- میانگین فاصله گذاری از ناپیوستگی‌ها ۲۰ تا ۶۰ سانتیمتر	۱۰
۴- شرایط ناپیوستگی	
طول ناپیوستگی‌ها به طور میانگین ۱-۱۵ متر	۴-۱
بازشدگی >۰/۱- >۰/۵	۵-۱
زبری: تقریباً نرم تا صاف	۱-۰
پرشدگی: پرشدگی سخت >۰/۵ میلیمتر	۶-۴
فرسایش در اثر هوازدگی: کمی هوازده	۵
۵- آب زیر زمینی: مرطوب یا به طور کامل خشک	۱۵-۱۰
۶- جهت ناپیوستگی: خوب	-۷
جمع امتیازات	۶۶-۴۴
مقدار متوسط	۵۵
کلاس توده سنگ	سنگ خوب

جدول (۷) : طبقه‌بندی توده‌های سنگی در واحد آسماری پایینی (RMR(89)

امتیاز	پارامتر
۷	۱- مقاومت سنگ دست نخورده ۵۲ مگاپاسکال
۱۳-۸	۲- میانگین کیفیت مغزه‌های حفاری (RQD) ۴۵-۷۰٪ (برحسب لوگ گمانه‌ها)
۱۰-۸	۳- میانگین فاصله گذاری از ناپیوستگی‌ها ۶ تا ۶۰ سانتیمتر
	۴- شرایط ناپیوستگی
	طول ناپیوستگی‌ها به طور میانگین ۱-۱۰ متر
	بازشدگی <math>0/5 < - > 0/1</math>
۲۱-۱۱	زبری: تقریباً نرم تا صاف
	پرشدگی: پرشدگی سخت <math>0/5</math> میلی‌متر
	فرسایش در اثر هوازدگی: کمی هوازده
۱۵-۱۰	۵- آب زیر زمینی: مرطوب یا به طور کامل خشک
-۷	۶- جهت ناپیوستگی: خوب
۵۹-۳۷	جمع امتیازات
۴۸	مقدار متوسط
سنگ خوب	کلاس توده سنگ

۱۱- طبقه‌بندی توده سنگ ساختگاه سد خرسان-۳ با روش Q

این روش برای امتیازدهی توده سنگ در حفاریات زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد. پارامترهای شش‌گانه مورد استفاده در تعیین میزان شاخص Q در ساختگاه سد به صورت جداول (۸) آورده شده است.

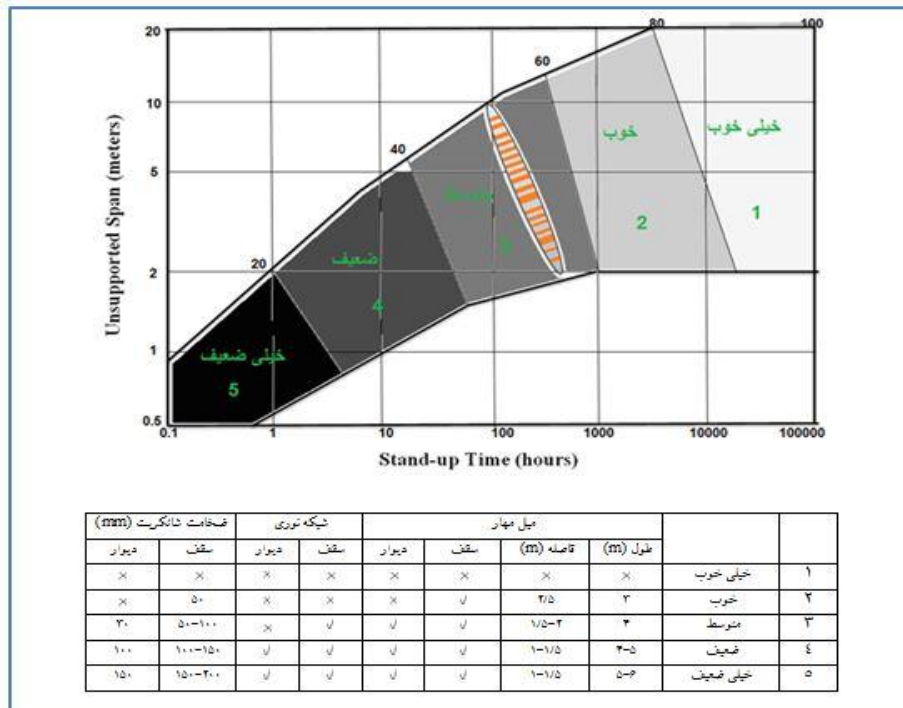
همانند روش RMR سیستم طبقه‌بندی Q که در سال ۱۹۷۴ توسط بارتون (Barton) ارائه شده است. آنها کیفیت توده سنگ را به صورت زیر تعریف نمودند. (Palmstrom, et al. 2006).

$$Q = [RQD/J_n] \cdot [J_r/J_a] \cdot [J_w/SRF] \quad \text{رابطه (۲)}$$

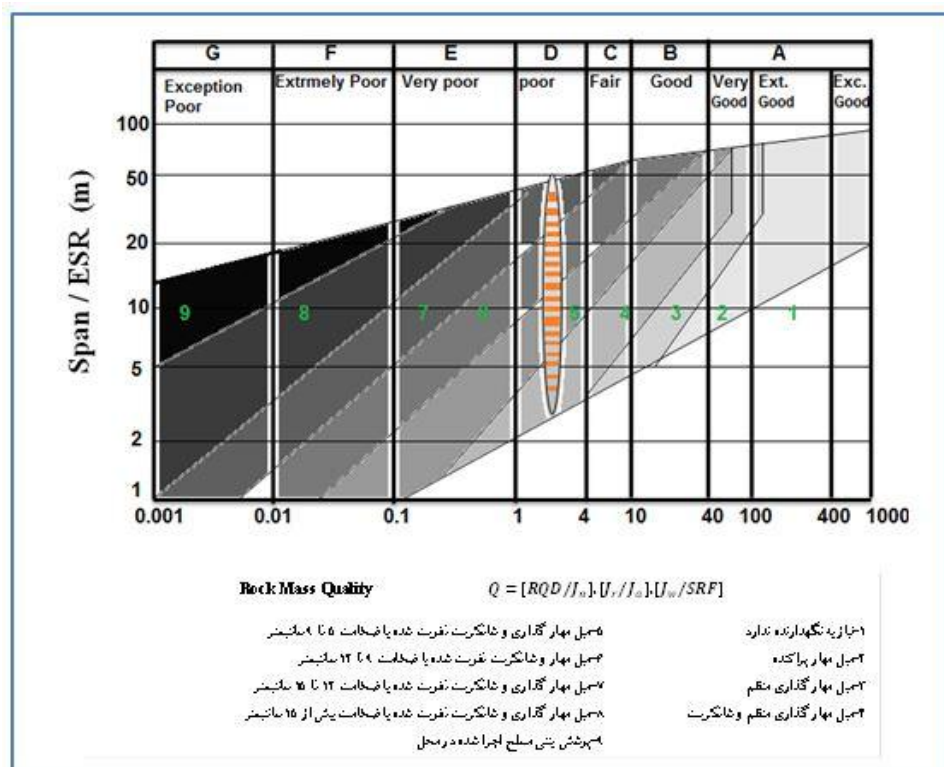
(Barton, 1974)

جدول (۸): طبقه‌بندی توده‌های سنگی در واحد آسماری بالایی و پایینی به روش Q

امتیاز آسماری پایینی	امتیاز آسماری بالایی	پارامتر
۶۵-۵۵	۷۵-۶۵	۱- تعیین کیفیت سنگ (RQD): به طور متوسط ۶۵-۷۵٪ (با توجه به لوگ‌های مربوط به گمانه‌ها و نیز استفاده از فرمول $J_v=12$ ; $RQD=115-3.3J_v$ )
۱۵	۱۲-۹	۲- تعداد دسته درز: $(J_n)$ درزه اصلی به علاوه مفاصل تصادفی
۲-۱	۲-۱	۳- زبری درزه‌ها ( $J_r$ ) بین صاف و زاویه‌دار تا صاف موج‌دار
۲-۱	۳-۲	۴- هوازدگی درزه‌ها ( $J_a$ ): دیواره بدون هوازدگی ولی سطح آن کمی هوازده بدون کانی‌های نرم، ذرات ماسه، رس یا سیلت منفصل و یا پوشش شنی
۱	۱	۵- آب ( $J_w$ ): حفاری خشک و یا جریان خفیف محلی
۵	۵	۶- فاکتور کاهش استرس: SRF بین "یک منطقه برشی با سنگ سالم عمق حفاری کمتر از ۵۰ متر" و "بازشدگی کم درزه‌ها، به شدت درزه‌دار در هر عمقی"
۰/۰-۷/۹	۱/۱-۲۵/۴	مجموع امتیازات $Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$



شکل (۵): موقعیت سنگ‌های منطقه (قسمت هاشورزده) در رده‌بندی RMR



شکل (۶): موقعیت سنگ‌های آهکی سازند آسماری در نمودار Q-System

ضعیف تا ضعیف قرار می‌گیرد. با استفاده از رابطه Q و RMR که توسط بارتون و همکاران در سال ۱۹۹۵ ارائه

با توجه به دامنه تغییرات شاخص Q (۱/۴-۰/۷) توده سنگ محدوده ساختگاه سد خرسان-۳ در کلاس خیلی

آن با معیار شکست هوک و براون معین می‌شود، ذکر گردد. در این قسمت سعی شده که GSI از طریق جدول (۹) و از فرمول‌های ارائه شده توسط بارتون محاسبه گردید.

$$Q' = \frac{RQD}{I_n} \times \frac{I_r}{I_a} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$+44GSI = 9 \log Q' \quad \text{رابطه (۴)}$$

با استفاده از دو رابطه اخیر برای محاسبه GSI بارتون ارائه داده است مقدار GSI را برای آسماری بالایی و پایینی محاسبه کردیم که مقدار بدست آمده از روابط ترزاقی برای آسماری بالایی ۵۳ و برای آسماری پایینی ۴۸ می‌اشد که با مقدار بدست آمده در جدول (۹) مطابقت دارد.

قسمت سایه‌زده در شکل (۷) موقعیت سنگ‌های ساختگاه سد خرسان-۳ را در طبقه‌بندی GSI نمایش می‌دهد. شکل (۸ و ۹) به ترتیب با استفاده از نمودارهای GSI میزان زاویه اصطکاک داخلی و Em را محاسبه و نمایش می‌دهد.

شده است دامنه تغییرات RMR بین ۴۸ تا ۵۴ برآورد می‌شود که با دامنه تغییرات میانگین RMR (از ۴۸ در آسماری پایینی تا ۵۵ در آسماری بالایی) هماهنگی بسیار خوبی دارد. شکل (۶) موقعیت سنگ‌های آهکی سازند آسماری در نمودار Q-System را نشان می‌دهد.

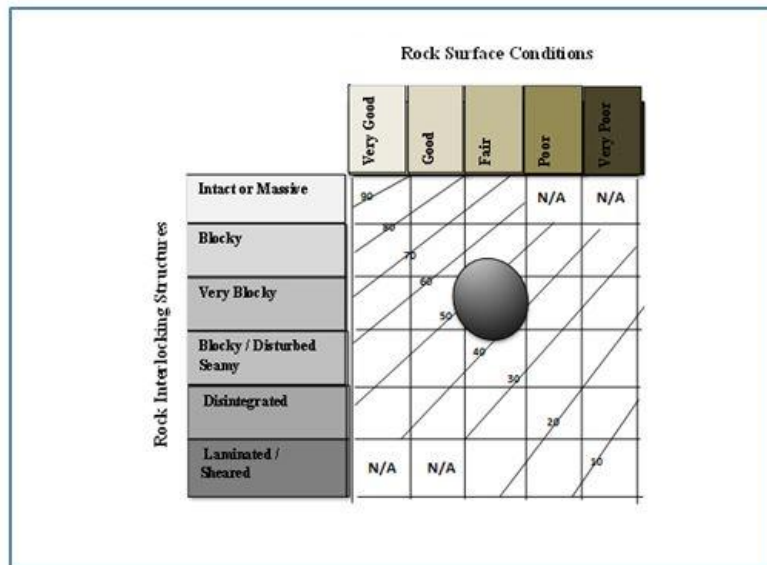
## ۱۲- طبقه‌بندی GSI

در استفاده از این طبقه‌بندی برای تخمین GSI، شاخص کیفیت توده سنگ (RQD)، عدد مربوط به دسته درزه‌ها (J<sub>n</sub>)، عدد مربوط به زبری درزه‌ها (J<sub>r</sub>) و هوازدگی سطح درزه‌ها (J<sub>a</sub>) را باید دقیقاً همانند امتیازات پیشنهاد شده توسط بارتون به دست آورد.

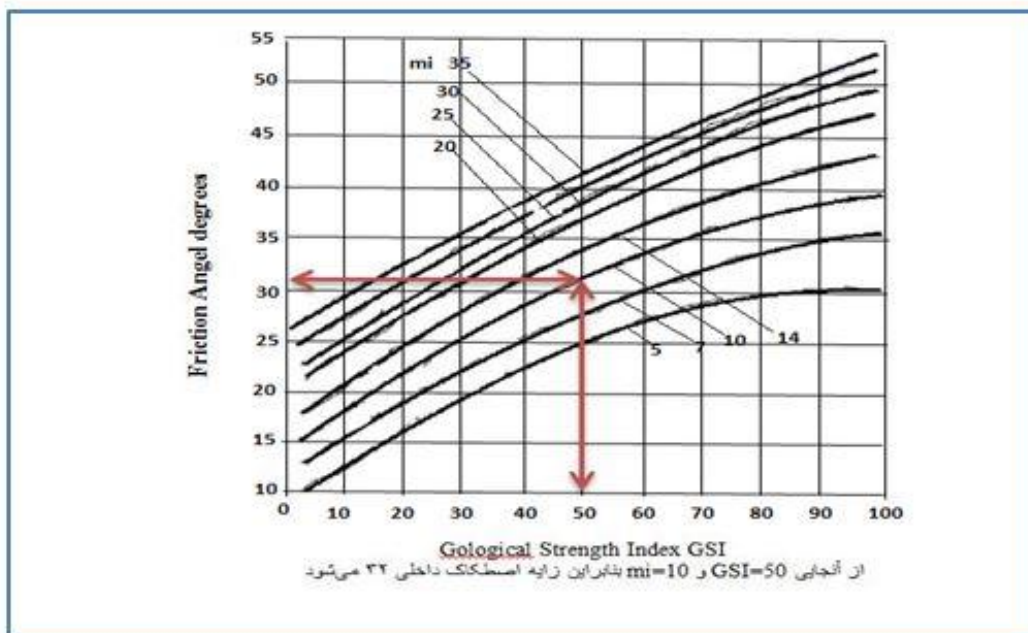
برای ضریب کاهش آب و ضریب کاهش تنش فعال مقدار ۱ استفاده می‌شود که معادل یک توده سنگ خشک تحت‌تأثیر شرایط تنش متوسط می‌باشد. اثر هر دو ضریب آب و تنش بایستی در تجزیه و تحلیل‌های مؤثر در توده سنگ که شکست

جدول (۹): روش امتیازگذاری توده سنگ‌ها در سیستم GSI در واحد آسماری بالایی و پایینی (Hoek E, 2001)

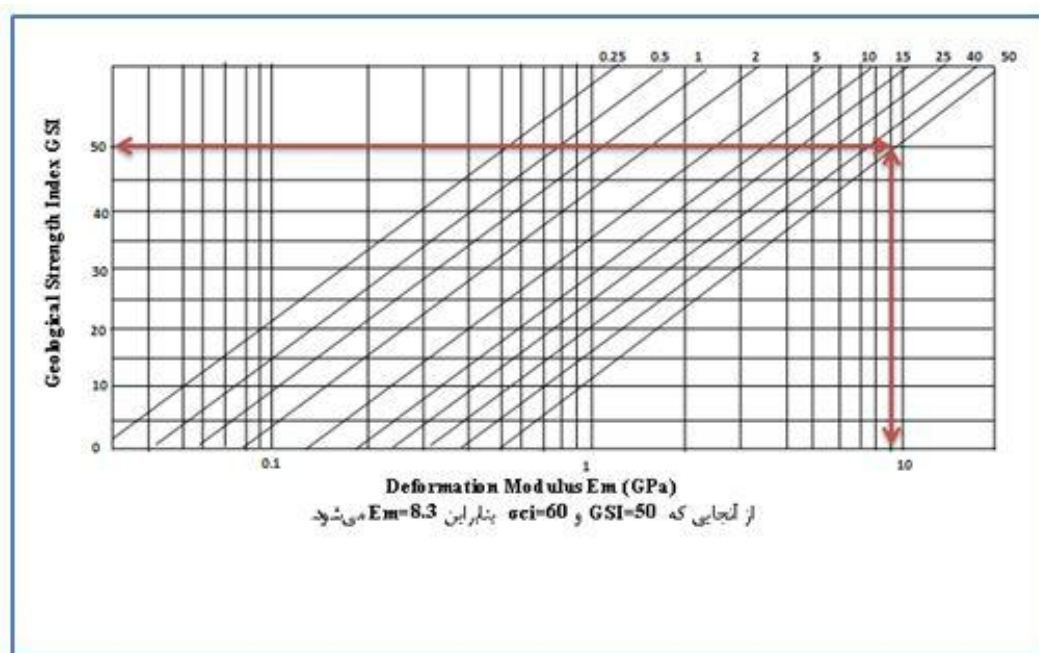
پارامتر	محدوده تغییرات					آسماری بالا	آسماری پایین
	۸ < MPa	۸-۴ MPa	۴-۲ MPa	۲-۱ MPa	< ۱ MPa		
بارگذاری نقطه‌ای							
تراکم تک‌محوری	> ۲۰۰	۱۰۰-۲۰۰	۵۰-۱۰۰	۲۵-۵۰	۱۰- ۳- < ۳	۷	۷
امتیاز	۱۵	۱۲	۷	۴	۲ ۱ ۰		
RQD	۱۰۰-۹۰	۹۰-۷۵	۷۵-۵۰	۵۰-۲۵	۲۵% >	۱۶	۱۲
امتیاز	۲۰	۱۷	۱۳	۸	۳		
فاصله درزه‌ها	۳ m <	۳-۱ m	۰/۱-۳m	۵۰-۳۰۰ mm	< ۵۰ mm	۱۵	۱۴
امتیاز	۳۰	۲۵	۲۰	۱۵	۵		
خصوصیات درزه‌ها	خیلی زبر، بدون بازشدگی، اتصال سخت بین دیواره‌ها	تقریباً زبر، بازشدگی، > ۱ mm، اتصال ضعیف	تقریباً زبر، بازشدگی > ۱ mm، اتصال ضعیف	تقریباً نرم، بازشدگی ۵-۱ mm، درزه‌های متصل	نرم، بازشدگی < ۵ mm، درزه‌های متصل	۱۵	۱۵
امتیاز	۲۵	۲۰	۱۲	۶	۰		
جمع						۵۳	۴۸



شکل (۷): قسمت سایه در نمودار موقعیت سنگ‌های ساختگاه سد خرسان-۳ در طبقه‌بندی GSI را نشان می‌دهد



شکل (۸): نحوه تعیین زاویه اصطکاک داخلی با استفاده از مقدار GSI



شکل (۹): نحوه تعیین مقدار  $E_m$  با استفاده از GSI

### نتیجه‌گیری

می‌کنیم می‌تواند حاصل تغییرات وسیع در میزان و درصد و نوع کانی‌های رسی و نیز تفاوت در واحدهای لیتولوژیکی موجود که چنین دامنه گسترده مقاومتی را توجیه‌پذیر می‌نماید. به نظر اختلاف در قطر نمونه‌ها ( ۲۲۰-۶۱ میلیمتر) و نیز شرایط بارگذاری آزمایش‌های انجام شده به روش بارگذاری دستی و یا بارگذاری با نرخ کنترل شده نیز در این امر تأثیرگذار بوده‌اند و همچنین پتانسیل وجود ریزترک‌ها در نمونه‌های آهکی که رفتار شکننده‌تری نسبت به دیگر نمونه‌های موجود دارند در برخی از موارد منجر به افت نمونه‌ها شده باشد. مقاومت بسیار بالا در تعداد محدودی از نمونه‌های آهکی را می‌توان به درصد بالاتر کرنات کلسیم در این نمونه‌ها نسبت داد که با توجه به قضاوت تجربی در مورد نوع سنگ در هنگام نمونه‌برداری، احتمالاً می‌بایستی به جای گروه آهک مارنی، در گروه آهک قرار می‌گرفتند.

در سه روش طبقه‌بندی به کار گرفته شده RMR، Q- system و GSI توده سنگ به ترتیب در رده‌های متوسط، ضعیف و خوب قرار می‌گیرد. ولی در محاسبات صورت گرفته برای تعیین معیارهای گسیختگی تقریباً هر سه روش نتایج مشابهی را نشان می‌دهند. البته از آنجایی که بیشتر

ساختگاه سد خرسان-۳ بر روی یال شمال غربی تافدیس لکی قرار دارد که محور سد در دره‌ای تنگ متشکل از سنگ‌های آهکی سازند آسماری می‌باشد. شکل دره در محل احداث سد V شکل متقارن و نسبت پهنا به عمق دره  $B/H = 2.16$  بنابراین انتخاب سد بتونی قوسی مضاعف برای محل بهترین گزینه بوده است. این سنگ‌ها چهار دسته درزه اصلی به علاوه سطح لایه‌بندی بوده که دو دسته درزه آنها در جهت آبگذری می‌باشد. با توجه به زاویه شیب تکیه‌گاهها و هندسه فضایی درزه‌ها، امکان ناپایداری دامنه‌ای به صورت لغزش گوه‌ای و ریزش‌های ثقلی وجود دارد.

سازند آسماری در ساختگاه سد به دو بخش آسماری بالایی و آسماری پایینی تقسیم‌بندی شده‌اند که هر کدام واحدهای سنگ‌شناسی کوچکتری را که شامل سنگ آهک، دآهک مارنی و مارن می‌باشد را در بر می‌گیرد. خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی واحدهای سنگی یاد شده متفاوت بوده به نحوی که مقاومت فشاری غیرمحصور سنگ آهک در محدوده ۶۰-۴۰ مگاپاسکال، آهک مارنی ۶۰-۴۰ مگاپاسکال و سنگ‌های مارنی در حدود ۲۵ مگاپاسکال می‌باشد.

اختلاف زیاد بین بیشترین و کمترین مقدار فشار نامحضور سنگ (U.C.S) که تغییرات زیادی را در جدول مشاهده

با توجه به این نتایج مشاهدات نشان می‌دهد که Q توده سنگ را ضعیف‌تر از RMR نشان می‌دهد ولی مدول تغییر شکل الاستیک بالاتری را نشان می‌دهد. لذا از آنجایی که یکی از ضعف‌های طبقه‌بندی RMR در این است که نمی‌تواند توزیع تنش‌ها و تغییر شکل‌های بوجود آمده در حفریات زیرزمینی را پیش‌بینی کند لذا از طبقه‌بندی Q استفاده کردیم، در صورتی که قطر تونل‌های حفاری شده به طور میانگین ۷ یا ۵ متر در نظر گرفته شود میزان پایداری در آسماری بالایی به ترتیب برای این قطرها ۲۰۰ و ۲۵۰ روز و در آسماری پایینی کمتر از ۱۰۰ روز برآورد گردیده است.

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق براساس برداشت‌های صحرائی بوده است بنابراین روش GSI تطابق بیشتری با خصوصیات توده سنگ در منطقه دارد.

براساس نتایج طبقه‌بندی RMR که صورت گرفته نشان داده شده که کیفیت سنگ برای آسماری بالایی و پایینی به ترتیب در حدود ۴۴-۶۶، ۳۷-۵۹ می‌باشد که در کلاس خوب رده‌بندی می‌شود و همچنین نتایج بدست آمده برای طبقه‌بندی Q مقدار کمی آن را بین ۰/۷ تا ۱/۴ محاسبه کرده که سنگ ساختگاه را در رده خیلی ضعیف تا ضعیف قرار داده و با رابطه‌ای که بین RMR و Q توسط بارتون در سال ۱۹۹۵ ارائه گردیده است هماهنگی بسیار خوبی دارد.

### منابع

- سهرابی، س.، قرچلو، س.، کدخدایی، ع.، رحیم پور بناب ح.، منتظری غ.ح.، اسماعیلی ح.د.، (۱۳۹۵) "تعیین خصوصیات مکانیکی و رسوب‌شناسی سنگ مخزن آسماری در یکی از میادین نفتی شمال غرب فروفادگی درفول" پژوهش نفت شماره ۹۰، ۵ - ۱۳۹۵، ص ۱۱۴ تا ص ۱۲۸.
- شرکت مهندسی مشاور آبان‌پژوه، (۱۳۸۸)، گزارش مطالعات تکمیلی سد خرسان-۳.
- فاروق، م.، (۱۳۷۸)، ترجمه، "درآمدی بر مکانیک سنگ" نشر دانشگاهی، ۲۹۶ صفحه.
- قبادی، م. ح.، قربانی صابر، ا.، محسنی ح.، ارومیه‌ای ع.، (۱۳۹۳) "بررسی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سنگ آهک سازند ایلام - سروک در خرم‌آباد" نشریه زمین‌شناسی مهندسی، جلد هشتم، شماره ۴ زمستان ۱۳۹۳، ص ۲۴۶۳ تا ص ۲۴۸۶.
- کارخیران، ا.، میرزینلی، ح.، (۱۳۹۰)، "طبقه‌بندی و تعیین خصوصیات ژئومکانیکی توده سنگ‌های معادن سنگ آهن باغک و دردوی"، هفتمین همایش زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، شاهرود.
- کرمی م.، فرامرزی ل.، باقرپور ر.، رئیسی گهروئی د.، (۱۳۹۳) "بررسی تأثیر عوامل زمین‌شناسی و خصوصیات ژئومکانیک توده سنگ بر انتخاب ماشین
- حفاری تمام مقطع در تونل انتقال آب سبزکوه" نشریه زمین‌شناسی مهندسی، جلد هشتم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۳، ص ۲۱۶۹ تا ۲۱۹۴.
- کریم‌نژاد، م.، (۱۳۹۲) "تعیین مدول یانگ استاتیک سنگ‌ها با استفاده از مدول یانگ دینامیک" هشتمین همایش زمین‌شناسی مهندسی و محیط‌زیست ایران ۱۵ و ۱۶ آبان ۱۳۹۲ دانشگاه فردوسی مشهد.
- گنبدی، م.ب. و ارومیه‌ای، ع. نیکودل، م.ر. و لشکری پور، غ.ر. (۱۳۸۸)، "ارزیابی کارایی رده‌بندی RMR در پیش‌بینی رفتار مهندسی سازند شمشک در حفریات زیرزمینی منطقه سیاه‌بیشه" ششمین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران تربیت مدرس.
- نوری سرتنگی، م.، ارومیه‌ای ع.، زارعی مظفری ک.، (۱۳۹۶)، "ارزیابی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سازند گچساران به منظور نشت آب"، فصلنامه علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی کشور.
- نوری سرتنگی، م. (۱۳۹۰)، "بررسی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سدخرسان-۳ با نگرشی بر انحلال‌پذیری سازند گچساران"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس تهران.

- **Hongkui, G., Yingsong, L., Shanzhou, M. and Song, L.**, (2011) "Difference of Rock Elastic Parameters under Static and Dynamic Loading", Dongying, Shandong 257061, China.
- **Houlsby, A.C.**, (1990), Construction and Design of Cement Grouting: A guide to grouting in rock foundation, John Wiley and Sons, 472 pages.
- **Jaeger, J. C. and Cook, N. G. W.**, (1976). "Fundamentals of Rock Mechanics", (Chapman and Hall, London).
- **Lancaster Jones, P.F.**, (1975), The interpretation of Logeon water-test, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, V.8, Issue 2, p:151-154, London.
- **Palmstrom, A.**, (2008). "Comparing the RMR, Q and RMI classification systems", 10p.
- **Palmstrom, A. and Broch, E.**, (2006). "Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q system", 19p.
- **Priest, S.D.**, 1985, Hemispherical projection methods in rock mechanics, George Allen & Unwin, 124 pages, London.
- Stagg K.g., ZienKiewicz, O. C., (edits), "Rock Mechanics in Engineering Practice", John Wiley and Sons (1979).
- **Uromeihy, A., & Farrokhi, R.**, 2011, Evaluation of water leakage at Kamal-Saleh Dam according to Logeon test result.
- نوری سرتنگی، م.، ارومیه‌ای ع.، زارعی مظفری ک.، افشین‌پور ر.، الف- (۱۳۹۰)، "مطالعه انحلال‌پذیری سازند گچساران در مخزن سد خرسان-۳"، همایش زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- نوری سرتنگی، م.، ارومیه‌ای ع.، زارعی مظفری ک.، افشین‌پور ر.، ب- (۱۳۹۰)، "بررسی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سد خرسان-۳"، همایش زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- نوری سرتنگی، م.، ارومیه‌ای ع.، زارعی مظفری ک.، ج- (۱۳۹۰)، "بررسی نشت سازند گچساران با استفاده از نرم‌افزار Seep/w مطالعه موردی مخزن سد خرسان-۳"، همایش زمین‌شناسی کشور، دانشگاه تربیت معلم.
- **ASTM D3967**, "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01 & 14.02, ASTM, USA (1996).
- **ASTM D2938**, "Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08 & 03.01 & 14.02, ASTM, USA (2002).
- **Aksoy, C.O.**, (2008). "Review of rock mass rating classification Historical, Development, Applications, And Restrictions", Mining science, 13p.
- **Barton, N. Lien, R. Lunde, J.** (1974). "Engineering classification of rock masses for tunnel support". Rock Mechanics 6, 189-243.
- **Farrokh E., Rostami J.**, "Effect of Adverse Geological Condition on TBM Operation in Ghomroud Tunnel Conveyance Project", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 24, No. 4 (2009) 436-446.
- **Hoek E.**, (2001) Rock mass properties for underground mine, Published in Underground Mining methods Colorado.



# Investigation of geomechanical parameters of material and rock mass, asmari Formation (Case study: Khersan dam-3 site)

Mojtaba Nouri Sartangi <sup>\*1</sup>, Gholamreza Lashkaripour <sup>2</sup>, Nasser Hafezi Moqadas <sup>3</sup>,  
Mohammad Ghafouri <sup>4</sup>, Hossein Sadeghi <sup>5</sup>

1- PhD student in Engineering Geology, Ferdowsi University of Mashhad [M.noori281@gmail.com](mailto:M.noori281@gmail.com)

2- Professor, Department of Engineering Geology, Ferdowsi University of Mashhad, [Lashkaripour@um.ac.ir](mailto:Lashkaripour@um.ac.ir)

3- Professor, Department of Engineering Geology, Ferdowsi University of Mashhad, [Nhafezi@um.ac.ir](mailto:Nhafezi@um.ac.ir)

4- Professor, Department of Engineering Geology, Ferdowsi University of Mashhad. [Ghafoori@um.ac.ir](mailto:Ghafoori@um.ac.ir)

5- Assistant Professor, Department of Engineering Geology, Ferdowsi University of Mashhad,  
[Sadeghi@um.ac.ir](mailto:Sadeghi@um.ac.ir)

## Abstract

Estimation of resistance parameters of rock mass is one of the most important engineering problems of rock. The study of geomechanical parameters and, finally, the classification of rock masses in the feasibility phase and the initial design of a project, which has very little comprehensive information on the geotechnical properties of rock masses, the amount of stress and the available hydrological characteristics, The main purpose of using a classification system is to classify the parameters and, using their results, provide the nature of the rock mass and its engineering behavior in different conditions. Since rock mass specifications are in the design of drilling, design of retainers, tilt design and other requirements. On this basis, it was considered necessary to obtain the resistance parameters of Khersan 3 Dam site so that, by analyzing these data, the stability of the tunnel, the geomechanical classification of rock mass using the RMR, QI, GSI method can be calculated and the relationship between rock mass resistivity parameters Compare the modulus of elasticity and deformation from different relationships and compare each other.

## Keywords:

Asmari limestone, Geomechanical classification, Khersan dam 3, RMR, Q, GSI

