بررسی اثر تزریق دوغاب بر مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ با ارزیابی پارامترهای سیستم Q

(بررسی موردی پی‌سنگ سدهای بختیاری، بازفت و خرسان ۲)

عباس ذوالفقاری*، عبدالله سهرابی‌بیدار، محمدرضا ملکی‌جوان، محمد هفتانی؛
دانشگاه تهران

تاریخ: دریافت ۹۱/۱۰/۳ **پذیرش** ۹۲/٤/۱۸

چکیده

امروزه تأثیر عملیات تزریق سیمان معمولاً با نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری تأیید می‌شود که این روش برای نشان دادن میزان تغییرات ایجاد شده در خصوصیات مکانیکی توده‌سنگ کافی نیست. اگرچه محققان مختلف از آزمایش‌های برجا برای ارزیابی بهبود خصوصیات مکانیکی توده‌سنگ استفاده کرده‌اند اما این آزمایش‌ها هزینه‌بر و زمان‌بر و مستلزم مهارت کافی است. تزریق سیمان باعث کاهش نفوذپذیری، بهبود وضعیت درزه‌ها و نهایتاً افزایش امتیاز توده‌سنگ در سیستم‌های رده‌بندی مهندسی سنگ می‌شود. بنا بر این با اندازه‌گیری مقادیر شاخص کیفی توده‌سنگ (Q) در مغزه‌های به‌دست آمده از گمانه‌های تزریق شده، می‌توان میزان کارایی و موفقیت‌آمیز بودن عملیات تزریق در بهبود خصوصیات مکانیکی توده‌سنگ را نشان داد. در این پژوهش برای اولین بار از روش نگاربرداری Q به‌عنوان روشی ساده برای ارزیابی تأثیر تزریق سیمان در بهبود مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ استفاده شد. و نتایج حاصل از نگاربرداری Q در پانل‌های تزریق آزمایشی ساختگاه سدهای بختیاری، بازفت و خرسان ۲ بررسی شده است. مقادیر مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ در شرایط قبل و بعد از تزریق با نگاربرداری Q محاسبه شده است. نتایج محاسبات حاکی از هم‌خوانی خوب بین مقادیر مدول تغییرشکل‌پذیری محاسبه شده از روش نگاربرداری Q و حاصل از آزمایش‌های برجاست. این هم‌خوانی قابلیت و کارایی روش نگاربرداری Q برای ارزیابی تأثیر عملیات

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.5.3]

تزریق و اندازه‌گیری پارامترهای توده‌سنگ را تایید می‌کند. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد که توده‌سنگ‌هایی با کیفیت بدتر، به میزان بیش‌تری نسبت به توده‌سنگ‌هایی با کیفیت بهترتر بهبود یافته است.

واژه‌های کلیدی: تزریق سیمان، نگاربرداری Q، مدول تغییرشکل‌پذیری، سد، کنترل کیفیت.

* **نویسنده مسئول** Zolfaghari.eng@ut.ac.ir

مقدمه

یکی از مهم‌ترین اهداف تزریق تحکیمی در پی سازه‌های عظیم از قبیل سدهای بتنی، افزایش خصوصیات مکانیکی توده‌سنگ است. تزریق سیمان روشی است که به‌وسیلهٔ آن مخلوطی از آب و سیمان و یا تلفیقی از چند ماده مختلف (آمیزه تزریق) با فشار مناسب به داخل خلل و فرج و درزه و شکاف و یا حفره‌های تشکیلات سنگی و خاکی رانده می‌شود تا موجب بهبود مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن‌ها شود. در حقیقت این عمل باعث کاهش نفوذپذیری، افزایش سرعت انتشار امواج لرزه‌ای، مدول تغییرشکل‌پذیری، مقاومت و ظرفیت باربری محیط می‌شود [۲]. تأثیر عملیات تزریق سیمان معمولاً با نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری تأیید می‌شود که این روش برای نشان دادن میزان تغییرات در خصوصیات مکانیکی محیط به‌صورت مقادیر کمی کافی نیست [۲۰]. روش‌های متداول و در دسترس به‌منظور بررسی میزان بهبود ویژگی‌های مکانیکی در اثر تزریق دوغاب شامل آزمایش‌های ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی برجاست [۱۹]. در سال‌های اخیر نیز برای ارزیابی میزان بهبود خصوصیات مکانیکی توده‌سنگ به‌سبب تزریق دوغاب از روش‌های ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی استفاده شده است. کیکوچی[۱] و همکاران [۲۰] با آزمایش‌های ژئوفیزیکی نظیر اندازه‌گیری دامنه امواج الکترومغناطیس و سرعت امواج الاستیک و آزمایش‌های ژئوتکنیکی نظیر آزمایش دیلاتومتری، بهبود کیفیت توده‌سنگ در اثر تزریق دوغاب را بررسی کردند و نشان دادند که در نتیجهٔ تزریق سیمان سرعت انتشار امواج الاستیک و مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ افزایش و تغییرات در دامنه امواج الکترومغناطیس کاهش یافته است. بومیناتن[۲] و گاندی[۳] [۱۲] از آزمایش‌های لرزه‌ای

۱. Kikuchi ۲. Boominathan ۳. Gandhi

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.5.3]

بین گمانه‌ای و بارگذاری صفحه‌ای برای اندازه‌گیری میزان بهبود در خصوصیات توده‌سنگ استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که تزریق سیمان سبب افزایش سرعت امـواج برشی به‌مقدار ٤۳۰ m/sec و کاهش میزان تغییر شکل در آزمایش بارگذاری صفحه‌ای تحت بار ثابت به مقدار ۱/۲mm شده است. یانگ[۱] و لی[۲] [۲۸] برای اندازه‌گیری میزان بهبود در کیفیت توده‌سنگ از نتایج سرعت امواج صوتی استفاده کردند و نشان دادند که در اثر تزریق سیمان سرعت امواج صوت به‌مقدار ۵/۷ درصد افزایش داشته است. کینگ‌یان[۳] و وانگ[٤] [۲٤] از روش مقاومت ویژهٔ چند الکترودی برای ارزیابی تزریق سیمان در ساختگاه سد دی‌یه[۵] استفاده کردند و کارایی این روش برای ارزیابی عملیات تزریق را به اثبات رساندند.

اگرچه محققان مختلف از آزمایش‌های ژئوفیزیکی و ژئوتکنیکی برای ارزیابی بهبود خصوصیات مکانیکی توده‌سنگ استفاده کرده‌اند، اما انجام این آزمایش‌ها پرهزینه و زمان‌بر و مستلزم مهارت کافی است. از همین رو، هدف این مقاله پیشنهاد روشی ساده برای ارزیابی میزان بهبود خصوصیات مکانیکی توده‌سنگ با صرف حداقل هزینه و زمان است. بدین‌منظور به‌بیان نحوهٔ کاربرد روش نگاربرداری Q برای ارزیابی میزان بهبود مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ به‌سبب تزریق دوغاب سیمانی می‌پردازیم و نتایج حاصل از نگاربرداری Q در پانل‌های تزریق آزمایشی ساختگاه سدهای بختیاری، بازفت و خرسان ۲ ارائه شده است.

مشخصات سدهای بررسی شده

پژوهش حاضر در پانل‌های تزریق آزمایشی ساختگاه سدهای بختیاری، بازفت و خرسان ۲ متمرکز شده است. این سدها در جنوب غرب ایران و در حوضهٔ آب‌ریز کارون و دز قرار دارند و از نوع بتنی دوقوسی است که به‌ترتیب با ارتفاع ۳۲۵، ۲۱۱ و ۲٤۰ متر در مرحلهٔ طراحی به‌منظور تولید انرژی برق آبی است. سد بختیاری بر روی سنگ آهک سیلیسی و سنگ آهک مارنی همراه نودول‌های از سنگ آهک سیلیکاته با نوارهای چرت متعلق به واحدهای دوم و سوم سازند سروک ($Sv_۲$، $Sv_۳$) قرار دارد [۵]. سنگ بستر ساختگاه سد بازفت شامل سنگ آهک‌های سازند آسماری و سنگ‌های آهک مارنی سازند جهرم (Ja) است. سازند جهرم جناح راست، بستر رودخانه و بخش پایینی تکیه‌گاه چپ و سازند آسماری (As) بخش میانی و

۱.Yang ۲. Li ۳. Qingyun ٤. Wang ۵. DaYe

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.5.3]

بالایی تکیه‌گاه چپ را تشکیل می‌دهد [۳]. سد خرسان ۲ نیز بر روی سنگ آهک مربوط به سازند آسماری قرار دارد [٤]. خصوصیات سنگ بکر این ساختگاه‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. خصوصیات سنگ بکر ساختگاه سدهای بررسی شده

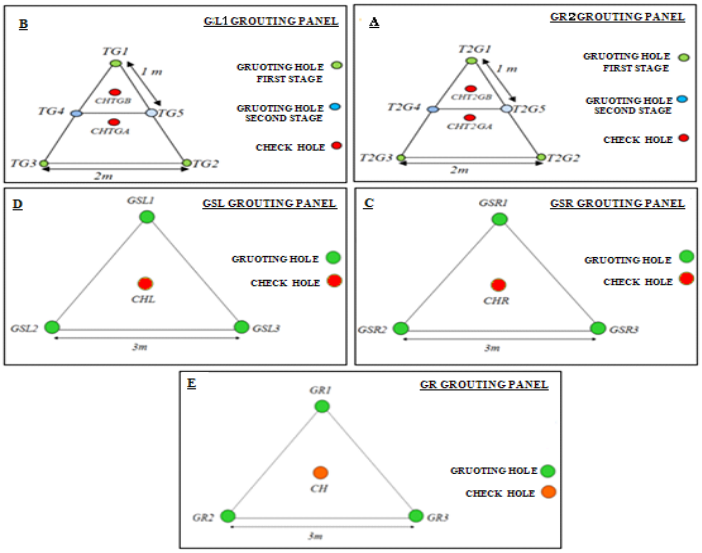
ساختگاه	واحد سنگی	دانسیتهٔ (gr/cm^3)		تخلخل (%)	UCS (MPa)	
		خشک	اشباع		خشک	اشباع
بختیاری [۵]	Sv_3	۲/٦٥	۲/٦٦	۱/٤۲	۱۱۱	۱۰۸
	Sv_2	۲/٦٤	۲/٦٥	۰/۹۸	۱۱٤	۸۸
بازفت [۳]	Ja	۲/٥۹	۲/٦۲	۳/٥٦	٥۷/۷٦	۳۸/٦۲
	AS	۲/٥۳	۲/٥۸	٥	٦۱/۸	۳۸/۳٦
خرسان ۲ [٤]	AS	۲/٥۳	۲/٥۹	۳/۷۸	۱۱۱/۱	۸۸/٥٤

در بررسی‌های ساختگاه سد به‌منظور ارزیابی میزان تزریق‌پذیری توده‌سنگ، پانل‌های تزریق آزمایشی انجام شده است. این پژوهش نتایج حاصل از پانل‌های تزریق آزمایشی ساختگاه سدهای بختیاری (پانل‌های GL۱ و GR۲)، بازفت (پانل‌های GSR و GSL) و خرسان ۲ (پانل GR) را بررسی کرده است. در ساختگاه سد بختیاری در اولین فاز تزریق آزمایشی پانل تزریق مثلثی شکل با اضلاع به طول ۲ متر و با گمانه‌های تزریق در رئوس این مثلث (گمانه‌های TG۱، TG۲ و TG۳ در پانل GL۱ و گمانه‌های T۲G۱، T۲G۲ و T۲G۳ در پانل GR۲) در نظر گرفته شده است. فاز اولیهٔ پانل تزریق با حفر گمانهٔ کنترلی در مرکز مثلث اولیهٔ تزریق (گمانه CH-TG-A در پانل GL۱ و گمانه CH-T۲G-A در پانل GR۲)، کنترل شده است. دومین فاز تزریق آزمایشی (گمانه‌های سری دوم) شامل حفاری و تزریق دو گمانه با فاصله‌های یک متر از گمانه TG۱ و T۲G۱ مشابه روش نیم‌فاصله (گمانه‌های TG٤ و TG٥ در پانل GL۱ و گمانه‌های T۲G٤ و T۲G٥ در پانل GR۲) است. این فاز نیز با گمانهٔ کنترلی حفاری شده در مرکز مثلث کوچک‌تر (گمانه CH-TG-B در پانل GL۱ و گمانه CH-T۲G-B در پانل GR۲) کنترل شده است. گمانه‌های پانل تزریق آزمایشی GL۱ به‌صورت زاویه‌دار و با زاویهٔ انحراف ۱٥ درجه نسبت به قائم و تا عمق ٦۰ متر حفاری شده است. ۱٥ متر بالایی در این گمانه‌ها از سنگ‌های واحد Sv_3 تشکیل شده و در بالای سطح ایستابی قرار دارد. ٤٥ متر باقی‌مانده شامل سنگ‌های واحد Sv_2 است و در زیر

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.5.3]

سطح ایستابی قرار دارد. گمانه‌های پانل تزریق آزمایشی GR۲ در واحد Sv۳ و در بالای سطح ایستابی قرار دارد و به‌صورت قائم و تا عمق ۱۰۰ متر حفاری شده‌اند (شکل ۱ A و B). در ساختگاه سدهای بازفت و خرسان ۲ نیز برای عملیات تزریق آزمایشی پانل تزریق مثلثی شکل با اضلاع به طول ۳ متر و با گمانه‌های تزریق با عمق ۸۰ متر و با زاویهٔ قائم در رئوس این مثلث (گمانه‌های GSL۱، GSL۲ و GSL۳ در پانل تزریق GSL و گمانه‌های GSR۱، GSR۲ و GSR۳ در پانل تزریق GSR و گمانه‌های GR۱، GR۲ و GR۳ در پانل تزریق GR) در نظر گرفته شده است. در ساختگاه سد بازفت، گمانه‌های پانل تزریق GSL در سازند جهرم و گمانه‌های پانل تزریق GSR در سازند آسماری حفاری شده‌اند. گمانه‌های پانل تزریق GR در ساختگاه سد خرسان ۲ از سنگ‌های سازند آسماری عبور کرده است. پانل‌های تزریق آزمایشی این دو ساختگاه در بالای سطح ایستابی و در حالت خشک هستند. کارایی این پانل‌ها با حفر گمانه کنترلی در مرکز مثلث تزریق (گمانه CHL در پانل GSL و گمانه CHR در پانل GSR و گمانه CH در پانل GR)، کنترل شده است. در این پژوهش اولین گمانهٔ پانل تزریق به‌عنوان گمانه قبل از تزریق توده‌سنگ و گمانهٔ کنترلی به‌عنوان گمانهٔ بعد از تزریق توده‌سنگ مد نظر هستند (شکل ۱ C، D، E).



شکل ۱. آرایش گمانه‌ها در پانل‌های تزریق آزمایشی ساختگاه سدهای بختیاری، بازفت و خرسان ۲

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.5.3]

نگاربرداری Q

بارتون[۱] و همکارانش در سال ۱۹۷٤ میلادی سیستم رده‌بندی Q را به‌منظور انتخاب ترکیب مناسبی از شاتکریت و میل مهاری برای به‌سازی توده‌سنگ ارائه کردند که مقدار آن طبق این رابطه محاسبه می‌شود:

$$Q = \frac{RQD}{Jn} \times \frac{Jr}{Ja} \times \frac{Jw}{SRF} \quad (۱)$$

به‌طوری‌که RQD درصدی از مغزه‌های سالم با طول بیش‌تر از ۱۰ سانتی‌متر در ناحیهٔ بررسی شده، Jn امتیاز دسته درزه‌ها در همان ناحیه، Jr امتیاز زبری دسته درزه، Ja امتیاز میزان دگرسانی یا پرشدگی رسی دسته درزه، Jw امتیاز جریان آب و اثرات فشار آب که ممکن است باعث شستشوی پرشدگی ناپیوستگی‌ها شود و SRF امتیاز نسبت مقاومت به تنش در سنگ یک‌پارچه، تورم یا لهیدگی را شامل می‌شوند [۸].

در سال ۲۰۰۲ شاخص کیفی اصلاح شده (Qc) با هدف هم‌بستگی بیش‌تر بین Q و پارامترهای مهندسی معرفی گردید [۷].

$$Q = \frac{RQD}{Jn} \times \frac{Jr}{Ja} \times \frac{Jw}{SRF} \times \frac{\sigma c}{۱۰۰} \quad (۲)$$

مقاومت تراکم تک‌محوره سنگ بکر (σc) هم‌بستگی خوبی با مدول الاستیک و تخلخل دارد و این دو پارامتر به‌طور مستقیم روی سرعت انتشار امواج لرزه‌ای اثرگذار هستند. این مسئله منجر به هم‌بستگی بیش‌تر Qc با پارامترهای مهندسی نظیر سرعت انتشار امواج و مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ می‌شود.

روش نگاربرداری Q که برای تعیین کیفیت توده‌سنگ در طول گمانه طراحی شده بیش‌تر در زمینهٔ تخمین خصوصیات مکانیکی و مقاومتی توده‌سنگ به‌منظور انتخاب ترکیب مناسب نگه‌دارنده‌ها کاربرد داشته است [۷]، [۱۰]. در این پژوهش تلاش شده تا با استفاده از این روش به اندازه‌گیری میزان بهبود مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ به‌سبب تزریق دوغاب پرداخته شود. در روش نگاربرداری Q با استفاده از جدول‌ها نشان داده شده در شکل ۲ به بررسی مغزه‌های حاصل از حفاری پرداخته می‌شود. در این شکل برای هر پارامتر جدولی در نظر گرفته شده است که ستون‌های آن دارای امتیازی مشخص و نشان‌گر رده‌های مختلف است.

۱. Barton

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.5.3]

هر ردیف از این جدول‌ها، فراوانی به‌دست آمده از بررسی یک جعبهٔ نمونه‌گیری شده را نشان می‌دهد. به‌طوری‌که در ردیف اول، نتیجهٔ بررسی اولین جعبه و در ردیف دوم نتیجهٔ بررسی دومین جعبه و به‌همین ترتیب تا آخرین جعبه ادامه می‌یابد. طبیعی است که تعداد سطرهای این جداول وابسته به‌طول گمانه حفاری شده خواهد بود. بعد از تکمیل جداول اشاره شده، فراوانی‌های هر ستون با هم جمع و فراوانی هر رده برای کل گمانه به‌دست می‌آید. در صورت تغییرات شدید شرایط زمین‌شناسی نظیر لیتولوژی، می‌توان نگاربرداری Q را به‌تفکیک شرایط مورد نظر به انجام رساند.

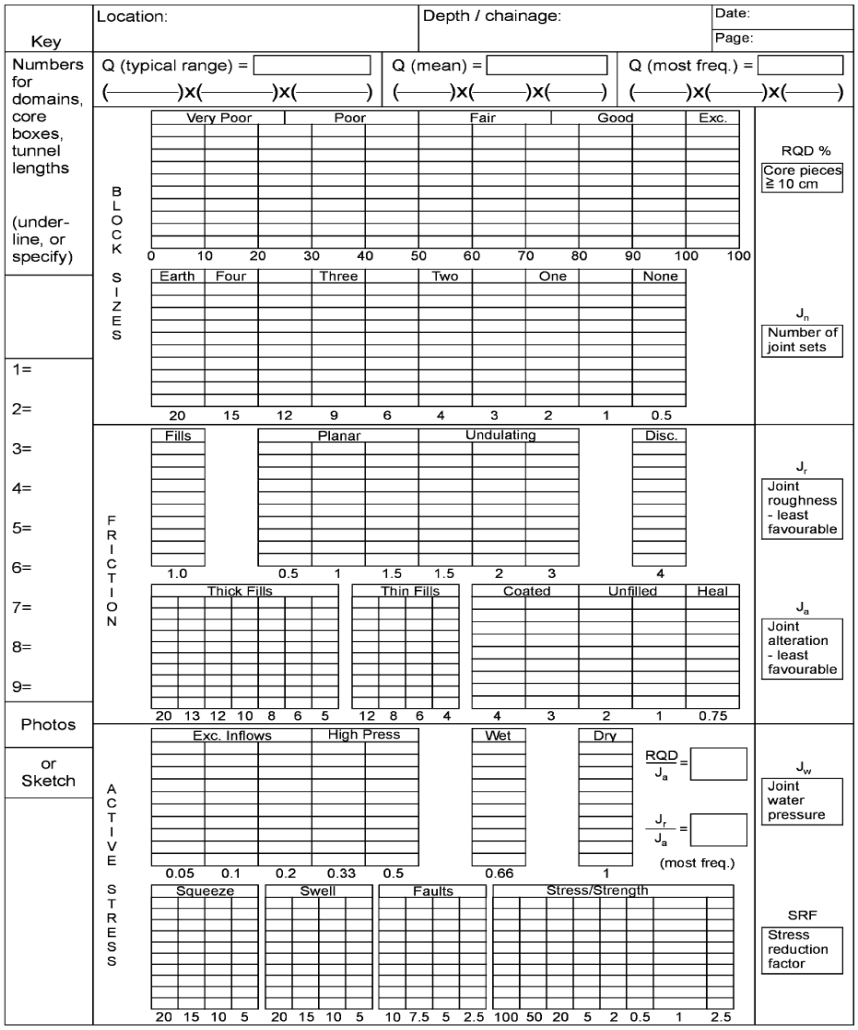
در بررسی مغزه‌ها، برای تعیین امتیاز پارامترهای RQD، Ja، Jr، SRF، Jn و Jw از جدول‌های رده‌بندی Q استفاده می‌شود. چهار پارامتر اول به‌روش مرسوم اندازه‌گیری می‌شوند. برای اندازه‌گیری Jn توجه به زاویهٔ انحراف سطح درزه‌ها اهمیت دارد. تعداد دسته درزه در مغزه‌های یک جعبه با اندازه‌گیری زاویهٔ انحراف سطح درزه نسبت به محور گمانه تعیین می‌شود. به‌طوری‌که درزه‌های با زاویهٔ انحراف یک‌سان، یک دسته درزه را تشکیل می‌دهند [۱۳]. اندازه‌گیری پارامتر Jw بر اساس نتایج حفاری دارای دشواری بیش‌تری است. وضعیت آب زیرزمینی در سیستم رده‌بندی Q براساس مشاهده کیفی جریان و یا فشار تقریبی آب تعیین می‌شود. در بسیاری از ساختگاه‌ها و به‌خصوص پیش از شروع عملیات ساخت، امکان مشاهدهٔ کیفی توده‌سنگ وجود ندارد. عموماً در بررسی‌های شناسایی ساختگاه ابنیهٔ فنی مهندسی از گمانه‌های حفاری شده در توده‌سنگ استفاده می‌شود، این در حالی است که برای برآورد پارامتر Jw بر اساس نتایج حفاری گمانه‌ها، روش تدوین شده‌ای وجود ندارد. در این پژوهش برای برآورد امتیاز پارامتر وضعیت آب زیرزمینی (Jw) در مغزه‌های حاصل از حفاری مقاطعی که در زیر سطح ایستابی قرار دارند (مقاطع مربوط به گمانه‌های پانل تزریق GL1 در سد بختیاری) از نتایج آزمایش‌های فشار آب (لوژان) انجام شده در مقطع حفاری مورد نظر استفاده شده است [۱]. به‌طوری‌که ابتدا بر اساس مقدار عدد لوژان مربوط به هر مقطع و روش ارائه شدهٔ هیور[۱] [۱۷]، مقدار آب ورودی به تونلی فرضی به‌طول ۱۰ متر تخمین زده شده و سپس شرایط آب زیرزمینی در آن مقطع را طبق جدول پیشنهادی RMR تعیین کرده و در

۱. Heuer.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.5.3]

نهایت معادل این وضعیت را در جدول Q انتخاب و مقدار Jw تعیین شده است. تمامی مقاطعی که در بالای سطح ایستابی قرار دارند در شرایط خشک بوده‌اند و دارای امتیاز Jw برابر با ۱ هستند (مقاطع مربوط به گمانه‌های پانل تزریق آزمایشی GR۲ در سد بختیاری و گمانه‌های پانل تزریق آزمایشی GSR و GSL در سد بازفت و گمانه‌های پانل تزریق آزمایشی GL در سد خرسان ۲).

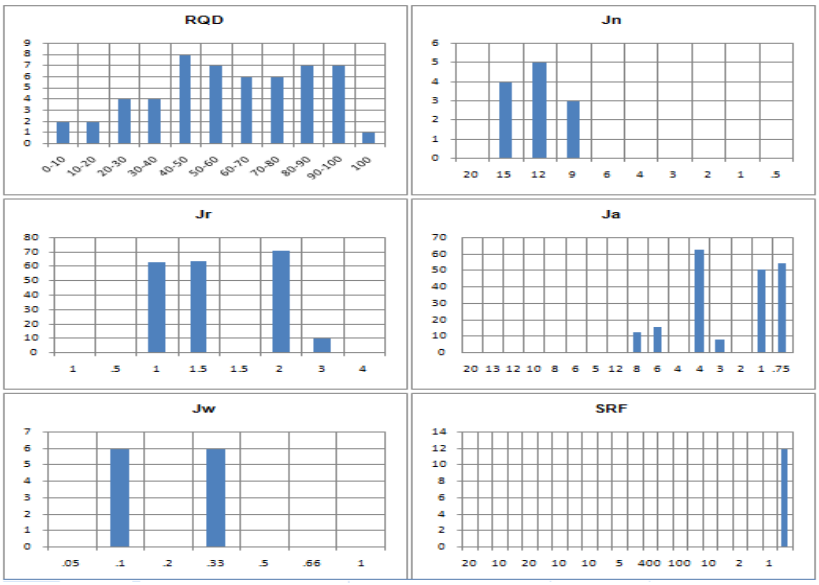


شکل۲. جداول نگاربرداری Q برای ثبت آماری پارامترهای Q برداشت شده از مغزه‌های حفاری [۷]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.5.3]

پس از بررسی مغزه‌های سنگی و ثبت اطلاعات برداشت شده در نمودار داده‌ها، فراوانی هر پارامتر به‌صورت هیستوگرام‌های فراوانی نمایش داده می‌شود؛ برای مثال شکل ۳ هیستوگرام فراوانی پارامترهای سیستم رده‌بندی Q برای گمانهٔ TG1 در پانل تزریق آزمایشی GL۱ در سد بختیاری را نشان می‌دهد. بر اساس هیستوگرام‌های به‌دست آمده می‌توان شاخص‌های کیفی حداکثر[۱]، حداقل[۲]، میانگین[۳] و بیش‌ترین فراوانی[٤] را محاسبه کرد. شاخص کیفی حداقل و حداکثر به‌ترتیب با قراردادن امتیاز مربوط به رده‌های با کم‌ترین و بیش‌ترین امتیاز در رابطهٔ ۱ به‌دست می‌آید. شاخص کیفی میانگین که بیان‌گر میانگین وزنی شاخص کیفی در کل گمانه است، بر اساس میانگین وزنی امتیازهای هر پارامتر به‌دست می‌آید. شاخص کیفی با بیش‌ترین فراوانی بر اساس امتیاز مربوط به رده دارای بیش‌ترین فراوانی در هر پارامتر محاسبه می‌شود.



شکل ۳. هیستوگرام فراوانی حاصل از نگاربرداری Q برای گمانهٔ TG1 در سد بختیاری

۱. Q-max ۲. Q-min ۳. Q-mean ٤. Q-most frequency

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.5.3]

بررسی بهبود پارامترهای سیستم رده‌بندی Q

در این بخش میزان بهبود هر یک از پارامترهای سیستم رده‌بندی Q در پانل‌های تزریق آزمایشی ساختگاه سدهای بختیاری، بازفت و خرسان۲ ارائه می‌شود. نتایج این بررسی‌ها به صورت نمودارهایی است که محور افقی آن‌ها نام گمانه‌های تزریقی به‌ترتیب حفاری و تزریق و محور عمودی آن میانگین وزنی امتیاز هر پارامتر است. قبل از پرداختن به این موضوع لازم است به این مسئله توجه شود که جهت نمایش داده‌های به‌دست آمده از ساختگاه این سه سد و جلوگیری از تکرار مطالب در نمودار مربوط به هر پارامتر، نام پانل تزریق آزمایشی و گمانه‌های تزریق ساختگاه هر سد به اختصار در زیر نمودار ذکر شده است. در جدول ۲ نام سد و پانل تزریق آزمایشی مربوط به آن همراه با علامت اختصاری آن بیان شده است

جدول ۲. علائم اختصاری مربوط پانل‌های تزریق آزمایشی در ساختگاه سدهای بررسی شده

پانل تزریق آزمایشی در گالری GL۱ سد بختیاری (در واحد Sv_3)	BKH-GL۱(Sv_3)
پانل تزریق آزمایشی در گالری GL۱ سد بختیاری (در واحد Sv_2)	BKH-GL۱(Sv_2)
پانل تزریق آزمایشی در گالری GR۲ سد بختیاری	BKH-GL۲(Sv_3)
پانل تزریق آزمایشی در تکیه‌گاه چپ سد بازفت	BZ-GSL
پانل تزریق آزمایشی در تکیه‌گاه راست سد بازفت	BZ-GSR
پانل تزریق آزمایشی سد خرسان ۲	KH۲-GR

میزان بهبود RQD

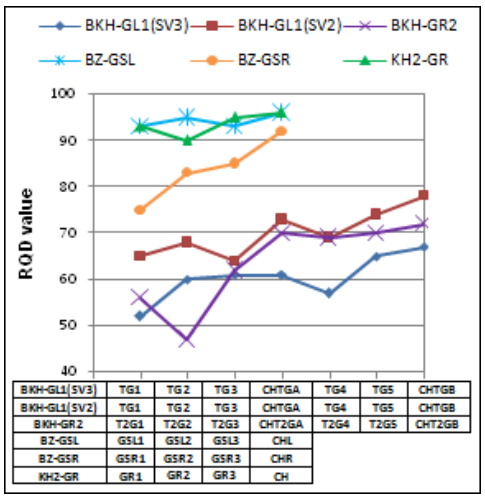
دیر[۱] و همکاران [۱٤] شاخص کیفی سنگ (RQD) را به‌صورت نسبت مجموع طول قطعات سالم با طول بیش از ۱۰ سانتی‌متر به طول کل حفاری معرفی کردند. در واقع RQD میزان خردشدگی سنگ را اندازه می‌گیرد. تعیین RQD حین بررسی مغزه‌های سنگی به آسانی انجام می‌شود از این‌رو این پارامتر در سیستم‌های رده‌بندی توده‌سنگ اعم از RMR و Q استفاده شده است. تزریق دوغاب در توده‌سنگ باعث نفوذ سیمان در درزه و شکاف‌ها و اتصال قطعات سنگی به یک‌دیگر و در نهایت سبب یک‌پارچگی توده‌سنگ و افزایش مقدار RQD می‌شود. نتایج به‌دست آمده از نگاربرداری Q در پانل‌های تزریق آزمایشی نیز مؤید این مطلب است. شکل ٤ چگونگی افزایش میانگین وزنی RQD در پانل‌های تزریق آزمایشی

۱. Deere

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.5.3]

ساختگاه سدهای بختیاری، بازفت و خرسان۲ را نشان می‌دهد. چنان‌که ملاحظه می‌شود در اثر تزریق سیمان مقدار RQD از گمانهٔ اولیه به گمانه کنترلی افزایش یافته است.



شکل ٤. بهبود RQD به‌سبب تزریق دوغاب سیمانی

جدول ۳ مقدار تغییرات و یا افزایش RQD مغزه‌های سنگی هر گمانه را نسبت به گمانهٔ اولیه تزریق نشان می‌دهد. چنان‌که در این جدول مشاهده می‌شود روند کلی از اولین گمانه به آخرین گمانه کنترلی روند رو به افزایشی است که نشان‌دهندهٔ بهبود RQD به‌سبب تزریق دوغاب سیمان است. اما با نگاهی دقیق‌تر به جدول تفاوت‌هایی در مقدار اعداد و حتی حضور اعداد منفی مشاهده می‌شود. دو ستون اول که دارای اعداد منفی هستند مربوط به گمانه‌های دوم و سوم پانل تزریق آزمایشی است که توده‌سنگ اطراف این دو گمانه تحت تأثیر دوغاب سیمانی قرار نگرفته است. برای مثال، در پانل تزریق آزمایشی تکیه‌گاه سمت راست سد بختیاری (BKH-GR۲) توده‌سنگ اطراف دومین گمانه تزریق تحت تأثیر دوغاب نفوذ کرده در اولین گمانه تزریق قرار نگرفته و بهبود نداشته است. از طرفی دیگر به‌دلیل این‌که توده‌سنگ اطراف این گمانه به‌طور طبیعی ضعیف‌تر از توده‌سنگ اطراف اولین گمانهٔ تزریق است در نتیجه عدد مربوط به این گمانه منفی شده است. در مورد وجود سایر اعداد منفی نیز این‌گونه است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.5.3]

اگرچه در تمامی گمانه‌ها مقدار RQD طی روند تزریق از گمانهٔ اولیه به گمانه‌های کنترلی افزایش داشته اما این مقدار بهبود در پانل‌های مختلف متفاوت بوده است به‌طوری‌که توده‌سنگ‌های با مقدار RQD اولیهٔ کم‌تر، میزان بهبود بیش‌تری را نشان می‌دهند. برای مثال در پانل‌های تزریق BZ-GSL و KH۲-GR مقدار اولیهٔ RQD برابر ۹۳ درصد است که در اثر تزریق تنها به‌میزان ۳ درصد افزایش داشته و در گمانه‌های کنترلی به مقدار ۹٦ درصد رسیده است. در صورتی‌که در پانل‌های تزریق BKH-GL۱(Sv۲)، BKH-GL۱(Sv۲) ، BKH-GR۲ مقدار اولیه RQD به‌ترتیب ۵۲، ٦۵ و ۵٦ درصد است که در نتیجه تزریق این مقدار در گمانه‌های کنترلی به ٦۷، ۷۸ و ۷۲ افزایش یافته و میزان رشدی به‌ترتیب برابر ۱۵، ۱۳ و ۱٦ درصد را نشان می‌دهند.

جدول ۳. میزان بهبود RQD مغزه‌های سنگی هر گمانه نسبت به اولین گمانه تزریق

	$RQD^{*}_{۲}$-$RQD_{۱}$	$RQD_{۳}$-$RQD_{۱}$	RQD_{CHA}-$RQD_{۱}$	$RQD_{۴}$-$RQD_{۱}$	$RQD_{۵}$-$RQD_{۱}$	RQD_{CHB}-$RQD_{۱}$
BKH-GL۱(Sv۲)	۸	۹	۹	۵	۱۳	۱۵
BKH-GL۱(Sv۲)	۳	-۱	۸	٤	۹	۱۳
BKH-GR۲	-۹	٦	۱٤	۱۳	۱٤	۱٦
BZ-GSL	۲	۰	۳	-	-	-
BZ-GSR	۸	۱۰	۱۷	-	-	-
KH۲-GR	-۳	۲	۳	-	-	-

*در این سری از جدول‌ها عدد زیر نویس هر پارامتر، بیان‌گر شماره گمانه به‌ترتیب حفاری و تزریق است.

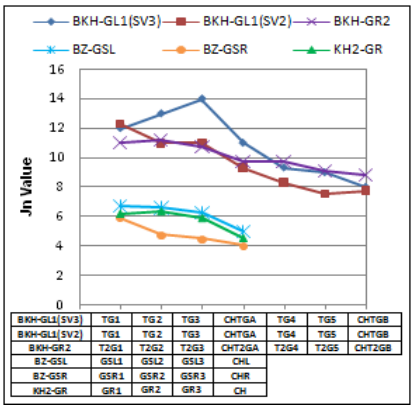
میزان بهبود Jn

توده‌سنگ متشکل از مواد سنگی همراه با درزه و شکاف است. به گروهی از درزه‌های موازی یا نیمه موازی اصطلاحاً دسته درزه گفته می‌شود که در هنگام بررسی مغزه‌های سنگی با اندازه‌گیری زاویهٔ انحراف سطح درزه نسبت به محور گمانه تعیین می‌شود. به‌طوری‌که درزه‌های با زاویهٔ انحراف یک‌سان، یک دسته درزه را تشکیل می‌دهند. در این پژوهش برای اطمینان از صحیح بودن Jn برآورد شده، بعد از اندازه‌گیری زاویهٔ انحراف سطح درزه نسبت به محور گمانه، این زاویه با زاویهٔ دسته درزه‌های اندازه‌گیری شده با بررسی رخنمون‌ها مطابقت داده شده است. در سیستم رده‌بندی Q با افزایش تعداد دسته درزه امتیاز Jn افزایش یافته که با

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.5.3]

توجه به قرار گرفتن این مؤلفه در مخرج رابطهٔ Q (رابطه ۱)، امتیاز توده‌سنگ کاهش می‌یابد. دسته درزه‌هایی که بازشدگی بیش‌تری دارند بیش‌تر تحت تأثیر عوامل هوازدگی قرار گرفته‌اند که این امر به مرور زمان سبب فرسایش دیواره درزه‌ها و افزایش بازشدگی می‌شود. در زمان تزریق سیمان، دوغاب سیمانی ابتدا درزه‌هایی با بازشدگی بیش‌تر را پر کرده و سپس به درون درزه‌های با بازشدگی کم تر نفوذ می‌کند [۱۵]. بنا بر این تزریق سیمان باعث پر شدن درزه‌های نامطلوب (با بازشدگی بیش‌تر) و در نتیجه کاهش تعداد دسته درزه در توده‌سنگ می‌شود. در شکل ۵ چگونگی تغییرات امتیاز تعداد دسته درزه در پانل‌های تزریق نشان داده شده است.



شکل ۵. بهبود Jn به سبب تزریق دوغاب سیمانی

در این شکل در اثر نفوذ سیمان و پر شدن تعدادی از دسته درزهای نامطلوب‌تر، میانگین وزنی Jn از گمانهٔ اولیه به گمانه‌های کنترلی کاهش یافته که مقدار این کاهش در جدول ٤ ارائه شده است. با توجه به جدول این نتیجه به‌دست می‌آید که Jn در پانل‌های با تعداد دسته درزهٔ بیش‌تر (BKH-GL۱(Sv۲)، BKH-GL۱(Sv۳)، BKH-GR۲ به‌مقدار بیش‌تری نسبت به پانل‌های با تعداد دسته درزهٔ کم‌تر (BKH-GR۲, BZ-GSR, BZ-GSL) بهبود یافته است.

میزان بهبود Jr

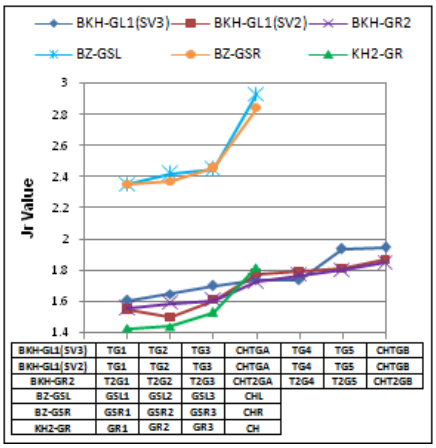
ناهمواری یا زبری معرف درجهٔ ناصافی یا تموج ذاتی سطح ناپیوستگی است. افزایش زبری سطح درزه باعث کاهش هدایت هیدرولیکی توده‌سنگ می‌شود. از این‌رو در هنگام

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.5.3]

تزریق سیمان، نفوذ دوغاب سیمانی به درون درزه‌هایی با زبری ضعیف‌تر راحت‌تر از درزه‌هایی با زبری قوی‌تر است. بنا بر این طی عملیات تزریق به‌دلیل نفوذ دوغاب سیمانی به درون درزه‌هایی با زبری ضعیف‌تر، فراوانی این درزه‌ها نسبت به درزه‌هایی با زبری قوی‌تر کاهش یافته و در نتیجه میانگین وزنی Jr توده‌سنگ بهبود می‌یابد؛ این موضوع به خوبی در شکل ٦ دیده می‌شود.

جدول ٤. میزان بهبود Jn مغزه‌های سنگی هر گمانه نسبت به اولین گمانه تزریق

	Jn_{CHB}- Jn۱	Jn٥–Jn۱	Jn٤–Jn۱	Jn_{CHA}- Jn۱	Jn۳–Jn۱	Jn۲–Jn۱
BKH-GL۱(Sv۳)	–٤	–۳	–۲/٦۷	–۱	۲	۱
BKH-GL۱(Sv۲)	–٤/٥٦	–٤/۷۸	–٤	–۳	–۱/۳۳	–۱/۳۳
BKH-GR۲	–۲/۲٥	–۱/۹٥	–۱/۳٥	–۱/۳٥	–۰/۳	۰/۱٥
BZ-GSL	–	–	–	–۱/۷۸	–۰/٤۳	–۰/۱٤
BZ-GSR	–	–	–	–۱/۸۲	–۱/٤۲	–۱/۱٤
KH۲-GR	–	–	–	–۱/٦۹	–۰/۳۱	۰/۱٥



شکل ٦. بهبود Jr به‌سبب تزریق دوغاب سیمانی

در این شکل اگرچه میانگین وزنی زبری توده‌سنگ در اثر تزریق دوغاب سیمانی در پانل‌های تزریق آزمایشی افزایش یافته است اما این میزان افزایش در پانل‌های مختلف یک‌سان نیست، به‌طوری‌که پانل‌های تزریق BZ-GSL و BZ-GSR نسبت به‌دیگر پانل‌ها مقدار بهبود بیش‌تری را نشان می‌دهند. مقادیر بهبود Jr در گمانه‌های پانل‌های تزریق در جدول ٥ آورده شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.5.3]

جدول ۵. میزان بهبود در Jr مغزه‌های سنگی هر گمانه نسبت به اولین گمانهٔ تزریق

	Jn۲–Jn۱	Jn۳–Jn۱	Jn $_{CHA}$- Jn۱	Jn٤–Jn۱	Jn٥–Jn۱	Jn $_{CHB}$- Jn۱
BKH-GL۱(Sv۲)	۰/۰٤	۰/۰۹	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۳۳	۰/۳٤
BKH-GL۱(Sv۲)	–۰/۰٥	۰/۰٦	۰/۲۳	۰/۲٤	۰/۲٦	۰/۳۲
BKH-GR۲	۰/۰۳	۰/۰٥	۰/۱۷	۰/۲۱	۰/۲٤	۰/۲۹
BZ-GSL	۰/۰۷	۰/۱	۰/٥۸	–	–	–
BZ-GSR	۰/۰۲	۰/۱۱	۰/٤۹	–	–	–
KH۲-GR	۰/۰۱	۰/۱	۰/۳۹	–	–	–

در پانل‌های BZ-GSL و BZ-GSR توده‌سنگ قبل از تزریق (گمانه‌های GSL1 و GSR1) دارای درزه‌هایی با زبری بهتر در کنار درزه‌هایی با زبری ضعیف‌تر است. در اثر تزریق سیمان و پرشدن درزه‌های ضعیف‌تر، نسبت فراوانی درزه‌های با زبری بهتر افزایش یافته و در مجموع میانگین وزنی Jr توده‌سنگ بهبود یافته است. در سایر پانل‌های تزریق اگرچه تزریق سیمان باعث پرشدن درزه‌های با زبری ضعیف‌تر می‌شود، اما از آن‌جاکه در این پانل‌ها اکثر درزه‌ها زبری ضعیفی دارند، درزه‌های باقی‌مانده هم‌چنان دارای زبری ضعیف هستند و یا تنها به مقدار اندکی نسبت به درزه‌های پر شده زبری بهتری دارند، این مسئله سبب بهبود کم‌تر میانگین وزنی Jr نسبت به پانل‌های BZ-GSL و BZ-GSR شده است. بنا بر این می‌توان گفت که حضور درزه‌های با زبری بهتر در کنار درزه‌های با زبری ضعیف‌تر می‌تواند منجر به بهبود بیش‌تر زبری توده‌سنگ در مقایسه با توده‌سنگی شود که اکثر درزه‌های تشکیل‌دهندهٔ آن زبری ضعیفی دارند.

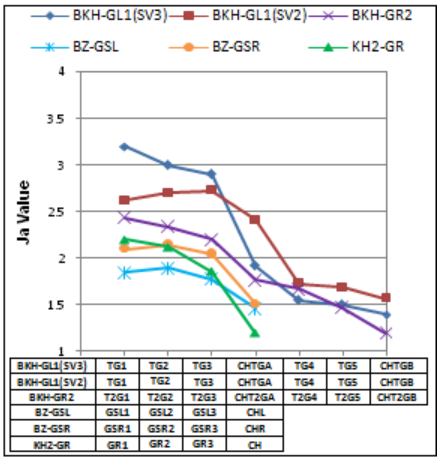
میزان بهبود Ja

پرشدگی ناپیوستگی‌ها می‌تواند نقش مؤثری در ویژگی‌های سنگ از جمله مقاومت برشی، تغییرشکل‌پذیری و نفوذپذیری آن داشته باشد. حضور مواد سست درون درزه‌ها کیفیت توده‌سنگ را کاهش می‌دهد. حذف این مواد و جای‌گزین کردن آن‌ها با سیمان یکی از اهداف تزریق است. از این‌رو به‌منظور خروج مواد سست درون درزه‌ها، مقطع مورد نظر قبل از شروع عملیات تزریق با آب شسته شده و سپس درزه‌های شسته شده با سیمان پر می‌شوند. نفوذ و

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.5.3]

جای‌گزینی سیمان باعث کاهش فراوانی درزه‌هایی با پرشدگی نامطلوب و هم‌چنین افزایش فراوانی درزه‌هایی با پرشدگی مقاوم‌تر می‌شود. این دو عمل نهایتاً موجب کاهش امتیاز Ja و بهبود وضعیت پرشدگی درزه‌های توده‌سنگ می‌شود. چنان‌که در شکل ۷ دیده می‌شود امتیاز Ja در گمانه‌های کنترلی به‌طور چشم‌گیری کاهش یافته است.

مقدار بهبود Ja در هر گمانه نسبت به گمانهٔ اولیه در جدول ٦ آورده شده است. با توجه به این جدول و مقایسهٔ آن با جدول ۵ مشاهده می‌شود که در پانل‌های BKH-GR۲ BKH-GL1(Sv۲), BKH-GL1(Sv۲), با وجود این‌که امتیاز Jr توده‌سنگ به مقدار کم‌تری نسبت به دیگر پانل‌ها بهبود یافته، اما امتیاز Ja در این پانل نسبت به سایر پانل‌ها به نسبت بیش‌تری بهبود یافته است.



شکل ۷. بهبود Ja به‌سبب تزریق دوغاب سیمانی

جدول ٦. میزان بهبود Ja مغزه‌های سنگی هر گمانه نسبت به اولین گمانهٔ تزریق

	Jn۲–Jn۱	Jn۳–Jn۱	Jn $_{CHA}$- Jn۱	Jn٤–Jn۱	Jn۵–Jn۱	Jn $_{CHB}$- Jn۱
BKH-GL۱(Sv۲)	−۰/۲	−۰/۳	−۱/۲۸	−۱/٦۵	−۱/۷	−۱/۸
BKH-GL۱(Sv۲)	۰/۰۸	۰/۱۱	−۰/۲۱	−۰/۸۹	−۰/۹۳	−۱/۰۷
BKH-GR۲	−۰/۱	−۰/۲٤	−۰/٦۷	−۰/۷۷	−۰/۹۷	−۱/۲٤
BZ-GSL	۰/۰۵	−۰/۰۷	−۰/۳۹	–	–	–
BZ-GSR	۰/۰۵	−۰/۰۵	−۰/۵۹	–	–	–
KH۲-GR	−۰/۰۸	−۰/۳٤	−۱	–	–	–

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.5.3]

تزریق دوغاب علاوه بر پر کردن درزه‌های با پرشدگی سست‌تر و کاهش فراوانی درزه‌های نامطلوب، سبب نفوذ سیمان به درون درزه‌ها و بهبود وضعیت پرشدگی درزه‌ها و افزایش فراوانی درزه‌های با پرشدگی مقاوم‌تر می‌شود. بنا بر این حتی اگر توده‌سنگ اولیه درزه‌هایی داشته باشد که غالباً از مواد سست پر شده باشد (پانل‌های ($Sv_۲$) BKH-GL۱، BKH-G۲ و ($Sv_۳$)BKH-GL۱) در طی عملیات تزریق و با کاهش فاصله بین گمانه‌های تزریق، امتیاز Ja به‌مقدار بیش‌تری بهبود می‌یابد. این در حالی است که تزریق سیمان سبب افزایش زبری سطح درزه نمی‌شود، بلکه تنها باعث کاهش فراوانی درزه‌های با زبری کم‌تر می‌گردد. بنا بر این چنان‌چه به‌طور کلی توده‌سنگ اولیه دارای درزه‌هایی با زبری پایین باشد (پانل‌های ($Sv_۲$) BKH-GL۱، BKH-G۲ و ($Sv_۳$)BKH-GL۱) تزریق دوغاب سیمان سبب پرشدن درزه‌های نرمتر شده و تنها فراوانی این دسته از درزه‌ها کاهش می‌یابد.

میزان بهبود Jw

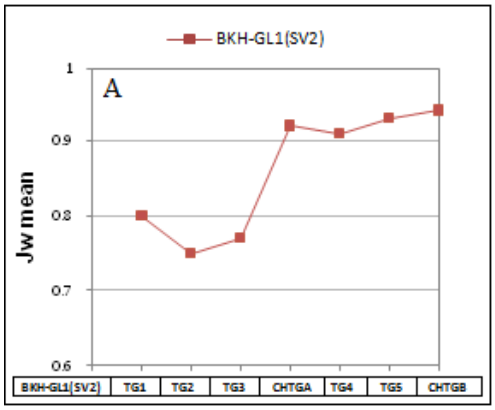
پارامتر Jw امتیاز مربوط به جریان و اثرات فشار آب است که ممکن است باعث شستشوی مواد پرکننده ناپیوستگی‌ها گردد. در این پژوهش برای برآورد امتیاز پارامتر وضعیت آب زیرزمینی (Jw) در مغزه‌های حاصل از حفاری مقاطعی که زیر سطح ایستابی قرار دارند (مقاطع مربوط به گمانه‌های پانل تزریق GL۱ در سد بختیاری)، از نتایج آزمایش‌های فشار آب (لوژان) انجام شده در مقطع حفاری مورد نظر در داخل گمانه استفاده شده است [۱].

گمانه‌های پانل‌های تزریق آزمایشی ساختگاه سدهای بازفت، خرسان۲، تکیه‌گاه راست سد بختیاری و هم‌چنین بخش $Sv_۳$ گمانه‌های پانل تزریق تکیه‌گاه چپ ساختگاه سد بختیاری ((۳ Sv)BKH-GL۱) در بالای سطح ایستابی قرار دارند و امتیاز Jw مغزه سنگ‌های مربوط به این گمانه‌ها برابر یک است که بعد از تزریق دوغاب سیمان نیز برابر یک باقی می‌ماند و به‌همین دلیل در شکل ۸ نشان داده نشده‌اند. اما بخش $Sv_۲$ گمانه‌های پانل تزریق آزمایشی تکیه‌گاه چپ سد بختیاری در زیر سطح ایستابی قرار دارد که برای تعیین امتیاز Jw این بخش از گمانه‌ها از روش پیشنهادی (انطباق مقدار آب ورودی به تونلی فرضی به‌طول ۱۰ متر با جدول پیشنهادی RMR و معادل‌سازی آن در سیستم Q) استفاده شده است [۱]. شکل ۸

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.5.3]

روند بهبود پارامتر Jw طی عملیات تزریق آزمایشی در بخش Sv_2 گمانه‌های پانل تزریق آزمایشی تکیه‌گاه چپ سد بختیاری را نشان می‌دهد.



شکل ۸. بهبود Jw به سبب تزریق دوغاب سیمانی در بخش Sv_2 گمانه‌های پانل تزریق آزمایشی تکیه‌گاه چپ سد بختیاری

میزان بهبود SRF

فاکتور کاهش تنش SRF امتیاز مربوط به وضعیت گسل‌خوردگی، نسبت مقاومت به تنش در توده‌سنگ‌های متراکم و وضعیت تورم یا لهیدگی سنگ است. به‌نظر بارتون تزریق دوغاب تأثیر چندانی بر مقدار SRF نخواهد داشت [٦]. بر همین اساس در این پژوهش مقدار SRF توده‌سنگ در تمامی گمانه‌های مربوط به هر پانل تزریق ثابت در نظر گرفته شده است. امتیاز SRF هر یک از پانل‌های تزریق آزمایشی ساختگاه سدهای بررسی شده با استفاده از جدول‌های ارائه شده در سیستم رده‌بندی Q تعیین و در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷. مقادیر SRF در پانل‌های تزریق آزمایشی ساختگاه سدهای بررسی شده

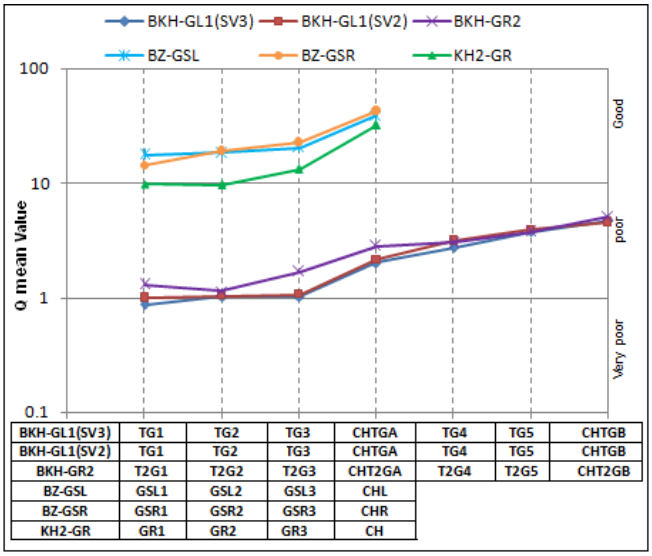
پانل تزریق آزمایشی	BKH GL۱($Sv_۳$)	BKH GL۱($Sv_۲$)	BKH GR۲($Sv_۲$)	BZ GSL	BZ GSR	KH۲ GR
SRF	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۱	۱	۱

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.5.3]

بررسی بهبود Q و پارامتر تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ

در بخش‌های قبل نشان داده شد که تزریق سیمان با پر کردن نامطلوب‌ترین دسته درزه‌ها سبب بهبود پارامترهای RQD، Jn، Jr، Ja و Jw می‌شود. بدیهی است که با بهبود این پارامترها کیفیت توده‌سنگ و مقدار Q نیز افزایش یابد؛ شکل ۹ روند افزایش Q در گمانه‌های پانل‌های تزریق ساختگاه سدهای بررسی شده را نشان می‌دهد.



BKH-GL1(SV3)	TG1	TG2	TG3	CHTGA	TG4	TG5	CHTGB
BKH-GL1(SV2)	TG1	TG2	TG3	CHTGA	TG4	TG5	CHTGB
BKH-GR2	T2G1	T2G2	T2G3	CHT2GA	T2G4	T2G5	CHT2GB
BZ-GSL	GSL1	GSL2	GSL3	CHL			
BZ-GSR	GSR1	GSR2	GSR3	CHR			
KH2-GR	GR1	GR2	GR3	CH			

شکل ۹. بهبود Q به سبب تزریق دوغاب سیمانی

میزان بهبود Q مغزه‌های آخرین گمانه کنترلی هر پانل تزریق برحسب ضریب بهبود (R_I) بدین‌صورت تعریف شده که نتایج آن در جدول ۸ آورده شده است:

$$R_I = Log\left(\frac{Q_f}{Q_.}\right)\times ۱۰۰ \qquad (۳)$$

Q_f = شاخص کیفی مغزه‌های آخرین گمانهٔ کنترلی

$Q_.$ = شاخص کیفی مغزه‌های اولین گمانه پانل تزریق آزمایشی

با توجه به این جدول ملاحظه می‌شود که توده‌سنگ‌های با کیفیت پایین‌تر (BKH-GR۲ , BKH-GL۱(Sv۲) , BKH-GL1(Sv۲)) در اثر تزریق به مقدار بیش‌تری نسبت به توده‌سنگ‌هایی با کیفیت بالاتر (BZ-GSL, BZ-GSR, KH2-GR) بهبود یافته‌اند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.5.3]

جدول ۸. ضریب بهبود Q بعد از تزریق نسبت به توده‌سنگ قبل از تزریق

پانل تزریق آزمایشی	R_I
BKH-GL۱(Sv۲)	۷۳
BKH-GL۱(Sv۲)	٦٦
BKH-GR۲	٥٩
BZ-GSL	٣٤
BZ-GSR	٤٨
KH۲-GR	٥١

مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ (E.mass) یکی از مهم‌ترین پارامترهای ورودی در آنالیز رفتار توده‌سنگ است. استفاده از آزمایش‌های برجا برای اندازه‌گیری مستقیم این پارامتر مستلزم صرف هزینه و زمان است و در برخی موارد نیز نتایج این آزمایش‌ها سؤال‌برانگیز است. در نتیجه محققان مختلف، براساس سیستم‌های رده‌بندی توده‌سنگ، روابط تجربی را برای تخمین مقدار مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ پیشنهاد کرده‌اند. برخی روابط تجربی بین سیستم‌های رده‌بندی توده‌سنگ و مدول تغییرشکل‌پذیری در جدول ۹ آورده شده است.

رابطهٔ معرفی شده بارتون ($E.mass=۲٥\log_{۱۰}Q$)، تنها برای سنگ‌های سخت ($\sigma c=۱۰۰MPa$) و با کیفیت $Q>۱$ کارایی دارد. از این‌رو برای گسترش کاربرد Q در تخمین مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ در سنگ‌های با سختی‌های مختلف، بارتون در سال ۲۰۰۲ این رابطه معرفی کرد [۷]:

$$E.mass = ۱۰Qc^{۱/۳} \qquad (٤)$$

جدول ۹. روابط تجربی موجود بین رده‌بندی توده‌سنگ و E.mass

محقق	رابطه	توضیحات
Bieniawski[۱۱]	E.mass = ۲RMR -۱۰۰	For RMR > ٥۰
Serafim and Pereira [۲٥]	E.mass = ۱۰(RMR -۱۰) / ٤۰	For RMR < ٥۰
Barton et al [۸]	E.mass=۲٥log۱۰Q	For Q > ۱
Palmstrom[۲۲]	E.mass=٥/٦RMi-۰/۳۷٥	For RMi > ۰/۱
Hoek and Brown [۱۸]	$E.mass = \sqrt{\frac{\sigma c}{۱۰۰}} \times ۱۰(GSI - ۱۰) / ٤۰$	For σc < ۱۰۰ MPa
Sonmez et al[۲۷]	E.mass = Ei(s.a)۰/٤ ،Ei=٥۰GPa ،s= exp((GSI-۱۰۰)/۹)	GSI = RMR ،(-۲۰/۳)) - (exp(-/۱٥)exp a=۱/۲+۱/٦GSI

E.mass: مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ (GPa) Ei stat: مدول الاستیک استاتیک سنگ بکر(GPa)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.5.3]

به نظر هادسون[۱] و هریسون[۲] [۱۶] شکستگی‌ها مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ است؛ و توده‌سنگ‌هایی با شکستگی‌های دهانه باز و نزدیک به یک‌دیگر، مدول تغییرشکل‌پذیری کم‌تری را نشان می‌دهند. احداث سازه بر روی چنین توده‌سنگ‌هایی ممکن است به‌دلیل بروز نشست در پی منجر به خسارات جبران‌ناپذیر شود. از این‌رو این توده‌سنگ‌ها مستلزم به‌سازی برای افزایش مقاومت و ظرفیت باربری پی هستند. یکی از اهداف تزریق دوغاب سیمانی بهبود خصوصیات مقاومتی و تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ و یک‌پارچه کردن پیکره سنگ است. در این بخش با استفاده از روش نگاربرداری Q به‌عنوان روشی ارزان و آسان‌تر نسبت به آزمایش‌های ژئوتکنیکی برجا، میزان کارایی عملیات تزریق آزمایشی و هم‌چنین بهبود مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ تعیین شده است.

در بخش‌های قبل نشان داده شد که تزریق دوغاب با پر کردن نامطوب‌ترین دسته درزه‌ها سبب افزایش کیفیت توده‌سنگ و درنتیجه Qc می‌شود. شاخص کیفی اصلاح شدهٔ توده‌سنگ (Q_C) با مقدار مدول تغییرشکل‌پذیری (E.mass) رابطه‌ای مستقیم دارد و با افزایش Qc، E.mass نیز افزایش می‌یابد. بر این اساس در این بخش پس از محاسبهٔ Qc برای مغزه‌های سنگی گمانه‌های پانل تزریق، مقادیر E.mass محاسبه شده است.

مدول تغییر شکل‌پذیری به‌دست آمده از آزمایش‌های ژئوتکنیکی برجا برای توده‌سنگ قبل از تزریق در ساختگاه‌های بررسی شده در جدول ۱۰ آورده شده است. در این ساختگاه‌ها با توجه به این‌که مغزه‌های سنگی به‌دست آمده از اولین گمانهٔ پانل‌های تزریق تحت تأثیر دوغاب سیمانی قرار نگرفته‌اند، از همین رو، Qc حاصل از این مغزه‌ها به‌عنوان Qc توده‌سنگ قبل از تزریق پنداشته شده و E.mass تخمین زده شده برای این مغزه‌ها با E.mass به‌دست آمده از آزمایش‌های ژئوتکنیکی برجا مطابقت داده شده که نتایج آن در جدول ۱۰ آورده شده است. مقادیر این جدول نشان‌دهندهٔ انطباق نزدیک مدول تغییرشکل‌پذیری محاسبه شده با آزمایش‌های ژئوتکنیکی برجا و روش نگاربرداری Q برای توده‌سنگ قبل از تزریق و در نتیجه کارایی روش نگاربرداری Q در محاسبه مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ است. چنان‌که در این جدول مشاهده می‌شود، E.mass به‌دست آمده از روش‌های ژئوتکنیکی برجا در ساختگاه سد

۱. Hudson ۲. Harrison

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.5.3]

بختیاری با E.mass محاسبه شده با Qc_{min} مطابقت بیش‌تری دارد. به‌همین دلیل در این ساختگاه برای تخمین میزان بهبود مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ از E.mass تعیین شده توسط Qc_{min} استفاده شده است. حال آن‌که در پانل‌های تزریق ساختگاه سدهای بازفت و خرسان ۲، مقدار E.mass به‌دست آمده از روش‌های ژئوتکنیکی برجا با E.mass محاسبه شده توسط Qc_{mean} مطابقت بیش‌تری داشته و در این ساختگاه‌ها از E.mass محاسبه شده توسط Qc_{mean} برای تخمین میزان بهبود در مدول تغییر شکل‌پذیری استفاده شده است. روند رو به افزایش مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ طی عملیات تزریق در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

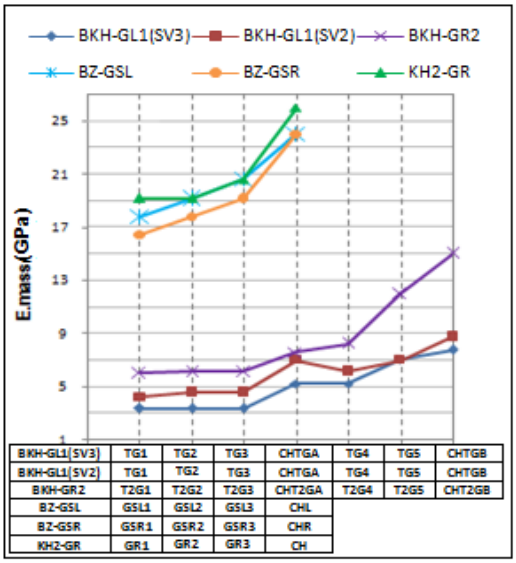
مدول تغییرشکل‌پذیری به‌دست آمده از بررسی مغزه‌های گمانه‌های مرحلهٔ اول تزریق (گمانه‌های ۱، ۲ و۳ در شکل۱) به‌دلیل شعاع نفوذ کم و فاصلهٔ زیاد بین این گمانه‌ها افزایش چشم‌گیری نداشته و بیان‌گر مدول تغییرپذیری توده‌سنگ در شرایط قبل از تزریق است. البته بهبود اندکی که در گمانه‌های پانل تزریق آزمایشی سدهای بازفت و خرسان ۲ دیده می‌شود به‌دلیل نفوذ دوغاب سیمان نبوده، بلکه به‌دلیل خصوصیات اولیهٔ توده‌سنگ است.

جدول۱۰. تطابق بین E.mass به‌دست آمده از آزمایش‌های ژئوتکنیکی برجا و نگاربرداری Q

ساختگاه	E.mass به‌دست آمده از آزمایش‌های برجا(GPa)	E.mass تخمین زده با روش نگاربرداری Q برای اولین گمانه تزریق (GPa)		
		(max)	(mean)	(min)
سد بختیاری، زون کینک‌باند-تکیه‌گاه چپ(Sv_3) [٥].	۳	۹/۸۸	۷/۳	۳/٤
سد بختیاری، زون کینک‌باند-تکیه‌گاه چپ(Sv_2) [٥].	٥	١٤	١١/٥	٤/٢
سد بختیاری، زون کینک‌باند-تکیه‌گاه راست(Sv_3) [٥].	٥/٥	١٦/٤	١٢	٦/١
سد بازفت، تکیه‌گاه راست [٣].	١٥/٣٥	١٨/٥	١٦/٤	١١
سد بازفت، تکیه‌گاه چپ [٣].	١٥/٨٧	٢٢	١٧/٨	١٣
سد خرسان ۲، تکیه‌گاه راست [٤].	٢٠	٢٤	١٩/٢	١٣

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.5.3]



شکل ۱۰. بهبود مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ (E.mass) به سبب تزریق دوغاب سیمانی

کیفیت عملیات تزریق در مرحلهٔ اول، با استفاده از حفاری اولین گمانهٔ کنترلی بررسی شده است. گمانهٔ کنترلی به‌دلیل این‌که فاصلهٔ کم‌تری با گمانه‌های تزریق مرحلهٔ اول دارد (شکل۱) توده‌سنگ محدوده آن تحت تأثیر دوغاب سیمانی قرار گرفته و مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ آن به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته است. مغزه‌های گمانه ٤ نیز نشان‌گر افزایش کیفیت و مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ است. البته باید توجه داشت که در گمانه کنترلی عملیات تزریق انجام نشده است و توده‌سنگ اطراف گمانهٔ چهارم تنها تحت تأثیر عملیات تزریق در گمانه‌های مرحلهٔ اول تزریق قرار گرفته (شکل۱) و دارای وضعیتی تقریباً مشابه توده‌سنگ اطراف گمانهٔ کنترلی است و به‌همین دلیل مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ اطراف این گمانه با نسبتی تقریباً مشابه با توده‌سنگ اطراف گمانهٔ کنترلی افزایش یافته است. توده‌سنگ اطراف گمانه ۵ تحت تأثیر دوغاب تزریق شده در گمانه‌های یک، سه و چهار قرار گرفته است (شکل۱). به‌همین دلیل مدول تغییر شکل‌پذیری به‌دست آمده از بررسی مغزه‌های حاصل از حفاری این گمانه نسبت به مدول تغییر شکل‌پذیری به‌دست آمده از بررسی مغزه‌های حاصل از حفاری اولین گمانه کنترلی و چهارمین گمانه افزایش بیش‌تری را نشان می‌دهد. نهایتاً آخرین گمانهٔ کنترلی در وسط مثلث ۱، ٤ و ۵ حفاری شده است (شکل۱).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.5.3]

توده‌سنگ اطراف این گمانه به‌دلیل فاصلهٔ نزدیک با گمانه‌های تزریق ۱، ٤ و ۵ به مقدار زیادی تحت تأثیر دوغاب تزریق شده در این گمانه‌ها بوده است و به‌همین‌دلیل مدول تغییرشکل‌پذیری آن نسبت به سایر گمانه‌ها بهبود بیش‌تری داشته است.

پس از حفاری آخرین گمانه کنترلی، با بررسی مغزه‌های به‌دست آمده از این گمانه‌ها مقادیر مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ پس از تزریق سیمان به‌روش نگاربرداری Q محاسبه شده است (جدول ۱۱). میزان بهبود این پارامتر برای مغزه سنگ‌های به‌دست آمده از آخرین گمانهٔ کنترلی نسبت به اولین گمانه پانل‌های تزریق آزمایشی در جدول ۱۱ آورده شده است. با توجه به این جدول مشاهده می‌شود که توده‌سنگ‌های با کیفیت پایین‌تر به‌میزان بیش‌تری بهبود پیدا کرده‌اند.

جدول ۱۱. میزان بهبود مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ بعد از تزریق (مغزه‌های سنگی آخرین گمانهٔ کنترلی) نسبت به توده‌سنگ قبل از تزریق (اولین گمانهٔ تزریق)

پانل تزریق آزمایشی	E.mass تخمین زده به‌روش نگاربرداری Q برای اولین گمانهٔ تزریق (GPa)	E.mass تخمین زده با روش نگاربرداری Q برای آخرین گمانهٔ کنترلی (GPa)	میزان E.mass بهبود (٪)
BKH-GL1(Sv_3)	۳/٤	۷/۷۵	۱۲۸
BKH-GL1(Sv_2)	٤/۲	۸/۸	۱۱۰
BKH-GR2	٦/۱	۱۵	۱٤٦
BZ-GSL	۱٦/٤	۲٤	٤٦
BZ-GSR	۱۷/۸	۲٤	۳۵
KH2-GR	۱۹/۲	۲٦	۳۵

بعد از اتمام عملیات تزریق آزمایشی، به‌منظور کنترل عمل‌کرد تزریق و هم‌چنین تعیین میزان بهبود مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ در پانل تزریق آزمایشی تکیه‌گاه چپ ساختگاه سد بختیاری (GL1) علاوه بر آزمایش فشار آب، اقدام به آزمایش دیلاتومتری در سه عمق مختلف گمانهٔ کنترلی CHTGB شده که نتایج آن همراه با نتایج حاصل از روش نگاربرداری Q در جدول ۱۲ آورده شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.5.3]

جدول ۱۲. نتایج آزمایش دیلاتومتری و نگاربرداری Q در گمانه CHTGB

توضیح	گمانه	مکان	عمق (m)	واحد چینه-	E.mass (GPa)	اختلاف E.mass محاسبه شده از روش نگاربرداری Q با مقدار به‌دست آمده از آزمایش برجا [٪]
نتایج آزمایش دیلاتومتری [۵].	CHTGB	GL1 Gallery	۳/۹	Sv_3	۷	
			۱۳	Sv_3	۷	
			۲۵/۷	Sv_2	۱۰	
نتایج نگاربرداری Q	CHTGB	GL1 Gallery	۰ -۱۵	Sv_3	۷/۷۵	۱۰/۷۱
			-۶۰	Sv_2	۸/۸	۱۲

چنان‌که در این جدول ملاحظه می‌شود بین مدول تغییرشکل‌پذیری به‌دست آمده از هر دو روش هم‌خوانی چشم‌گیری وجود دارد، چنان‌که اختلاف بین E.mass به‌دست آمده از آزمایش دیلاتومتری و محاسبه شده از روش نگاربرداری Q در واحد چینه‌شناسی Sv_3 برابر ۱۰/۷۱ درصد و در واحد چینه‌شناسی Sv_2 برابر ۱۲ درصد است. در سایر ساختگاه‌ها بنا به دلایل مذکور (هزینه و زمان) از انجام آزمایش‌های برجا برای کنترل کارایی تزریق آزمایشی خودداری شده است (در این ساختگاه‌ها کنترل عملیات تزریق تنها با آزمایش فشار آب صورت گرفته است)، از همین رو امکان مقایسه بین E.mass به‌دست آمده به‌روش نگاربرداری Q با E.mass حاصل از آزمایش‌های برجا وجود ندارد.

نتیجه‌گیری

عموماً کنترل عملیات تزریق با آزمایش فشار آب انجام می‌شود که برای بررسی میزان بهبود در خصوصیات مکانیکی توده‌سنگ کافی نیست. اگرچه آزمایش‌های ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی اطلاعاتی راجع به بهبود خصوصیات مکانیکی توده‌سنگ ارائه می‌کند، ولی این روش‌ها بسیار گران و زمان‌بر هستند. هدف این پژوهش معرفی روش نگاربرداری Q به‌عنوان روشی ارزان، آسان و کارا برای برآورد میزان بهبود خصوصیات مکانیکی توده‌سنگ به‌سبب تزریق دوغاب سیمانی است که در اکثر ساختگاه‌های تحت بررسی به سادگی قابل انجام و محاسبه است. در این پژوهش نتایج حاصل از نگاربرداری Q بیانگر افزایش امتیاز پارامترهای

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.5.3]

سیستم رده‌بندی Q و هم‌چنین افزایش مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ به‌سبب تزریق دوغاب سیمانی است. تزریق سیمان با پر کردن درزه‌های نامطلوب‌تر سبب افزایش Q و در نتیجه Qc و E.mass می‌شود. با مقایسه بین مقادیر بهبود مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ، این نتیجه به‌دست می‌آید که مدول تغییرشکل‌پذیری در توده‌سنگ‌های با کیفیت ضعیف‌تر (BKH-GL۱(Sv ۳), BKH-GL۱(Sv۲), BKH-GR۲ در مقایسه با توده‌سنگ‌های با کیفیت بیش‌تر (BZ-GSL,BZ-GSR, KH-GR)، به‌میزان بیش‌تری بهبود یافته است. به‌منظور کنترل عمل‌کرد تزریق در پانل تزریق آزمایشی تکیه‌گاه چپ ساختگاه سد بختیاری (GL1) اقدام به انجام آزمایش دیلاتومتری در گمانهٔ کنترلی CHTGB شده است. نتایج اندازه‌گیری‌ها در این گمانهٔ کنترلی بیان‌گر هم‌خوانی نزدیک (اختلاف کم‌تر از ۱۲ درصد) بین مقادیر مدول تغییرشکل‌پذیری حاصل از روش دیلاتومتری و روش نگاربرداری Q است. چنان‌که E.mass به‌دست آمده از آزمایش دیلاتومتری و روش نگاربرداری Q برای واحد چینه‌شناسی Sv_3 به‌ترتیب برابر ۷ و ۷/۷۵ گیگاپاسکال و برای واحد Sv_2 به‌ترتیب برابر ۱۰ و ۸/۸ گیگاپاسکال است. این امر مؤید کارایی روش نگاربرداری Q برای ارزیابی عمل‌کرد تزریق سیمان در بهبود خصوصیات مکانیکی توده‌سنگ است.

تشکر و قدردانی

از شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، کارفرمای محترم سدهای بختیاری، بازفت و خرسان ۲، و مشاوران آن‌ها، شرکت‌های سد تونل پارس (اشتوکی پارس سابق)، قدس نیرو و مهندسین مشاور مهاب قدس به‌دلیل همکاری مفیدشان صمیمانه تقدیر و تشکر می‌شود.

منابع

۱. ذوالفقاری ع.، سهرابی‌بیدار ع.، ملکی‌جوان م.ر.، هفتانی م.، *تعیین امتیاز جریان آب (Jw) در سیستم طبقه‌بندی Q با استفاده از نتایج آزمایش‌های لوژان (مطالعه موردی در سد بختیاری)*، اولین کنفراس

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.5.3]

بین المللی و سومین کنفراس ملی سد و نیروگاه‌های برق آبی، شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران (۱۳۹۰).

۲. مجدی ع.، مبانی *کاربرد تزریق در سنگ‌های درزه‌دار در تونل‌ها*، وزارت راه و ترابری، پژوهشکده حمل و نقل(۱۳۸۸).

۳. مهندسین مشاور قدس نیرو، *گزارش زمین‌شناسی مهندسی و مکانیک سنگ سد بازفت*، ۲۸۲ (۱۳۹۰).

٤. مهندسین مشاور مهاب قدس، *گزارش زمین‌شناسی مهندسی و مکانیک سنگ سد خرسان دو*، ۱٦۹ (۱۳۸۸).

5. Bakhtiary Joint Venture Consultants (BJVC), "Engineering geology and rock mechanics report", (Stage II studies). Tehran: Iran Water and Power Resources Development Co (IWPC) Authority (2008).
6. Barton N., "Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy", London: Taylor & Francis (2006).
7. Barton N., "Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design", Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 39 (2002) 185-216.
8. Barton N., Lien R., Lunde J., "Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support", Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 6 (1974) 189-236.
9. Barton N., Loset F., Lien R., Lunde J., "Application of the Q-system in design decisions concerning dimensions and appropriate support for underground installations", Int. Conf Subsurface Space, Rock store, Stockholm, Sub-surface Space (1980) 553-610.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.5.3]

10. Barton N., Pandey S. K., "Numerical modeling of two stopping methods in two Indian mines using degradation of c and mobilization of φ based on Q-parameters", Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 48 (2011) 1095-1112.
11. Bieniawski Z. T., "Determining rock mass deformability: experience from case histories", Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. Geomech Abstr., Vol. 15 (1978) 237-47.
12. Boominathan A., Gandhi S. R., "Improvement of rock strata for foundation of reactor buildings", Report submitted to Nuclear Power Corporation Ltd. (NPCL), Mumbai, IIT Madars (2006).
13. Cameron I. S., Budavari S., "Correlation of rock mass classification parameters obtained from borecole and in-situ observation", Engineering Geology, Vol. 17 (1981) 19-53.
14. Deere D. U., Hendron A. J., Patton F. D., Cording E. J., "Design of surface and near surface construction in rock", New York: Soc. Min. Engrs, Am. Inst. Min. Metall, Petrol Engrs (1967) 237-302.
15. Ewert F. K., "Permeability, groutability and grouting of rocks related to dam sites", Part2: Permeability testing by means of water pressure tests, Dam Engineering, Vol. 8 (1997) 123-175.
16. Harrison J. R., Hudson J. A., "Engineering rock mechanics: part 2 illustrative worked examples", Pergamon (1997) 136-150.
17. Heuer R. E., "Estimating rock tunnel water inflow"< In: Rapid Excavation and Tunneling Conference (1995) 41-60 (Chapter 3).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.5.3]

18. Hoek E., Brown E. T., "Practical estimates of rock mass strength", Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 34 (1998) 1165-1186.
19. "International society for rock mechanics commission on rock grouting", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 33. No. 8. (1996) 803-847.
20. Kikuchi K., Igari T., Mito Y., Utsuki S., "In situ experimental studies on improvement of rock masses by grouting treatment", Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. Vol. 34:3-4 (1997) 138.
21. Leucci G., Greco F., De Giorgi L., Mauceri R., "Three-dimensional image of seismic refraction tomography and electrical resistivity tomography survey in the castle of Occhiola` (Sicily, Italy)", Journal of Archaeological Science, Vol. 34 (2007) 233-242.
22. Palmstrom A., "Characterization of rock masses by the RMi for use in practical rock engineering", Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 11, No. 2, (1996) 175-186 (part 1) Vol. 11, No. 3 (1996) 287-303 (part 2).
23. Palmstrom A., Singh R., "The deformation modulus of rock masses comparisons between in situ tests and indirect estimates", Tunnel Underground Space Techno, Vol. 16 (2001) 115-131.
24. Qingyun D., Wang M., "Determining areas of leakage in the Da Ye Dam using multi-electrode resistivity", Bull Eng Geol Environ, Vol. 69 (2010) 105-109.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.5.3]

25. Serafim J. L., Pereira J. P., "Consideration of the geomechanics classification of Bieniawski", Proc. Int. Symp. On Engineering Geology and Underground Constructions (1983) 1133-1144.
26. Singh B., Coel R. K., "Rock mass classification a practical approach in civil engineering", Elsevier (1999) 282.
27. Sonmez H., Gokceoglu C., Ulusay R., "Indirect determination of the modulus of deformation of rock masses based on the GSI system", Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.; 1 (2004) 849-57.
28. Yang X., Li Y., "Construction and quality analysis of curtain grouting in foundation of dam for Yangteze Three Gorges project", Science Press Beijing and Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation (2008).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.5.3]