

## دانش آزمایشگاهی ایران

سال هشتم ■ شماره ۳ ■ پاییز ۱۳۹۹ ■ شماره پیاپی ۳۱

ISSN 2538-3450



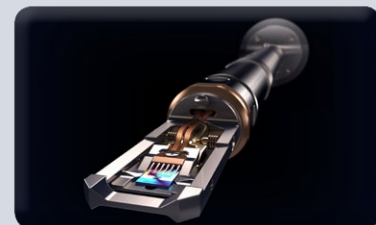
## مطالعات مبتنی بر الکتروانسفالوگرافی کمی در علوم شناختی

تقدیر از پژوهشگران منتخب و آزمایشگاه‌های برتر شبکه آزمایشگاهی با حضور دکتر ستاری

حمایت شبکه آزمایشگاهی از خانواده ۱۰۰ هزار نفری اعضای باشگاه مشتریان



جایگاه و اهمیت مقایسات بین آزمایشگاهی در فعالیت‌های آزمایشگاهی



کاربردهای میکروسکوپ الکترونی عبوری محیطی درجا / بهنگام مجهز به محیط گازی کنترل شده در حوزه‌های مختلف



آشنایی با روش آنالیز طیف‌سنجی نشر نوری با تمرکز بر دستگاه کوانتومتر



مروری بر روش‌های ورود نمونه به دستگاه پلاسمای جفت شده القایی نشری و جرمی بر پایه مهپاش‌های بادی



برش مستقیم بزرگ مقیاس آزمایشگاهی سنگ

## نویسندگان

بهزاد ناطق پور<sup>۱\*</sup>محسن آقابابایی<sup>۱</sup>

\*behzad.nateghpour@gmail.com



## واژه‌های کلیدی

برش مستقیم سنگ، دستگاه بزرگ مقیاس برش  
آزمایشگاهی سنگ، مقاومت برشی بتن غلتکی،  
مقاومت برشی شاتکریت.

برش مستقیم بزرگ  
مقیاس آزمایشگاهی سنگ

## چکیده

رفتار مکانیکی یک توده سنگ به‌طور عمده تحت تأثیر ناپیوستگی‌های موجود است. سازه‌های ژئوتکنیکی نزدیک سطح آزاد، مانند پی سدها، نیروگاه‌ها، سطوح شیبدار و دیوار تونل‌ها، به شدت متأثر از خواص این ناپیوستگی‌ها است؛ به‌خصوص زمانی که ماده سنگ از مقاومت بالایی برخوردار باشد، این تأثیر شدت می‌یابد. آزمایش برش مستقیم، رایج‌ترین آزمایش برای بدست آوردن عوامل مقاومت برشی ناپیوستگی‌ها بوده که مفیدترین اطلاعات برای تحلیل و برآورد پروژه‌های مهندسی سنگ از طریق آن فراهم می‌شود. همچنین یکی از عوامل مهم در سدهای بتن غلتکی، مقاومت برشی درز بین لایه‌های بتن است. این عامل از آزمایش برش مستقیم روی مغزه‌های بتنی حفر شده در بدنه سد بتن غلتکی به دست می‌آید. در بین آزمایش‌های برش مستقیم، دقیق‌ترین آزمایش، برش مستقیم برجا است؛ اما با این وجود، به دلیل هزینه بالای انجام این آزمایش یا در برخی موارد، عدم دسترسی به محل برای انجام آزمایش، به‌طور عمده از روش‌های آزمایشگاهی آزمایش برش مستقیم استفاده می‌شود. آزمایش برش مستقیم آزمایشگاهی نیز در دو مقیاس کوچک و بزرگ قابل انجام است. در مواقعی که پروژه در دست مطالعه از اهمیت بالایی برخوردار باشد، با بهره‌گیری از دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس آزمایشگاهی می‌توان شبیه‌سازی بهتری از روش برجا ایجاد نمود و نتایج دقیق‌تری بدست آورد. امروزه بیشتر آزمایش‌هایی که اهمیت کمتری دارند توسط دستگاه‌های برش کوچک مقیاس انجام می‌گیرند. در این راستا، به‌منظور بدست آوردن نتایج آزمایشگاهی هر چه دقیق‌تر نسبت به روش برجا و با هزینه‌ای به مراتب کمتر، شرکت مهندسی مشاور آزمون فولاد اقدام به ساخت دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس آزمایشگاهی نموده است. این دستگاه که در نوع خود بی‌نظیر است، قابلیت آزمایش نمونه‌ای تا ابعاد  $35 \times 35$  سانتی‌متر را داراست.

رفتار توده سنگ‌ها بیشتر با حضور ناپیوستگی‌ها یا صفحات ضعف که بلوک‌های سنگی در توده سنگ را از هم جدا می‌سازند، تحت تأثیر قرار می‌گیرد. این صفحات شامل صفحات لایه‌بندی، درزه‌ها، نواحی برشی و گسل‌ها است. به‌طور کلی، برای طراحی هر سازه یا پی سنگی، به‌منظور پایدارسازی و دست‌یابی به شرایط ایمن، باید به این ناپیوستگی‌ها توجه نمود. همچنین به‌طور خاص در اعماق کم که مقدار تنش‌ها پایین است، رفتار توده سنگ بیشتر براساس لغزش روی این سطوح ضعف کنترل می‌شود. بنابراین، فهم جنبه‌های مختلف این ناپیوستگی‌ها بسیار مهم است [۱].

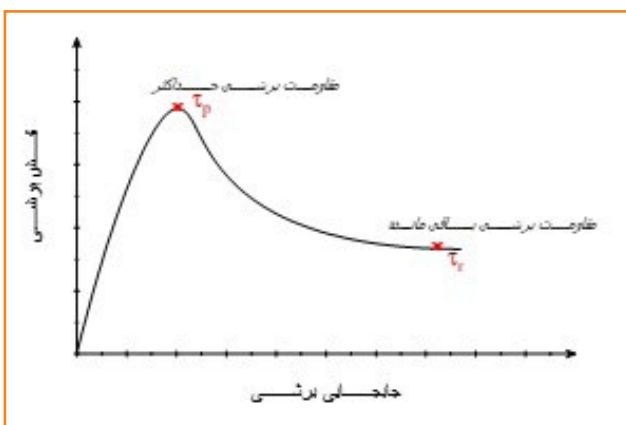
یکی از اصلی‌ترین ویژگی‌های یک ناپیوستگی، مقاومت برشی سطح آن است. تعیین مقدار مقاومت برشی با قابلیت اعتماد و صحت بالا از مسائل مهم مهندسی سنگ است. این مسئله در طراحی شیروانی‌های سنگی به حالت بحرانی می‌رسد، چرا که تغییرات بسیار کم در مقاومت برشی ممکن است به تعیین اشتباه ارتفاع ایمن یک شیروانی منجر شود که لطمه‌های اقتصادی و جانی به همراه خواهد داشت. همچنین مقاومت برشی یکی از خواص مهم بتن در سدهای بتن غلتکی<sup>۳</sup> نیز بوده و به‌طور معمول با معیار موهر-کلمب که بر پایه چسبندگی و مقاومت اصطکاکی است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. عامل مقاومت برشی در بتن غلتکی شامل مقاومت برشی توده بتن و مقاومت برشی ناپیوستگی بین لایه‌ها می‌شود. تعیین عوامل مقاومت برشی شبیه به روش رایج در مهندسی سنگ است [۲]. شاتکریت<sup>۴</sup> نوعی بتن مرکب از سیمان، ماسه و خرده سنگ است که به کمک هوای فشرده اجرا شده و در اثر سرعت زیاد به‌صورت دینامیکی فشرده می‌شود. از آنجا که شاتکریت به بیشتر سنگ‌ها به‌خوبی می‌چسبد، لذا لایه نازکی از آن به شکل سطحی مقاوم به‌منظور تقویت سطوح به کار گرفته می‌شود؛ به این ترتیب، ترکیبی از سنگ و سطح تقویت شده به‌وجود آمده که بارهای وارده را به‌صورت مقاومت‌های چسبندگی و برشی، به سنگ‌های پایدار مجاور منتقل می‌سازد. به‌علاوه مقاومت برشی مناسب شاتکریت منجر به جلوگیری هر چه ایمن‌تر سقوط قطعات سست سنگی می‌شود [۳]؛ بنابراین، اطلاع از مقدار مقاومت برشی شاتکریت از اهمیت بالایی برخوردار است. لازم به ذکر است که این عامل مقاومتی نیز همانند بتن غلتکی از روش رایج تعیین مقاومت برشی در مهندسی سنگ به‌دست می‌آید.

به‌طور کلی، بررسی و مطالعه خواص ناپیوستگی‌های سنگی از دو روش آزمون‌های صحرایی و آزمایش‌های آزمایشگاهی، صورت می‌گیرد. در حال حاضر، با وجود اینکه نتایج آزمایش‌های صحرایی به واقعیت نزدیک‌تر هستند اما به دلیل دشواری انجام آزمایش‌های صحرایی و قیمت بسیار بالای تجهیزات و خدمات، از این روش فقط در پروژه‌های بسیار گران قیمت و حساس استفاده می‌شود. بنابراین، مطالعه ناپیوستگی‌ها در بیشتر پروژه‌ها از طریق آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام می‌گیرد. حال، روش برش آزمایشگاهی نیز به دو طریق بزرگ مقیاس و کوچک مقیاس تقسیم‌بندی می‌شود. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که مقیاس نمونه انتخابی بر نتایج آزمایش برش تأثیرگذار است. بنابراین، انتخاب نمونه بزرگ مقیاس و نیروی اعمالی مشابه با شرایط واقعی برای دست‌یابی به نتایج هر چه دقیق‌تر ضروری به نظر می‌رسد و این امر مستلزم به کارگیری تجهیزات برش بزرگ مقیاس متناسب با این نمونه‌ها است.

## ● آزمایش برش مستقیم آزمایشگاهی

### ▶ آزمایش برش سنگ

آزمایش برش مستقیم برای تعیین ویژگی ناپیوستگی‌ها به کار گرفته می‌شود. در این آزمایش به‌طور معمول بار ثابتی به‌صورت عمود (σ) بر ناپیوستگی اعمال شده و نیروی برشی برای ایجاد جابه‌جایی در امتداد ناپیوستگی به نمونه اعمال می‌شود. با اندازه‌گیری هم‌زمان مقدار جابه‌جایی‌های قائم، افقی سطح ناپیوستگی و مقدار نیروی برشی (τ) و ترسیم آنها در نمودار تنش برشی-جابه‌جایی برشی، می‌توان مقاومت برشی بیشینه مقدار و مقاومت برشی سطح ناپیوستگی را محاسبه نمود (شکل (۱)).



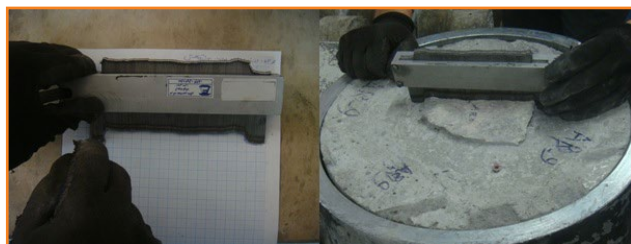
شکل (۱): نمودار کلی مقاومت برشی-جابه‌جایی برشی برای یک درزه طبیعی.

قرار گرفت. بارتون (۱۹۷۲) براساس آزمایش‌های دقیقی که روی ناپیوستگی‌های زبر مصنوعی انجام داد، روش دیگری را برای پیش‌بینی مقاومت برشی ناپیوستگی‌های زبر ارائه نمود. رابطه زیر توسط بارتون پیشنهاد شد [۵]:

$$\tau = \sigma_n \tan[\varphi_r + JRC \log_{10} \frac{JCS}{\sigma_n}] \quad (4)$$

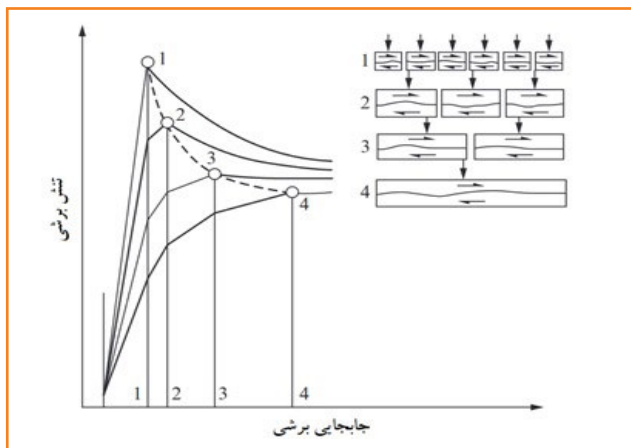
که در آن: JRC ضریب زبری ناپیوستگی بوده و از صفر برای سطوح کاملاً صاف تا ۲۰ برای سطوح خیلی زبر تغییر می‌کند، JCS مقاومت فشاری مؤثر دیواره ناپیوستگی و  $\varphi_r$  زاویه اصطکاک ماندگار است.

در مواردی که سطح ناپیوستگی هوازده نباشد JCS برابر با مقاومت فشاری سنگ بکر در نظر گرفته می‌شود. همچنین روش پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ<sup>۵</sup> برای تعیین JCS مبنی بر استفاده از چکش اشمیت است. ضریب زبری ناپیوستگی با استفاده از مقایسه ظاهر ناپیوستگی در امتداد برش با پروفیل‌های استاندارد منتشر شده توسط بارتون و چوبی (۱۹۷۷) به دست می‌آید [۶]. ظاهر ناپیوستگی نیز به کمک شانه بارتون ترسیم می‌شود (شکل (۳)).



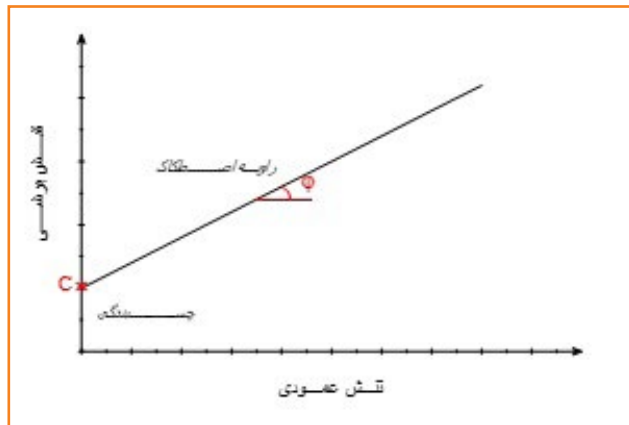
شکل (۳): استفاده از شانه بارتون برای رسم پروفیل سطح درزه و محاسبه JRC

بارتون و چوبی نشان دادند که JRC و JCS به صورت معناداری تحت تأثیر مقیاس هستند؛ به طوری که با افزایش طول ناپیوستگی، سطح تماس دیواره‌ها افزایش یافته و به همان نسبت نقطه بیشینه مقدار نمودار مقاومت برشی-جابجایی برشی ملایم‌تر می‌شود (شکل (۴)).



شکل (۴): تأثیر مقیاس بر مقاومت برشی حداکثر [۸].

چنانچه مقادیر مقاومت برشی نهایی به دست آمده در آزمایش‌های مختلف نسبت به تنش قائم ترسیم شود، یک منحنی تقریباً خطی به دست می‌آید که مطابق با معیار موهر-کلمب، شیب آن نشانگر زاویه اصطکاک حداکثر ( $\varphi$ ) و عرض از مبدأ آن نشانگر چسبندگی سطح برش (C) است (شکل (۲)).



شکل (۲): نمودار کلی رفتار تنش برشی-تنش نرمال مطابق با معیار موهر-کلمب.

به این ترتیب مقاومت برشی نهایی را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد [۴]:

$$\tau = C + \sigma \tan(\varphi) \quad (1)$$

چنانچه مقاومت برشی ماندگار بر حسب تنش قائم ترسیم شود، رابطه‌ای خطی به صورت زیر به دست خواهد آمد:

$$\tau_r = \sigma \tan(\varphi_r) \quad (2)$$

مطالب بالا در مورد ناپیوستگی‌هایی که به طور مصنوعی روی سنگ ایجاد می‌شود، صادق است، اما سطح ناپیوستگی طبیعی دارای زبری و ناصافی‌های زیادی است که باعث تغییر رفتار سنگ می‌شود. تأثیر زبری ناپیوستگی را می‌توان با استفاده از مدلی که توسط پاتون ارائه شده مورد بررسی و تحلیل قرار داد. در این مدل زبری سطح تحت عامل «i» معرفی شده است و مدل رفتاری به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\tau = \sigma \tan(\varphi + i) \quad (3)$$

این رابطه تا زمانی که پدیده اتساع در برش رخ می‌دهد می‌تواند معتبر باشد. اما با بالا رفتن تنش قائم بر سطح ناپیوستگی و افزایش تنش برشی، دیگر لغزش روی سطوح شیب‌دار دندان‌ها اتفاق نمی‌افتد؛ در این حالت، تنش برشی باعث بریده شدن دندان‌ها شده و برش روی ماده سنگی بکر اتفاق می‌افتد. انتقال از حالت اتساع به برش توسط لادانی و آرشامبولت مورد مطالعه

ممکن است کمتر از مقادیر نظیر آن در بتن حجیم متعارف باشد و همچنین این احتمال وجود دارد که در پروژه‌های مختلف، بسیار متغیر باشد. باید توجه داشت که مقدار چسبندگی از سطح یک لایه تا سطح لایه دیگر به مقدار زیادی تغییر می‌کند در حالی که مقدار زاویه اصطکاک معمولاً در همه سطوح کاملاً یکسان است [۲].

### ● دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس

همانگونه که در قسمت‌های قبلی اشاره شد، استفاده از دستگاه برش بزرگ مقیاس دارای اهمیت فراوانی است. شرکت مهندسیین مشاور آزمون فولاد با تکیه بر دانش مهندسی و توان فنی خود اقدام به طراحی و ساخت اولین دستگاه برش بزرگ مقیاس سنگ در ایران نموده و در پروژه‌های عمرانی متعددی به کار برده است. این دستگاه قابلیت اعمال فشار ۱۰۰ مگاپاسکال در راستای قائم و موازی سطح برش را دارا بوده و با مجهز بودن به حسگرهای متعدد، مقادیر فشار و جابه‌جایی به صورت کاملاً دیجیتال و پیوسته ثبت می‌شوند. در محفظه برش این دستگاه، امکان جای‌گیری نمونه‌ای که ابعاد آن ۳۵ × ۳۵ سانتی‌متر است، وجود دارد. قالب‌گیری و آماده‌سازی نمونه‌ها با قالب‌های مخصوص این دستگاه و با ملات سیمان انجام می‌گیرد (شکل (۵)).



شکل (۵): نمایی از دستگاه برش بزرگ مقیاس و تجهیزات جانبی.

نمونه‌ای از مغزه‌ای به قطر ۱۵ سانتی‌متر که برای انجام آزمایش انتخاب شده و همچنین پس از آماده‌سازی در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل (۶): مغزه سنگ دارای درزه طبیعی با قطر ۱۵ سانتی‌متر (سمت راست)، درزه طبیعی پس از قالب‌گیری و آماده‌سازی برای انجام آزمایش برش مستقیم (سمت چپ).

نتیجه افزایش سطح تماس دیواره‌ها، کاهش مقادیر JRC و JCS و به دنبال آن، کاهش مقاومت نهایی برشی با افزایش مقیاس است. بارتن و بندیس در سال ۱۹۸۲ ضرایب تصحیح زیر را به منظور تعمیم نتایج آزمایشگاهی به حالت واقعی ارائه کردند [۷]:

$$JRC_n = JRC_0 \left(\frac{L_n}{L_0}\right)^{-0.02 JRC_0} \quad (5)$$

$$JCS_n = JCS_0 \left(\frac{L_n}{L_0}\right)^{-0.03 JRC_0} \quad (6)$$

در این روابط: ۰ و n به ترتیب مربوط به مقیاس آزمایشگاهی (نمونه با ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر) و بلوک‌های بجا هستند.

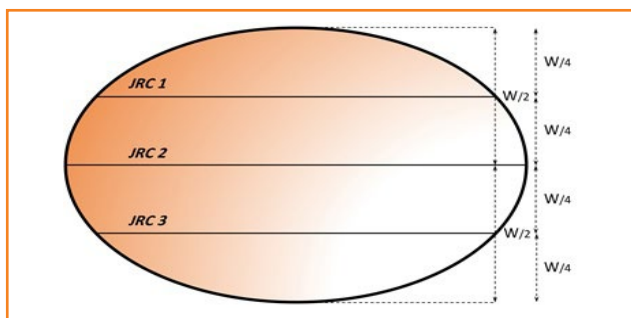
### ▶ آزمایش برش شاتکریت

شاتکریت کاربرد گسترده‌ای در کارهای عمرانی و معدنی داشته و از آن با هدف نگهداری موقت و یا نهایی استفاده می‌شود. اولین نقش شاتکریت که شاید موثرترین نقش آن نیز باشد، جلوگیری از ریزش بلوک‌های کوچک و به دنبال آن بلوک‌های بزرگ و گسترش شکستگی بوده و تعامل واقعی بین سنگ و شاتکریت بسیار پیچیده است. با این حال تعامل بین سنگ و شاتکریت وابسته به مقاومت و خواص مکانیکی حاکم بر سطح ناپیوستگی است. مجموعه‌ای از آزمون‌های آزمایشگاهی به منظور تعیین مقاومت و سختی بین شاتکریت و سنگ به کار می‌رود، به طوری که آزمون برش مستقیم مکمل آزمون‌های کششی و فشارشی شاتکریت و سنگ است. همچنین حالت خاصی از این آزمایش، بررسی عوامل سطح دو شاتکریت بوده که در بازه‌های زمانی متفاوت اجرا شده‌اند. در این آزمایش به منظور شبیه‌سازی واقعی‌تر، بار قائم بسیار پایینی انتخاب می‌شود. از جمله ویژگی‌های اصلی که بر مقاومت سطح ناپیوستگی سنگ و شاتکریت تأثیرگذار هستند می‌توان از سختی، چسبندگی و زاویه اصطکاک نام برد. انجام این نوع آزمایش شبیه به آزمون برش در سنگ بوده و متأثر از مقیاس است. با توجه به اینکه اندازه نمونه‌های این آزمایش قطری بیش از ۱۸ سانتی‌متر دارند، لذا آزمایش این نمونه‌ها مستلزم به کارگیری دستگاه برش بزرگ مقیاس است [۹].

### ▶ آزمایش برش آزمایشگاهی بتن غلتکی

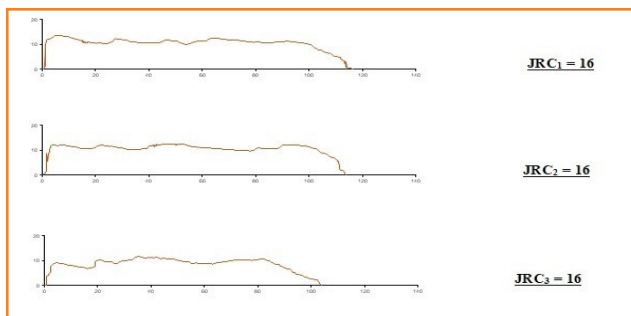
بتن متراکم شده با غلتک یا بتن غلطکی، بتنی با اسلامپ صفر بوده که با ارتعاش توسط غلتک‌ها محکم و سفت می‌شود. کاربرد عمده این نوع بتن در سدسازی و راهسازی است. در سدهای بتن غلتکی، حجم عظیم بتن‌ریزی و اجرای آن در چند مرحله متوالی، موجب می‌شود تا ناپیوستگی‌هایی در سازه بتنی سد به وجود آید. مقدار مقاومت برشی در محل ناپیوستگی بین لایه‌ها، مقداری تعیین کننده در طراحی است. مقاومت برشی بتن غلتکی در محل ناپیوستگی بین لایه‌ها

نمود (شکل ۹)).



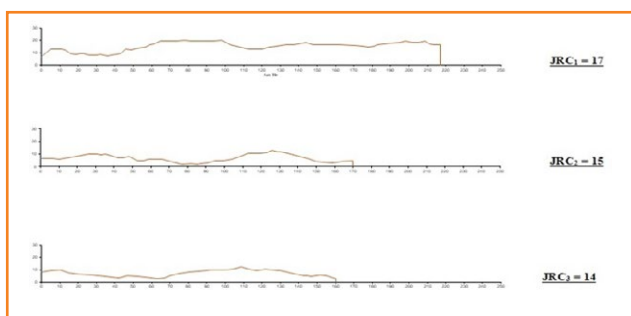
شکل ۹: نمایی از چگونگی اندازه‌گیری چند JRC روی یک سطح درزه.

پروفیل‌های JRC و مقادیر آنها که مربوط به یک درزه طبیعی در مغزه‌ای با قطر ۴۸ میلی‌متر بوده، در شکل (۱۰) نشان داده شده‌است.



شکل (۱۰): پروفیل مربوط به نمونه‌ای که از مغزه ۴۸ میلی‌متری تهیه شده‌است (حالت قبل از انجام آزمایش برش مستقیم).

همچنین در شکل (۱۱) پروفیل‌های JRC و مقادیر آنها برای درزه طبیعی موجود در مغزه ۱۵۰ میلی‌متری نشان داده شده‌است. با مقایسه پروفیل‌های مربوط به مغزه ۴۸ میلی‌متری (نمونه کوچک مقیاس) و پروفیل‌های مربوط به مغزه ۱۵۰ میلی‌متری (نمونه بزرگ مقیاس)، مشخص می‌شود که تغییرات JRC در نمونه کوچک مقیاس بسیار محدود و در بعضی موارد صفر است (مانند نمونه مثال زده شده در شکل (۱۰))؛ اما تغییرات میزان JRC برای نمونه بزرگ مقیاس قابل چشم‌پوشی نیست (برای نمونه مثال زده شده در شکل (۱۱) تا سه عدد متفاوت است).



شکل (۱۱): پروفیل مربوط به نمونه‌ای که از مغزه ۱۵۰ میلی‌متری تهیه شده‌است (حالت قبل از انجام آزمایش برش مستقیم).

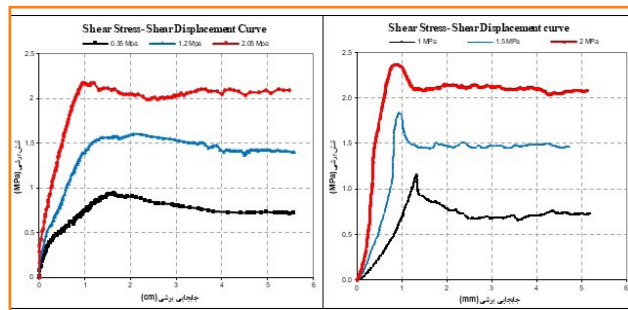
از جمله مزایای دیگر آزمایش نمونه‌های بزرگ، اندازه‌گیری مقدار JRC در چند راستا است (شکل (۷)). در نمونه‌های کوچک مقیاس به‌طور معمول، به دلیل محدودیت سطح برش، تنها یک JRC در راستای برش اندازه‌گیری می‌شود. اما از آنجایی که مقدار JRC در عرض نمونه نیز در حال تغییر است، لذا محاسبه چند JRC در راستای برش و در نظر گرفتن مقدار میانگین آن سبب بهبود ارزیابی هر چه بهتر این عامل کلیدی برای سنگ مورد آزمایش می‌شود.



شکل (۷): اندازه‌گیری سه مقدار JRC در راستای برش برای یک نمونه بزرگ مقیاس.

## ● مقایسه نتایج برش مستقیم بزرگ مقیاس و کوچک مقیاس

مطابق با توضیحات ارائه شده در بخش (۲-۱)، اثر مقیاس در نمودار تنش برشی-جابجایی برشی قابل مشاهده است. در شکل (۸) نمودار تنش برشی-جابجایی برشی برای دو نمونه کوچک و بزرگ مقیاس نمایش داده شده‌است؛ رفتار این نمونه‌ها که به ترتیب از مغزه ۴۸ میلی‌متری و ۱۵۰ میلی‌متری، اگرچه از لحاظ فرم کلی شبیه به هم هستند اما تفاوتی اساسی دارند؛ در واقع، نقطه تنش برشی حداکثر در نمونه بزرگ مقیاس نسبت به نمونه کوچک مقیاس، پهن شدن است و از حالت نوک تیز خارج شده‌است.



شکل (۸): نمودار تنش برشی-جابجایی برشی مربوط به نمونه‌ای که از مغزه ۴۸ میلی‌متری تهیه شده‌است (سمت راست) و نمودار تنش برشی-جابجایی برشی مربوط به نمونه‌ای که از مغزه ۱۵۰ میلی‌متری تهیه شده‌است (سمت چپ).

در صورتی که سطح یک نمونه درزه به‌طور ایده‌آل یک بیضی فرض شود، می‌توان در فواصل یکسان عرضی، از هر سطح سه عدد JRC در راستای برش برای آن سطح محاسبه

## ● مطالعات انجام شده با استفاده از دستگاه برش بزرگ مقیاس

از زمان ساخت دستگاه برش بزرگ مقیاس توسط شرکت مهندسی مشاور آزمون فولاد تاکنون، از این دستگاه در انجام مطالعات پروژه‌های عمرانی متعددی استفاده شده‌است. از جمله

مهمترین این پروژه‌ها می‌توان به پروژه‌های سد پیرتقی، سد خرسان «۲»، سد چم‌شیر، سد آزاد و سد سفارود، اشاره نمود. در جدول شماره (۱)، اطلاعاتی در خصوص این پروژه‌ها و تعداد آزمایش‌های انجام شده برای هر یک از آنها توسط دستگاه برش بزرگ مقیاس ارائه شده‌است.

جدول (۱): مشخصات کلی پروژه‌های مورد مطالعه توسط شرکت مهندسی مشاور آزمون فولاد برای انجام آزمایش‌های ژئوتکنیکی [۱۰].

تعداد آزمایش‌های برش بزرگ مقیاس	ظرفیت اسمی نیروگاه	محل	نوع سازه	پروژه
۲۲	۱۶۰ مگاوات	در فاصله‌ای حدود ۵۰ کیلومتری شرق میانه و ۴۵ کیلومتری جنوب غرب خلخال، روی رودخانه قزل‌اوزن در استان اردبیل واقع شده است.	بتنی قوسی	سد پیرتقی
۳۵	۵۸۰ مگاوات	در جنوب باختری لردگان، در استان چهارمحال و بختیاری واقع شده است	بتنی دو قوسی	سد خرسان «۲»
۲۱	۱۷۶ مگاوات	در ۲۵ کیلومتری جنوب شرقی شهر دوگنبدان (گچساران)، مرکز شهرستان گچساران، استان کهگیلویه و بویر احمد واقع شده است	بتن غلتکی	سد چم‌شیر
۳۰	۵۰۰ مگاوات	در ۷۵ کیلومتر غرب شهرستان سنندج واقع شده است	خاکی با رویه سنگریزه‌ای	سد آزاد
۱۲	۶۰/۷ مگاوات	در غرب گیلان، در فاصله ۲/۵ کیلومتری شهرستان رضوانشهر و ۶۵ کیلومتری کلان شهر رشت واقع شده است	بتن غلتکی	سد سفارود

### نتیجه‌گیری

امروزه با وجود استانداردهای متعدد در مهندسی سنگ که چگونگی ابعاد و اندازه نمونه مناسب برای انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی را تعریف کرده‌اند، اما هنوز اثر مقیاس نمونه از نتایج آزمایش حذف نشده‌است. البته در بیشتر موارد با رعایت حداقل ابعاد لازم برای انجام آزمایش می‌توان تا حد امکان از هزینه‌ها کاست و به نتایجی با دقتی نسبی دست یافت. با این حال، در مواقعی که آزمایش‌ها مربوط به سازه‌ای باشد که از اهمیت بالایی برخوردار بوده و دقت به‌خصوصی مورد نظر است، با فاصله گرفتن از ابعاد حداقلی می‌توان به نتایج دقیق‌تری دست یافت؛ به طوری که با افزایش اندازه نمونه شبیه‌سازی بهتری از حالت برجا و واقعی نمونه سنگی صورت می‌گیرد. از طرفی، اگر افزایش اندازه نمونه به‌گونه‌ای باشد که انجام آزمایش در آزمایشگاه ممکن باشد، قطعاً دقت مورد نظر با هزینه‌ای کمتر از آزمایش‌های برجا برآورده می‌شود.

آزمایش برش مستقیم از جمله مهمترین آزمایش‌های مقاومتی برای مصالح سنگی بوده که به‌طور خاص به مقیاس وابسته است. با توجه به نیاز برآورد دقیق مقاومت برشی مصالح سنگی و بتن برای پروژه‌های عظیم عمرانی در سطح ملی، شرکت مهندسی مشاور آزمون فولاد اقدام به ساخت دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس نموده است. نتایج به‌دست آمده از این دستگاه که ابعاد نمونه‌های آن تا ۷ برابر بزرگتر از نمونه‌های آزمایش‌های معمول بوده، از دقت بسیار بالایی برخوردار است. همچنین آزمایش‌های برش با این دستگاه در کسری از هزینه‌های آزمایش برش برجا انجام می‌گیرد. نوآوری‌هایی این چنین که با تکیه بر دانش مهندسی و توان فنی در کشور صورت می‌گیرد، گامی بزرگ در راستای خودکفایی صنعت ملی محسوب می‌شود. همچنین در کنار تلاش متخصصان و فعالان عرصه صنعت، لازم است تا از چنین طرح‌هایی با اجرای سیاست‌های کلان حمایت شود.

## پی نوشت

۱. کارشناس ارشد مکانیک سنگ شرکت مهندسیین مشاور آزمون فولاد، بخش ژئوتکنیک و مقاومت مصالح

2. Shear zones
- 3.. Roller Compacted Concrete
4. Shotcrete
5. Iranian Society of Rock Mechanics

## مراجع

[1] M. Behnia, B. Nateghpour, J. Tavakoli, and M. S. Broujerdi, "Comparison of experimental and empirical methods for estimating the shear strength of rock joints based on the statistical approach," *Environmental Earth Sciences*, vol. 79, no. 14, pp. 1-15, 2020.

[۲] ا. احسانی زور و ع. متولی کهنه شهری، بتن غلتکی در سدسازی: براساس ترجمه‌ای از آئین‌نامه انجمن مهندسیین ارتش ایالات متحده آمریکا، چاپ اول، انتشارات فروزش، تبریز، ۱۳۸۶.

[۳] ح. مدنی، تونل‌سازی: طراحی و اجرای سیستم نگهداری (جلد چهارم)، چاپ پنجم، انتشارات دانشگاه امیرکبیر، تهران، ۱۳۹۳.

[۴] ا. فهیمی فر و ح. سروش، آزمایش‌های مکانیک سنگ: مبانی نظری و استانداردها (جلد ۱)، چاپ اول، نشر شرکت سهامی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت راه و ترابری و مرکز نشر پرفسور حسابی دانشگاه صنعتی امیرکبیر (واحد تفرش)، تهران، ۱۳۸۰.

[5] N. Barton, "Review of a new shear-strength criterion for rock joints," *Engineering geology*, vol. 7, no. 4, pp. 287-332, 1973.

[6] N. Barton and V. Choubey, "The shear strength of rock joints in theory and practice," *Rock mechanics*, vol. 10, no. 1-2, pp. 1-54, 1977.

[7] N. Barton and S. Bandis, "Effects of block size on the shear behavior of jointed rock," in *The 23rd US symposium on rock mechanics (USRMS)*, 1982: American Rock Mechanics Association.

[8] L. Zhang, *Engineering properties of rocks*. United Kingdom: Butterworth-Heinemann, 2016.

[9] D. Saiang, L. Malmgren, and E. Nordlund, "Laboratory tests on shotcrete-rock joints in direct shear, tension and compression," *Rock mechanics and rock engineering*, vol. 38, no. 4, pp. 275-297, 2005.

[۱۰] خشرکت مدیریت منابع آب ایران (۱۳۹۹)، فهرست طرح های اجرایی، <http://daminfo.wrm.ir/fa/management/abniroo>.





### Authors

Mohsen Aqababaei<sup>1\*</sup>

Behzad Neteqpour<sup>2</sup>

\*behzad.nateghpour@gmail.com

1. Senior rock mechanics expert at Azmouneh Foulad Consultant Engineers Co., Geotechnics and Strength of Materials Division

2. Senior rock mechanics expert at Azmouneh Foulad Consultant Engineers Co., Geotechnics and Strength of Materials Division

## Large scale laboratory direct shear test of rock

### Abstract

Discontinuities usually rule the mechanical behavior of a rock mass. The free surface of geotechnical structures such as dam foundations, powerhouses, slopes, and tunnel walls, are also significantly affected by discontinuities. Besides, when the intact material is relatively strong, the effect of discontinuities and their properties would even increase. The direct shear test is a well-known test for determining the shear strength of saw-cut surfaces and natural joints of rocks, which provide the most valuable results for engineering design parameters. The shear strength of concrete layers in Rolling Compacted Concrete dams (RCC dams) is also considered a crucial engineering design parameter. This parameter is additionally determined by direct shear testing on the cored samples of a dam body. The in-situ direct shear test is the most precise direct shear test, among other direct shear test types. However, due to the enormous costs and difficult executive operations of the in-situ direct shear test at sites, the direct shear test would be conducted in the laboratory most of the time. The laboratory direct shear test could be conducted at small and large scales. In case that the subjected project has great importance, by using the large scale laboratory direct shear test, more precise results would be acquired. For this purpose, the Azmouneh Foulad Consultant Engineers Co. has designed and manufactured a large scale direct shear box that can be used for more accurate simulation of the in-situ direct shear test. This shear box, which is unique in its category, is capable of 35×35 cm samples testing.

### Keywords

Direct shear of rock, Large scale laboratory direct shear box, RCC shear test, Shotcrete shear test



## Sample Preparation Techniques for Gas Chromatography



Large scale laboratory direct shear test of rock



Introduce Optical emission spectroscopy method focuses on Quantometer device



Applications of In-situ Environmental Transmission Electron Microscopy equipped with a gas-controlled environment in various fields



Review on Liquid sample introduction in ICP\_OES, MS by pneumatic nebulizers



The position and importance of inter laboratory comparisons in laboratory activities