مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران
بهار و تابستان ۱۳۸۸، جلد دوم، شماره ۱ و۲، صفحه ۵۹ تا ۷۲

بررسی تأثیر شکل گسیختگی بر مقاومت تراکمی تک محوره‌ی نمونه‌های سنگی

محمد بشیر گنبدی*[۱] علی ارومیه‌ای[۲] محمدرضا نیکودل[۳] غلامرضا لشکری پور[٤]

دریافت مقاله: ۸۷/۷/۲ پذیرش مقاله: ۸۸/٦/٤

چکیده:

تعیین مقاومت تراکمی تک محوره‌ی نمونه‌های سنگی در آزمایشگاه به عنوان یکی از پارامترهای بسیار مهم در مهندسی سنگ همواره با مشکلات زیادی همراه می‌باشد. یکی از مهم‌ترین مشکلات در این زمینه، پراکندگی نتایج آزمایش‌های تراکمی تک محوره و نبود معیار خاصی برای انتخاب داده‌های معرف مقاومت ماده‌ی سنگ می‌باشد. بررسی شکل و نحوه‌ی شکست نمونه‌ها در آزمایش تک محوره مؤید تأثیر به سزای ریزشکستگی‌ها و ناپیوستگی‌های میکروسکوپی در شکل شکست و نتایج آزمایش می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که حداکثر نسبت مقاومت تراکمی تک محوره به مقاومت کششی و در نتیجه حداکثر مقدار مقاومت تراکمی تک محوره در شکست نوع کششی ساده بوقوع می‌پیوندد که این موضوع معرف عدم تأثیر یا تأثیر بسیارکم ریزشکستگی‌ها در شکست نمونه در این حالت، برخلاف سایر اشکال گسیختگی می‌باشد. در حد نهایی دیگر حداقل نسبت مقاومت تراکمی تک محوره به مقاومت کششی و نیز مقاومت تراکمی تک محوره متعلق به نمونه‌هایی است که دارای شکست نوع برشی ساده بوده و در این حالت شکستگی نمونه به طور کامل متأثر از ریزشکستگی‌ها می‌باشد. بنابراین با توجه به نسبت مقاومت تراکمی تک محوره به مقاومت کششی و هم‌چنین شکل شکست نمونه‌ها به راحتی می‌توان داده‌های واقعی معرف مقاومت تراکمی تک محوره‌ی ماده‌ی سنگ را انتخاب نمود. در این تحقیق معیار مناسبی جهت انتخاب داده‌های درست آزمایش تراکمی تک محوره ارائه گردیده است.

کلید واژه‌ها: *مقاومت تراکمی تک محوره، ماسه سنگ، شکل شکست، ریزشکستگی، سازند شمشک*

۱- دانشجوی دکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس تهران bashir@modares.ac.ir
۲- دانشیار بخش زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس تهران uromeiea@modares.ac.ir
۳- استادیار بخش زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس تهران nikudelm@modares.ac.ir
٤- استاد بخش زمین‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد lashkarg@hamoon.usb.ac.ir
* مسئول مکاتبات

مقدمه

مقاومت تراکمی تک‌محوره‌ی سنگ‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترها در مهندسی سنگ، کاربرد گسترده‌ای در طبقه‌بندی‌های رایج توده‌ی سنگ، معیارهای شکست و تحلیل‌های عددی، تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی و دامنه‌های سنگی دارد. با وجود دقت بسیاری زیادی که در مراحل تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها به منظور تهیه نمونه‌های هموژن و فاقد ناپیوستگی‌های مشخص، آماده‌سازی نمونه‌های با شکل کاملاً استوانه‌ای با دو انتهای صاف و موازی صورت می‌گیرد و نیز تلاش برای انجام صحیح آزمون‌های جهت حذف یا کاهش اثرات ناشی از شکل هندسی نمونه‌ها و وضعیت دوانتهای نمونه بر مقاومت تراکمی تک محوره، نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های انجام شده روی نمونه‌هایی با لیتولوژی یکسان و شکل هندسی کاملاً مشابه، تفاوت‌هایی را نشان می‌دهد که مؤید این مطلب است که عواملی غیر از عوامل شناخته شده بر مقاومت تراکمی تک محوره تأثیرگذار می‌باشد که این موارد در استانداردها و منابع مختلف نیز مورد توجه قرار نمی‌گیرد. این تحقیق به تفصیل به این موضوع می‌پردازد. خواص مکانیکی توده سنگ و نمونه‌های سنگی، به شدت متأثر از ناپیوستگی‌هایی است که با کیفیت متفاوت در آنها حضور دارند. این ناپیوستگی‌ها شامل صفحات ضعف، تغییرات مینرالوژیک، سطوح لایه‌بندی، شکاف‌ها، درزه‌ها و غیره می‌باشند. مقاومت کششی توده‌ی سنگ به دلیل وجود ناپیوستگی‌هایی نظیر درز و شکاف‌ها عموماً صفر در نظر گرفته می‌شود. این سطوح، ناپیوستگی‌های بزرگ مقیاسی می‌باشند که ویژگی‌های آنها به راحتی قابل برداشت می‌باشد. در صورتی‌که در مقیاس‌های کوچک (میکروسکوپی) نیز ناپیوستگی‌هایی نظیر شکاف‌های بین دانه‌ای، ریزشکستگی‌ها، ریزشکاف‌ها و... که با چشم غیرمسلح قابل دیدن و برداشت نمی‌باشند، حضور دارند. بدیهی است تأثیر ناپیوستگی‌های میکروسکوپی که در اینجا ریزشکستگی نامگذاری شده‌اند، بر خواص مکانیکی سنگ بکر کمتر از تأثیر ناپیوستگی‌های بزرگ مقیاس برویژگی‌های مکانیکی توده‌ی سنگ می‌باشد. با این وجود عدم امکان رؤیت و برداشت ریزشکستگی‌ها با چشم غیرمسلح، سبب عدم شناخت کامل و عدم توجه به تأثیر آنها بر ویژگی‌های مکانیکی سنگ بکر می‌شود. وجود همین ناپیوستگی‌های میکروسکوپی سبب می‌گردد که ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌های سنگی که در آزمایشگاه مورد آزمایش قرار می‌گیرند، متفاوت با رفتار و ویژگی واقعی سنگ بکر (ماده‌ی سنگ) باشد. لازم به ذکر است که علاوه بر ناپیوستگی‌هایی که از آنها به عنوان ناپیوستگی‌های میکروسکوپی یاد کردیم، دسته‌ای دیگر از ناپیوستگی‌ها در نمونه‌های سنگی حضور دارند که با وجود اینکه با چشم غیرمسلح قابل مشاهده هستند اما به دلیل ریزبودن نمی‌توان ویژگی‌های آنها را به طور کامل مورد بررسی قرار داد و لذا این دسته از ناپیوستگی‌ها نیزعموماً در آزمون‌های آزمایشگاهی نادیده گرفته می‌شوند. در اینجا این دسته ناپیوستگی‌ها نیز جزو ناپیوستگی‌های ریزمقیاس در نظر گرفته می‌شوند. ریزشکستگی‌ها سبب ایجاد تغییرات بزرگ در ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌های سنگی بویژه مقاومت تراکمی تک محوره می‌گردد و امروزه این موضوع مورد پذیرش همگانی قرار گرفته و افراد زیادی به بررسی این موضوع پرداخته‌اند. از آن جمله می‌توان به: Hoek and Brown, 1980; Horii and Nemat - Naser, 1985; Farmer and Kemeny, 1992 Jumikis,1983; Peng and Jahnson, 1972 اشاره کرد.

برخی از محققین نیز به ارائه‌ی طبقه‌بندی برای دسته‌بندی ریزشکستگی‌ها پرداخته‌اند، از آن جمله می‌توان به Vutukuri et al., 1974 اشاره داشت. با این وجود نوع و شکل شکست در نمونه‌های استوانه‌ای که تحت بارگذاری محوری قرار می‌گیرند، توسط محققینی همچون:

Reinhart, 1966; Paul and Gangal, 1966; Fairhurst and Cook, 1966 طبقه‌بندی شده است.

Szwedzicki and Shamu, 1999 نیز برای اولین بار به مطالعه رابطه‌ی بین نوع شکست و مقاومت تراکمی تک محوره‌ی نمونه‌های سنگی پرداخته و نشان دادند که محل، جهت‌یابی، اندازه، دانسیته و میزان توسعه‌ی ریزشکستگی‌ها سبب ایجاد انواع مختلف گسیختگی و متعاقب آن بازه‌ی گسترده‌ای از مقادیر مقاومت تراکمی تک محوره برای نمونه‌های سنگی می‌گردد.

در حال حاضر وجود ریزشکستگی یا ریزترک۲ که سبب ایجاد تغییرات بزرگ در مقادیر مقاومت تراکمی تک محوره در سنگ‌هایی حتی با ترکیب لیتولوژی یکسان می‌گردد، مشکلات زیادی را در انتخاب مقادیر مشخص این پارامتر برای نمونه‌های سنگی ایجاد می‌کند. برای رفع مشکل پراکندگی نتایج آزمایش تراکمی تک محوره، عموماً از یک یا دو روش زیر کمک گرفته می‌شود.

۱- انجام آزمایش روی تعداد زیادی نمونه (تکرارآزمون‌های روی نمونه‌های یکسان)، به‌طوری‌که بتوان با تحلیل‌های آماری مقادیر نزدیک به واقعیت را انتخاب کرد (شامل حذف داده‌های پرت، میانگین‌گیری و...).

۲- توجه و دقت زیاد در تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها به‌طوری‌که بتوان حتی‌الامکان نمونه‌هایی یکدست را مورد آزمایش قرار داد.

بیشتر مواقع امکان کمک گرفتن از راه‌حل‌های فوق به دلیل هزینه‌بر بودن، وقت‌گیر بودن، محدودیت‌های متعدد در نمونه‌گیری و ... وجود ندارد. لذا بایستی به دنبال راه‌حل‌های دیگری برای کنترل نتایج آزمایش‌های تراکمی تک محوره بود. یکی از این راه‌حل‌ها توجه به تأثیر ریزشکستگی‌ها و متعاقب آن شکل گسیختگی در نتایج آزمایش‌های تراکمی تک محوره و کمی کردن این تأثیرات می‌باشد که موضوع این تحقیق است. بنابراین در این تحقیق دو هدف زیر دنبال شده است.

الف) مقایسه‌ی مقاومت تراکمی تک محوره‌ی مربوط به اشکال مختلف شکست در آزمون‌های تراکمی تک محوره به منظور تعیین میزان اعتبار نتایج مترادف با هر شکل گسیختگی

ب) ارائه‌ی معیار یا معیارهای شناسایی داده‌های معتبر حاصل از آزمون‌های تراکمی تک محوره با مشخص بودن شکل شکست یا مقاومت کششی نمونه‌ها بدون نیاز به حجم زیاد داده‌ها و انجام تحلیل‌های آماری

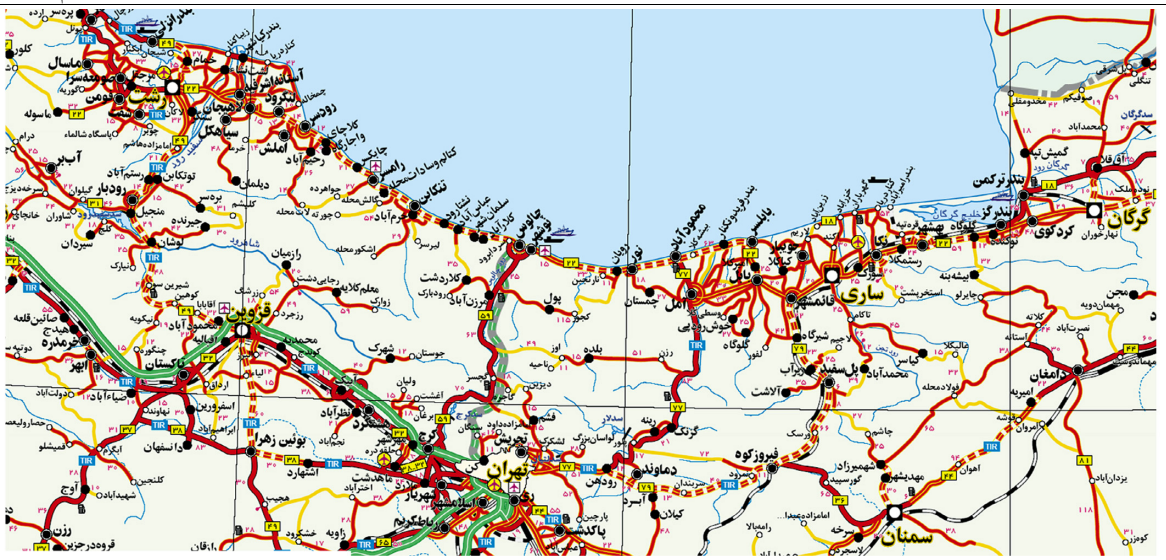
محل نمونه‌گیری و روش انجام آزمون‌ها

نمونه‌های ماسه سنگی مورد استفاده در این تحقیق متعلق به سازند شمشک می‌باشد. این نمونه‌ها از گمانه‌های حفاری شده در محدوده‌ی نیروگاه تلمبه- ذخیره‌ای سیاه بیشه واقع در ۱۳۵ کیلومتری جاده‌ی کرج - چالوس (شکل۱) انتخاب شده‌اند. نمونه‌ها پس از انتخاب و انتقال به آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس تهران و طی مراحل برش و آماده‌سازی مورد آزمایش قرار گرفتند. بیش از ١٤٤ آزمایش تک محوره (هر آزمایش ۳ تا ٤ تکرار شده است) و تقریباً همین تعداد آزمایش برزیلین مطابق استاندارد ASTM و توصیه‌ی ISRM روی نمونه‌ها انجام و پس از شکست نمونه‌ها و اخذ عکس، سطوح شکست مورد مطالعه قرار گرفته و نمونه‌ها بر اساس نوع شکست دسته‌بندی شدند. به منظور فراهم آوردن امکان مقایسه‌ی نتایج با حفظ شرایط یکسان، با تهیه‌ی مقاطع نازک میکروسکوپی، پتروگرافی تمام نمونه‌ها تعیین گردید. نمونه‌های مورد استفاده در این تحقیق مطابق طبقه‌بندی فولک (۱۹۸۰) ماسه سنگ‌هایی از نوع لیت آرنایت، فلدسپاتیک لیت آرنایت، ساب لیت آرنایت، چرت آرنایت و سد آرنایت می‌باشند.

ساز و کار وقوع گسیختگی در تراکم تک محوره

اعمال بار تراکمی تک محوره به نمونه‌های سنگی، تمرکز تنش در بخش‌هایی از نمونه و شکل‌گیری ترک و شکاف‌های ریزی را در آن موجب می‌گردد. با اعمال تنش بیشتر این ترک‌ها و شکاف‌ها ضمن پیوستن به درز و شکاف‌هایی که از قبل در نمونه وجود داشته‌اند، شروع به رشد کرده و منجر به شکل‌گیری ترک و شکاف‌های بزرگ و نهایتاً گسیختگی سنگ می‌گردد. مغزه‌های سنگی که تحت اعمال بار فشارشی در امتداد محور مغزه قرار می‌گیرند، می‌توانند تحت تأثیر تنش‌های کششی، تنش‌های برشی و یا ترکیبی از تنش‌های کششی و برشی حاصل از بار فشارشی متحمل گسیختگی شوند.

Hudson and Haritison, 1997 به ارائه‌ی یک ماتریس تحت عنوان Elastic Compliance Matrix پرداختند که در آن روابط مختلف تنش- کرنش به طور کامل و به شکل مفهومی

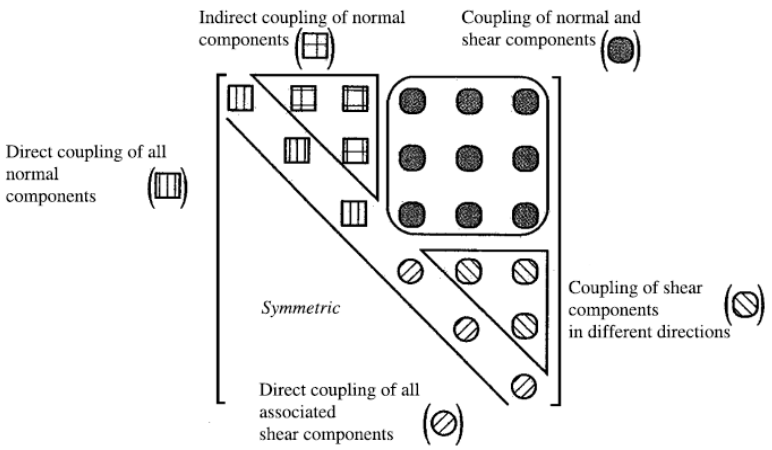


شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و جاده‌های دسترسی به محل طرح سد و نیروگاه تلمبه- ذخیره‌ای سیاه بیشه (جاده کرج- چالوس)

مطابق شکل ۲ آمده است.

ماتریس فوق معرف نحوه‌ی توزیع تنش‌های نرمال و برشی در نمونه‌ها در اثر اعمال بار فشارشی به آنها می‌باشد. مطابق این ماتریس در تراکم تک محوره چون تنش اعمالی به نمونه از نوع تنش نرمال خالص می‌باشد، شکل گسیختگی نمونه مشابه آنچه که در شکل ۲ نشان داده شده است، یک سطح گسیختگی به موازات محور مغزه می‌باشد. به عبارت دیگر این نوع گسیختگی، گسیختگی تیپ تراکم تک محوره بوده و چنان‌چه گسیختگی به‌وقوع پیوسته از دیگر انواع نشان داده شده باشد، عامل یا عواملی خارجی سبب این انحراف شده است که این عوامل می‌توانند مقاومت تراکمی تک محوره‌ی نمونه را نیز تحت تأثیر قرار دهند.

Gramberg ,1989 و محققین دیگر دو دسته کلی گسیختگی را برای نمونه‌هایی که تحت اعمال بار فشارشی تک محوره هستند، ارائه کرده‌اند که عبارتند از: Axial Cleavage و Conjugate Shear. اعتقاد بر این بود که وقوع دو نوع گسیختگی فوق‌الذکر صرفاً به نحوه و کیفیت تماس سطوح انتهایی نمونه با صفحات بارگذاری و میزان موازی بودن این سطوح بستگی دارد. به طوری‌که Jumikis, 1983 معتقد است که وجود اصطکاک بزرگ بین صفحات بارگذاری و نمونه، احتمال وقوع گسیختگی نوع برشی را نسبت به نوع دیگر گسیختگی افزایش می دهد. بررسی‌های صورت گرفته توسط محققین دیگر که در ادامه به آنها پرداخته خواهد شد، نشان می‌دهد که علاوه بر دو مورد ذکر شده در بالا، ریزترک‌ها



شکل ۲- ساختار Matrix Elastic Compliance (Hudson and Harrison, 1997)

(ریزشکستگی‌ها) مهمترین عامل در وقوع گسیختگی با شکلی متفاوت با گسیختگی خاص تراکم تک محوره، درآزمایش‌های تراکمی تک محوره می‌باشد.

تحلیل شکل و نوع گسیختگی به فهم جهت‌یابی تنش‌های اصلی وارد بر نمونه کمک شایانی می‌کند. بدین معنی که گسیختگی‌های کششی عمود بر جهت تنش اصلی کوچک‌تر گسترش پیدا می کنند.

Szwedzicki, 2007 مطابق شکل ۳ پنج نوع گسیختگی را برای نمونه‌هایی که تحت اعمال بار فشارشی تک محوره هستند، معرفی می کند که عبارتند از:

۱- گسیختگی کششی ساده (Simple Extension)

۲- گسیختگی کششی چندتایی (Multiple Extension)

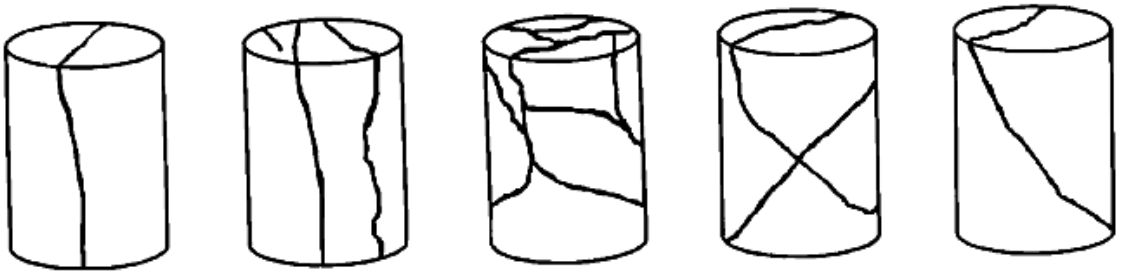
۳- شکست نوع خردشدگی (Multiple Fracturing)

٤-گسیختگی برشی چندتایی (Multiple Shear)

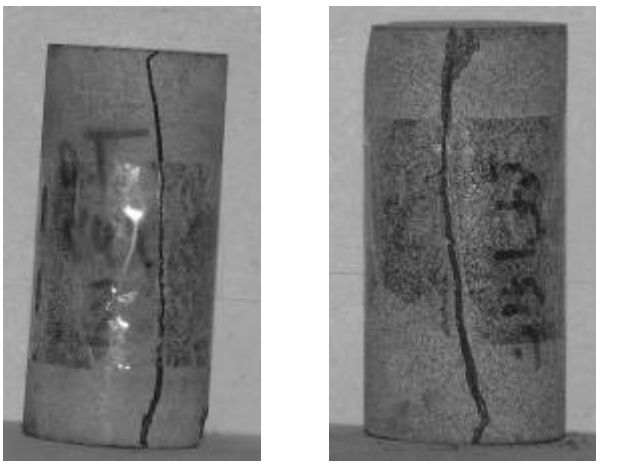
۵- گسیختگی برشی ساده

گسیختگی کششی ساده: این نوع گسیختگی عبارتست از گسیختگی در طول یک صفحه به موازات محور بارگذاری. در این نوع گسیختگی، صفحه‌ی شکست عمود بر امتداد تنش اصلی حداقل (که در اینجا صفر است) شکل می‌گیرد. به عبارت دیگر سطح شکست منطبق بر سطح شکست تئوریک می‌باشد. این بدان معنی است که به غیر از روابط تنش-کرنش و قوانین موجود، عامل یا عوامل دیگری نظیر آنومالی‌های موجود در نمونه در وقوع گسیختگی نقشی ندارند. به عبارت دیگر مقاومت تراکمی تک محوره‌ی نمونه‌های با این نوع گسیختگی با تقریب بسیار زیاد، معرف مقاومت تراکمی تک محوره‌ی ماده‌ی سنگ می‌باشد. در شکل ٤، نمونه‌ای از این نوع گسیختگی مربوط به آزمون‌های انجام شده در این تحقیق، نشان داده شده است.

گسیختگی کششی چندتایی: در این نوع گسیختگی دو یا تعداد بیشتری گسیختگی به موازات محور طولی نمونه (محور



شکل۳- انواع مختلف گسیختگی در آزمون‌های **تراکمی تک محوره (Szwedzicki, 2007)**



شکل٤ - گسیختگی کششی ساده شامل یک سطح گسیختگی منفرد به موازات محور بارگذاری

بارگذاری) شکل می‌گیرد. هر چند که ممکن است علاوه بر گسیختگی‌های موازی محور بارگذاری تعدادی شکستگی نیز عمود بر شکستگی‌های طولی شکل بگیرند (شکل ۵). در این حالت جهت‌یابی ریزشکستگی‌ها به طور غالب به موازات محور بارگذاری می‌باشد و به طور طبیعی حضور آنها در وقوع گسیختگی بی تأثیر نمی‌باشد.

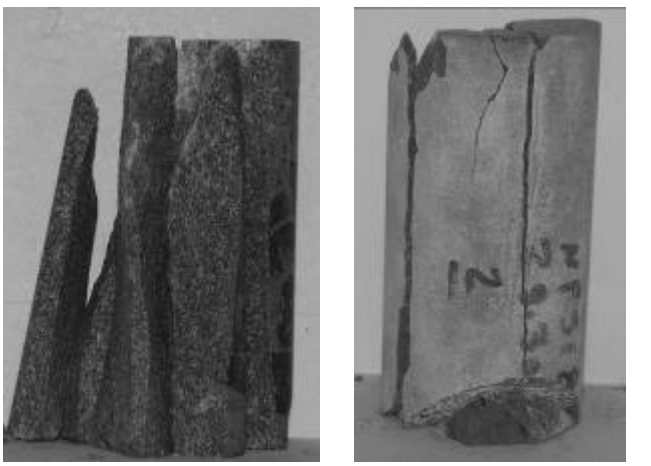
شکست نوع خردشدگی: در این حالت نمونه در امتداد تعداد زیادی صفحه گسیختگی و در زوایای مختلفی شکسته و قطعه قطعه می‌شود. این نوع گسیختگی عموماً انفجاری بوده و با آزاد شدن ناگهانی مقادیر زیادی انرژی همراه است (شکل ٦). این نوع گسیختگی معرف وجود ریزشکستگی‌ها با جهت‌یابی متفاوت در نمونه‌ی سنگی و تأثیر آنها بر شکست می‌باشد.

گسیختگی برشی چندتایی: در این حالت گسیختگی در بردارنده‌ی چندین صفحه‌ی شکستگی متقاطع با محور بارگذاری و غیرموازی با هم‌دیگر می‌باشد (شکل ۷).

گسیختگی برشی ساده: این نوع گسیختگی در بردارنده‌ی یک یا تعدادی صفحات برشی موازی و متقاطع با محور بارگذاری می باشد (شکل ۸).

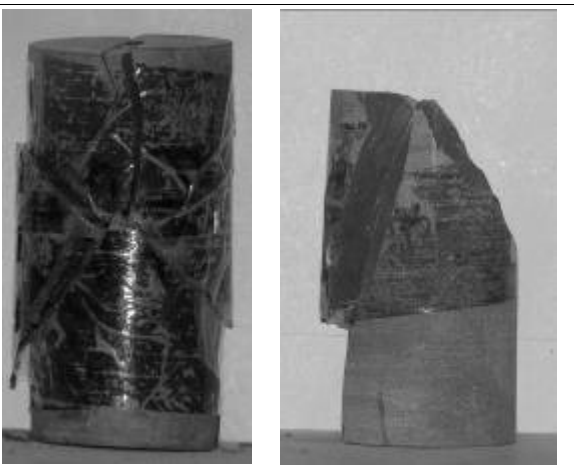
ماتریس انواع گسیختگی در آزمایش تراکمی تک محوره

همان‌طور که اشاره شد، پنج نوع گسیختگی را می‌توان برای شکست‌های حاصل از بارگذاری تراکمی تک محوره روی نمونه‌های استوانه‌ای شکل سنگ معرفی کرد. وقوع این پنج

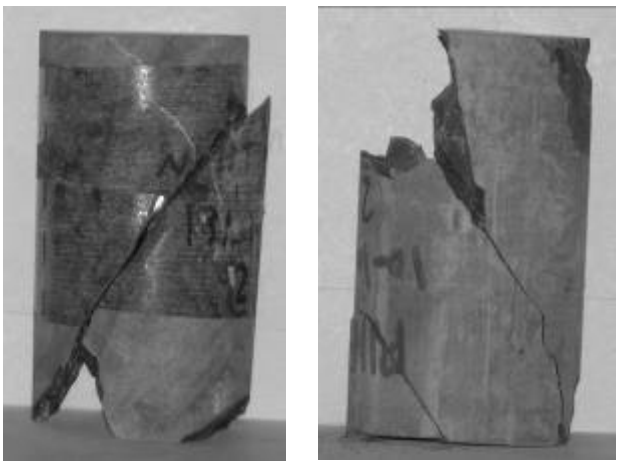


شکل ۵- گسیختگی کششی چندتایی شامل تعدادی سطح گسیختگی موازی با هم و موازی محور بارگذاری

شکل٦- شکست نوع خردشدگی شامل شکست نمونه به قطعات متعدد با ابعاد متفاوت



شکل ۷- گسیختگی برشی چندتایی در بردارنده‌ی دو صفحه‌ی گسیختگی غیر موازی و مورب با محور بارگذاری



شکل۸- گسیختگی برشی ساده شامل یک و دو صفحه‌ی گسیختگی متقاطع با محور بارگذاری

نوع گسیختگی به وجود ریزشکست‌ها و نیز نحوه‌ی توزیع تنش در روابط تنش - کرنش بستگی دارد.

در این بخش مشابه کاری که Szwedzicki, 2007 روی نمونه‌های بازالتی (٤٢ نمونه) انجام داده است، با استفاده از ماتریس الاستیسیته Hudson and Harrison, 1977 (شکل۳)، به ارائه‌ی طبقه‌بندی برای انواع گسیختگی آزمون‌های تراکمی تک محوره می‌پردازیم. علت استفاده از این ماتریس در ارائه‌ی طبقه‌بندی انواع مختلف گسیختگی در آزمون‌های تراکمی تک محوره در این است که انواع مختلف گسیختگی ثبت شده در آزمون‌های تراکمی تک محوره منطبق با انواع گسیختگی معرفی شده در این ماتریس می‌باشد، با این تفاوت که در این ماتریس ترکیبی از تنش‌های نرمال و برشی انواع مختلف گسیختگی را شکل می‌دهد در حالی‌که در بارگذاری تراکمی تک محوره تأثیر ریزگسیختگی‌ها (با توجه به توضیحات پیش گفته و نیز رعایت توازی کامل دو انتهای نمونه و کاهش اصطکاک صفحات بارگذاری و سطوح نمونه)، موجب شکل‌گیری اشکال مختلف شکست می‌باشد. قالب منطبق شده‌ی ماتریس در شکل ۱۰ آمده است. ۲۱ نوع گسیختگی ارائه شده در این ماتریس ترکیبی از ۵ نوع گسیختگی معرفی شده توسط Szwedzicki, 2007 می‌باشد. قطر این ماتریس در بردارنده‌ی دو حد نهایی انواع گسیختگی یعنی گسیختگی کششی ساده و گسیختگی برشی ساده می‌باشد. در بخش بعدی به بررسی تأثیر ریزشکستگی‌ها بر نوع و شکل گسیختگی و در نتیجه مقاومت تراکمی تک محوره می‌پردازیم. در شکل ۱۰ نمونه‌هایی از ۲۱ نوع شکستگی

معرفی شده در شکل ۹ که در آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق به دست آمده، نشان داده شده است.

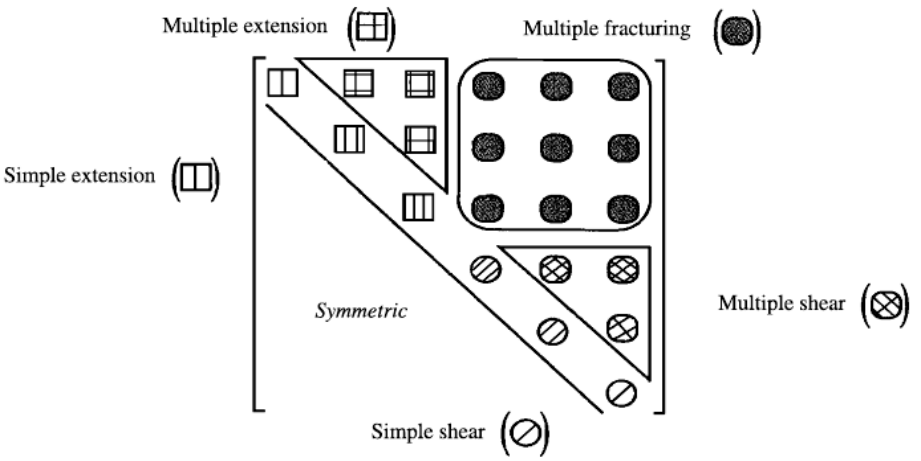
ویژگی مکانیکی سنگ بکر (مقاومت سنگ بکر) و ریزشکستگی‌ها دو عامل اصلی مؤثر بر نتایج آزمون‌های مقاومت تراکمی تک محوره و در نتیجه مقاومت تراکمی تک محوره‌ی نمونه‌های سنگی می‌باشد. برای بررسی تأثیر ریزشکستگی‌ها و شکل شکست بر مقاومت تراکمی تک محوره سنگ به ارائه یک پارامتر بدون بعد می پردازیم. پارامتر بدون بعد مورد استفاده، نسبت مقاومت تراکمی تک محوره بر مقاومت کششی حاصل از آزمون‌های برزیلین می‌باشد. علت انتخاب مقاومت کششی، پائین بودن ضریب تغییرات آن می باشد. مطابق بررسی انجام شده توسط Szwedzicki,2007 و Szwedzicki and Donald, 1996 ضریب تغییرات (تفاوت در بیشترین و کمترین مقدار به درصد) مقاومت کششی نمونه‌های مقاوم و نسبتاً مقاوم ، ۲۰ تا ۲۱ درصد است. درصورتیکه ضریب تغییرات مقاومت کششی در نمونه‌های مورد استفاده در این تحقیق ۱۸ تا ۲۲ درصد تغییر می‌کند.

ضریب تغییرات مقاومت تراکمی تک محوره در این تحقیق بعضاً به ۵۰ درصد نیز می‌رسد. این در حالی است که حداکثر توجه و دقت در تهیه‌ی نمونه‌های با لیتولوژی یکسان و شرایط یکسان دیگر به عمل آمده است. همان‌طور که می دانیم نسبت مقاومت تراکمی تک محوره به مقاومت کششی عموماً ۱: ۱۰ تا ۱:۲۰ در نظر گرفته می‌شود. تئوری شکست Griffith این نسبت را ۱ : ۸ پیش‌بینی می‌کند. در صورتی‌که به علت وجود ریزشکستگی‌ها و ناپیوستگی‌های مختلف در نمونه‌های سنگی این نسبت می‌تواند مقادیری کمتر از ۱ : ۸ را دارا باشد تا آنجائی‌که حداقل مقدار مقاومت تراکمی تک محوره می‌تواند برابر مقاومت کششی نمونه یعنی نسبت ۱:۱ باشد.

بررسی تأثیر شکل شکست بر مقاومت تراکمی تک محوره

نتیجه این تحقیق و کار محققین دیگر از جمله Szwedzicki and Shamu, 1999 نشان می‌دهد که نسبت مقاومت تراکمی تک محوره به مقاومت کششی، می‌تواند از مقادیر کمتر از ۱ : ۵ تا مقادیر بیش از ۱ : ۳۰ تغییر کند.

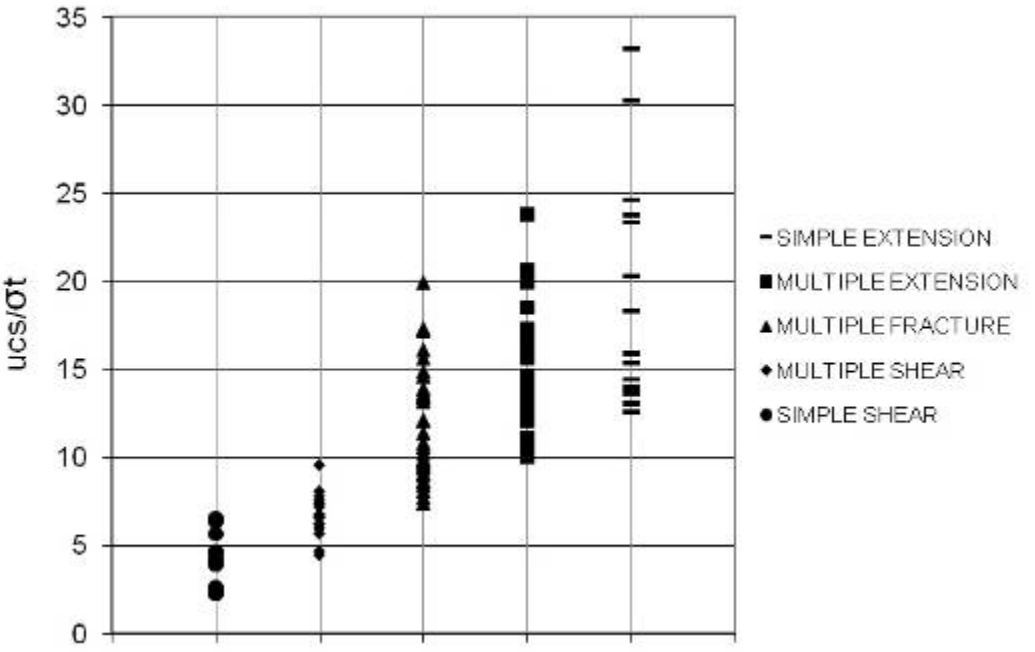
نتیجه‌ی بررسی‌های این تحقیق نشان می‌دهد که در شکست نوع کششی ساده، میانگین نسبت مقاومت تراکمی تک محوره به مقاومت کششی ۱: ۱۸/۷۲ می‌باشد. همان‌طور که در بخش‌های قبلی اشاره شد در این حالت مقاومت به دست آمده، معادل مقاومت تراکمی تک محوره‌ی ماده‌ی سنگ با تأثیر بسیار کم ریزشکستگی‌ها می‌باشد.



شکل ۹- ساختار ماتریس گسیختگی نمونه‌های استوانه‌ای تحت اعمال تنش تراکمی تک محوره (Szwedzicki, 2007)

شکل۱۰- نمونه‌هایی از اشکال مختلف سطح گسیختگی به دست آمده در آزمون‌های تراکمی تک محوره

در گسیختگی کششی چندتایی این نسبت کمتر از حالت قبل و دارای مقدار میانگین ۱ : ١٤ می‌باشد. این در حالی‌است که درگسیختگی نوع خردشوندگی که به دلیل وجود ناپیوستگی‌ها و ریزشکستگی‌هایی با جهت‌یابی‌های مختلف در نمونه‌ها به‌وقوع می‌پیوندد، میانگین این نسبت به۱: ۱۲ کاهش می‌یابد.
در مواقعی که جهت ریزشکستگی‌ها با جهت محور بارگذاری، زاویه ساخته و مورب می‌باشند، گسیختگی از نوع گسیختگی برشی چندتایی به‌وقوع می‌پیوندد که نسبت مقاومت تک محوره به مقاومت کششی دراین حالت دارای مقدار میانگین ۱ : ٦/٧٥ می باشد.
در نهایت، درحالتی که یک سطح ناپیوستگی مشخص و به صورت مورب با محور بارگذاری در نمونه حضور دارد، گسیختگی از نوع گسیختگی برشی ساده به‌وقوع می پیوندد و مقاومت به دست آمده به هیچ عنوان معرف مقاومت پیکره‌ی سنگ نمی‌باشد. میانگین مقاومت تراکمی تک محوره به مقاومت کششی دراین حالت ۱: ٤ می‌باشد.
از مطالب فوق به خوبی می‌توان نتیجه گرفت که نسبت‌های بالای مقاومت تراکمی تک محوره به مقاومت کششی معرف تأثیر کمتر ریزشکستگی‌ها بر نتایج مقاومت تراکمی تک محوره می‌باشد و هر قدر این نسبت کاهش پیدا کند تأثیر ریزشکستگی‌ها افزایش می‌یابد. برای ماسه‌سنگ‌های سازند شمشک (نمونه‌های این تحقیق) میانگین نسبت مقاومت تراکمی تک محوره به مقاومت کششی در گسیختگی نوع یک، ۱۸/۷ و در گسیختگی نوع پنج، ۳/۹ می‌باشد.
در شکل ۱۱ نحوه‌ی توزیع مقادیر مقاومت تراکمی تک محوره به مقاومت کششی در ۵ نوع گسیختگی، نشان داده شده است. درشکل ۱۲ نیز مقادیر حداکثر، میانگین و حداقل نسبت‌های مقاومت تراکمی تک محوره به مقاومت کششی پنج نوع گسیختگی معرفی شده در شکل ۳ ارائه شده است.
همان‌طور که در شکل ۱۲ مشخص است، حداکثر مقدار نسبت مقاومت فشارشی به مقاومت کششی ٣٥/١:٤ در گسیختگی نوع ۱ یعنی گسیختگی نوع کششی ساده حاصل شده است و حداقل مقدار آن یعنی نسبت ۲/۱:۳ در گسیختگی نوع برشی ساده به دست آمده است.
لازم به ذکر است ازمجموع ١٤٤ نمونه مورد آزمایش در این تحقیق، ۱۷/۳ درصد دارای گسیختگی نوع یک، ٢٣/٦ درصد دارای گسیختگی نوع دو، ۲۹/۹ درصد دارای گسیختگی نوع



شکل ۱۱- پراکندگی مقادیر نسبت مقاومت تراکمی تک محوره به مقاومت کششی در انواع مختلف گسیختگی

سه، ١٣/٤ درصد دارای گسیختگی نوع چهار و ١٥/٧ درصد دارای گسیختگی نوع پنج می‌باشند. از مطالبی که در بخش توصیف انواع شکست ارائه گردید، می‌توان نتیجه گرفت که نتایج مربوط به شکست نوع یک، معرف مقاومت تراکمی تک محوره‌ی ماده‌ی سنگ (هدف آزمون‌های تراکمی تک محوره) می‌باشد و نتایج مربوط به انواع دیگر اشکال شکست به دلیل تأثیر ریزشکستگی‌ها بر شکست نمونه دارای مقادیری انحراف از مقاومت ماده‌ی سنگ می‌باشد. به عبارت دیگر مطابق شکل١٣، مقاومت تراکمی تک محوره‌ی نمونه‌هایی با شکل شکست نوع دو، ١٠ درصد از مقاومت ماده‌ی سنگ کمتر است این در حالی‌است که این مقدار برای شکست نوع سه ٢١/٩ درصد، شکست نوع چهار، ٤٢/٧ درصد و شکست نوع پنج بالغ بر ٧٤ درصد است. تفاوت در مقاومت تراکمی تک محوره‌ی شکست نوع دو با شکست نوع یک، مطابق شکل ١٣، به مقدار ١٨ مگاپاسکال و در شکست نوع سه، ٣٩ مگاپاسکال می‌باشد. در اشکال شکست نوع چهار و پنج تفاوت در میانگین مقاومت تراکمی تک محوره با میانگین مقاومت تراکمی تک محوره‌ی شکست نوع یک به عنوان شکل شکست شاخص تراکم تک محوره به ترتیب ٧٦ و ١٣٢ مگاپاسکال می‌باشد. بنابراین اعداد و ارقام فوق بیان کننده‌ی میزان اعتبار نتایج حاصل از آزمون‌های تراکمی تک محوره بر اساس میزان تأثیر ریزشکستگی‌ها به عنوان یک عامل مهم تأثیرگذار بر نتایج می‌باشد. تصمیم‌گیری در خصوص اینکه نتایج حاصل از کدام یک از سطوح شکست معرفی شده مورد استفاده قرار گیرد به هدف و دقت کار بستگی دارد. برای مثال در مقاصد عملی مشاهده می‌شود که دامنه‌ی مقاومت تراکمی تک محوره سنگ‌هایی که در یک گروه جای می‌گیرند (سنگ‌های مقاوم موضوع این تحقیق) از ٢٠ تا بیش از ١٥٠ مگاپاسکال می‌باشد (در طبقه‌بندی ISRM گروه ٢٥ تا ٥٠ مگاپاسکال رده‌ی سنگ‌های نسبتاً مقاوم، ٥٠ تا ١٠٠ مگاپاسکال رده‌ی سنگ‌های مقاوم و ١٠٠–٢٥٠ مگاپاسکال رده‌ی سنگ‌های بسیار مقاوم را تشکیل می‌دهند). بنابراین در مقاصد عملی به دلیل اینکه همواره دامنه‌ای از مقادیر مقاومت تراکمی تک محوره‌ی سنگ در محاسبات و طراحی‌ها لحاظ می‌گردد و این دامنه برای نمونه‌های مقاوم (با مقاومت بیش از ٥٠ مگاپاسکال) بیش از ٥٠ مگاپاسکال می‌باشد و از طرفی تفاوت میانگین مقاومت تراکمی تک محوره در گسیختگی نوع یک و سه کمتر از ٤٠ مگاپاسکال است، می‌توان از داده‌های مربوط به آزمون‌هایی که دارای شکل گسیختگی نوع یک، دو و سه هستند، استفاده کرده و آنها را معتبر دانست و نتایج حاصل از آزمون‌هایی که شکل شکست نوع چهار و پنج را دارند در هر صورت مردود می‌باشد. بررسی نتایج آزمایش‌های این تحقیق نشان می‌دهد که تنها ٤١ درصد (گسیختگی‌های نوع یک و دو)، نتایج نمونه‌های این تحقیق دارای مقادیر مقاومت تراکمی تک محوره‌ی معرف مقاومت ماده‌ی سنگ یا نزدیک به آن می‌باشد و حدود ٣٠ درصد نتایج، جواب‌های غیر قابل قبول برای مقاومت ماده‌ی سنگ به دست می‌دهند (گسیختگی‌های نوع چهار و پنج). به عبارت دیگر حدود ٧٠ درصد نتایج برای تجارب عملی قابل استفاده می‌باشد و مهم جدا کردن ٣٠ درصد داده‌ی غیر قابل قبول یعنی داده‌های مربوط به آزمون‌هایی که شکل شکست نوع چهار و پنج (شکست‌های برشی) را دارا هستند، می‌باشد.

نکته‌ی قابل ذکر دیگر اینکه شکست تنها ١٧/٣ درصد نمونه‌ها بدون تأثیر و یا دارای حداقل تأثیر از ریزشکستگی‌ها می‌باشد و شکست بیش از ٨٦ درصد نمونه‌ها متأثر از حضور ریزشکستگی‌ها می‌باشد. در اینجا نیز اهمیت توجه به ریزشکستگی‌ها در آزمون‌های تراکمی تک محوره تا حدود زیادی روشن می‌گردد.

از آنجایی که مقادیر مقاومت تراکمی تک محوره‌ی سنگ‌ها اغلب تغییرات وسیعی را در یک جمعیت از نمونه‌ها نشان می‌دهند، عموماً این تغییرات مشکلات زیادی را در انتخاب مقادیر واقعی مقاومت تراکمی تک محوره سنگ بکر ایجاد می‌کند. استفاده از روش‌های آماری نیازمند داشتن تعداد زیادی داده با توزیع آماری مشخص برای شناسایی داده‌های پرت از داده‌های معتبر می‌باشد که حتی در صورت امکان انجام تعداد زیادی آزمایش، هزینه‌های زیادی به طرح یا پروژه وارد خواهد گردید که در این تحقیق برای رفع این مشکل معیار مناسبی جهت انتخاب مقادیر واقعی مقاومت تراکمی

تک محوره و نیز قضاوت راجع به درجه صحت نتایج با توجه به شکل شکست نمونه‌ها در ضمن بارگذاری تک محوره با معرفی میزان اعتبار نتایج مربوط به هر سطح شکست، ارائه گردید. در مواقعی که شکل شکست نمونه در اختیار نباشد، می‌توان با استفاده از نسبت مقاومت تراکمی تک محوره به مقاومت کششی در خصوص میزان اعتبار نتایج قضاوت کرده و نسبت به انتخاب داده‌های مناسب با توجه به هدف کار اقدام نمود. بدین ترتیب که در شکست نوع یک مطابق شکل ۱۲ میانگین نسبت فوق‌الذکر ۱۸/۷ بوده و در دو نوع شکستی که در هر صورت نتایج آنها به عنوان نتایج غیر معتبر معرفی گردید، این نسبت ٦/۸ و ۳/۹ می‌باشد. به عبارت دیگر با توجه به توضیحاتی که در بالا ارائه گردید، در مقاصد عملی نتایجی دارای اعتبار می‌باشند که نسبت مقاومت تراکمی تک محوره به مقاومت کششی آنها بیش از ۱۰ باشد و هر قدر این نسبت افزایش پیدا می‌کند، درجه‌ی اعتبار با کاهش تأثیر ریزشکستگی‌ها بر نتایج، افزایش می‌یابد.

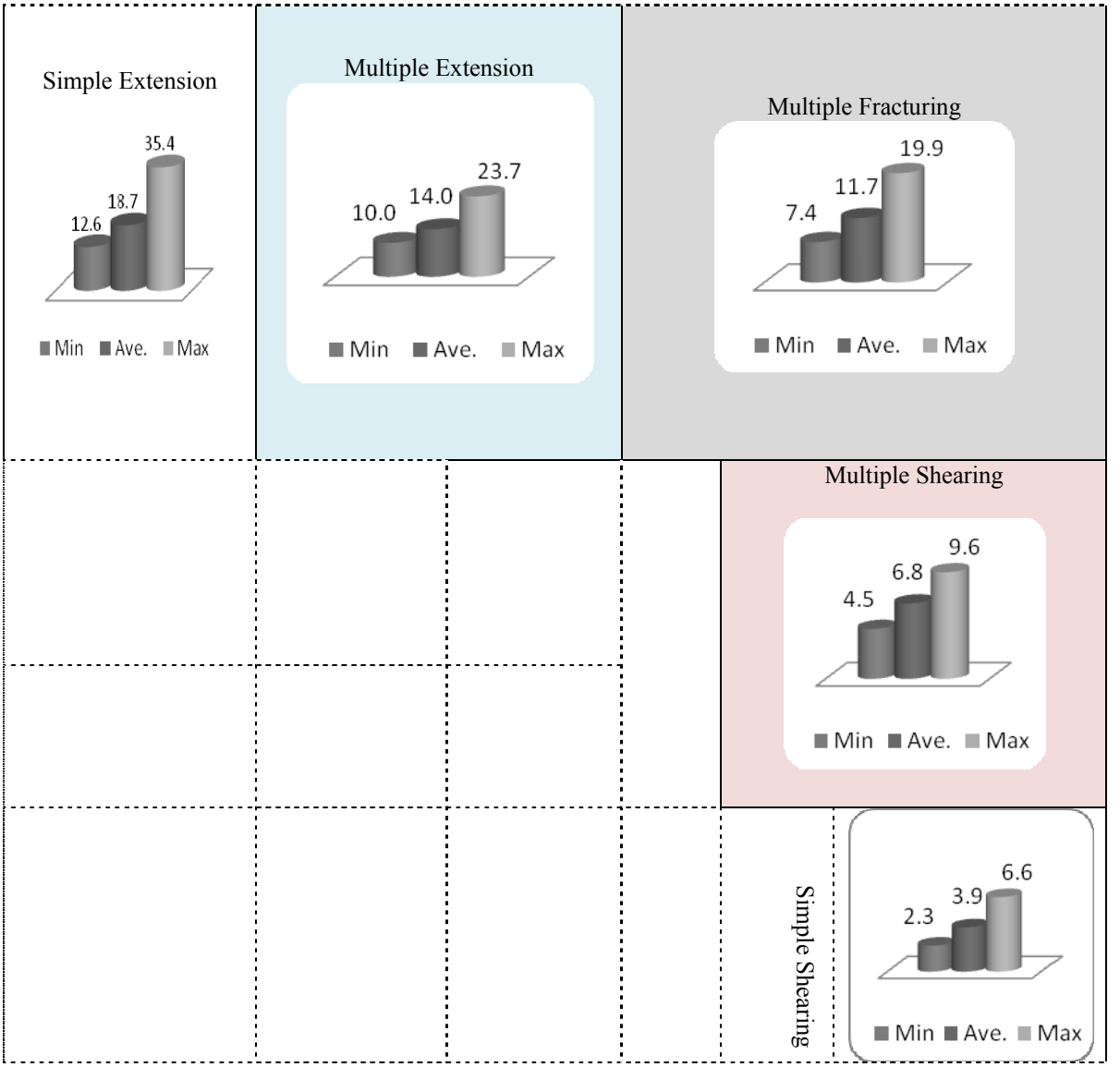
مطابق شکل۱۳ برای نمونه‌های ماسه سنگ مورد استفاده در این تحقیق، میانگین مقاومت تراکمی تک محوره در گسیختگی نوع کششی ساده، ۱۷۸ مگاپاسکال، در شکست نوع‌دو، ۱٦۰ مگاپاسکال، در شکست نوع سه، ۱۳۹ مگاپاسکال، درشکست نوع چهار، ۱۰۲ مگاپاسکال و در نهایت در حالت شکست برشی ساده این مقدار ٤٦ مگاپاسکال می‌باشد.

نتیجه‌گیری

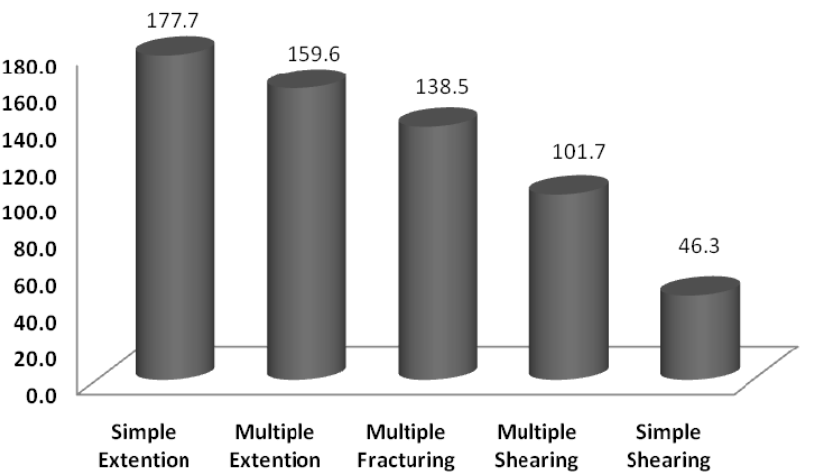
۱- شکل شکست خاص آزمون‌های تراکمی تک محوره، شکست کششی ساده (دو نیمه شدن در امتداد محور بارگذاری) می‌باشد و انحراف از این شکل مؤید تأثیر عوامل خارجی بر شکست نمونه می‌باشد. سه عامل اصلی تغییر شکل گسیختگی در تراکم تک محوره عبارتست از: عدم توازی دو انتهای نمونه، اصطکاک زیاد صفحات بارگذاری و سطح نمونه و ریزترک‌ها یا ریزشکستگی‌ها. در صورت رعایت تمام شرایط لازم برای تهیه‌ی نمونه‌ی مناسب و کاهش اصطکاک صفحات بارگذاری و سطوح جانبی نمونه، ریز شکستگی‌ها مهم‌ترین عامل در تغییر شکل شکست از شکل شاخص آن می‌باشد.

۲- بررسی‌های این تحقیق نشان داد که نتایج مربوط به اشکال مختلف شکست دارای تفاوت‌های معنی‌داری با نتایج حاصل از شکست شاخص و تیپیک بارگذاری تراکمی تک محوره می‌باشد که این تفاوت‌ها در اشکال شکست نوع چهار و پنج (شکست‌های برشی چندتایی و برشی ساده) قابل توجه می‌باشند. این تفاوت در شکست نوع برشی چندتایی ٤۲/۷ درصد و شکست نوع برشی ساده، بالغ بر ۷٤ درصد نسبت به شکست نوع کششی ساده می‌باشد. در حالیکه در دو نوع شکست دیگر تفاوت حداکثر ۲۰ درصد است. بنابراین با در اختیار داشتن اشکال شکست، آزمون‌های تراکمی تک محوره به راحتی می‌توان نسبت به درجه‌ی اعتبار نتایج حاصل از آنها و انتخاب داده‌های مناسب با توجه به هدف بررسی و دقت مورد نیاز، قضاوت نمود.

۳- در صورتی‌که اشکال شکست آزمایش‌ها در اختیار نباشد، با استفاده از نسبت مقاومت تراکمی تک محوره به مقاومت کششی می‌توان نسبت به انتخاب داده‌های معتبر آزمون‌های تراکمی تک محوره اقدام نمود. به این ترتیب‌که برای اهدافی که دقت بالای داده‌ها مد نظر می‌باشد (نظیر کارهای تحقیقاتی)، نتایج مربوط به نسبت‌های بیش از ۱۵ دارای درجه‌ی اعتبار لازم می‌باشند در حالی‌که برای مقاصد عملی، نتایج مربوط به نسبت‌های بیش از ۱۰ معتبر بوده و با افزایش نسبت فوق درجه‌ی اعتبار نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۱۲- مقادیر حداقل، میانگین و حداکثر نسبت مقاومت تراکمی تک محوره به مقاومت کششی در انواع مختلف گسیختگی



شکل ۱۳- مقادیر میانگین مقاومت تراکمی تک محوره (برحسب مگاپاسکال) درانواع مختلف گسیختگی در آزمایش‌های تراکمی تک‌محوره

سپاسگزاری

این تحقیق با حمایت‌های تجهیزاتی و مالی دانشگاه تربیت مدرس و همکاری شرکت توسعه‌ی منابع آب و نیروی ایران به انجام رسیده است لذا از تمامی عزیزانی که همکاری صمیمانه‌ای را در انجام این تحقیق داشته اند، بی نهایت سپاسگزاری می‌نماید.

منابع

ASTM (American society for testing and materials) (2000) Standard test method for elastic moduli of Undrained Intact Rock Core Specimens in Triaxial Compression without Pore Pressure Measurement, Designation D 5407-95.

Fairhurst, C. and Cook, N. G. W. (1966) The phenomenon of rock splitting parallel to the direction of maximum compression in the neighbourhood of a surface, in Proceedings 1st Congress ISRM, Vol 1, 687-690 (ISRM: Lisbon).

Farmer, I. W., Kemeny, J. M. (1992) Deficiencies in rock test data. In: Proc., Int Symp. Eurock '92, London, 298–303.

Folk, R. L. (1980) Petrology of sedimentary rocks. Austin Texas, Hemphill's bookstore, pp. 182.

Gramberg, J. (1989) A non-conventional view on rock mechanics. Balkema, Rotterdam.

Hoek, E. and Brown, E. T. (1980) Underground Excavations in Rock, (Institution of Mining and Metallurgy: London).

Horii, H. and Nemat-Naser, S. (1985) Compression-induced microcracks growth in brittle solids: axial splitting and shear failure, Journal of Geophysical Research, 90(B4): 3105 - 3125.

Hudson, J. A., Harrison, J. P. (1997) Engineering rock mechanics. Pergamon, Oxford.

ISRM Suggested Method (1978) Suggested method for determining compressive strength of rock material, International Journal of Rock Mechanics. A Min Sci Geomech, Abst, 15(3):1978.

ISRM Suggested Method (1979) Suggested Method for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Material, International Journal Rock Mechanics, A Min Sci Geomech Abst, 12(2):1979.

Jumikis, A. R. (1983) Rock Mechanics, (Trans Tech Publications:).

Paul, B. and Gangal, M. (1966) Initial and subsequent fracture curves for biaxial compression of brittle materials, in Proceedings 8th US Symposium on Rock Mechanics, 131-141.

Peng, S., Johnson, A. M. (1972) Crack growth and faulting in cylindrical specimen of chemsford granite. In: J. Rock Mech. Min. Sci. 9,37–86.

Reinhart, J. S. (1966) Fracture of rocks, Internatioal Journal of Fracture Mechanics, Vol 2.

Szwedzicki,T.(2007) A Hypothesis on Modes of Failure of Rock Samples Tested in Uniaxial Compression. Int RockMech.RockEngng. 40(1),97–104.

Szwedzicki, T., Shamu, W. (1999) The effect of material discontinuities on strength of rock samples. In: Proc., Australasian Institute of Mining and Metallurgy. 304(1), 23–28.

Szwedzicki, T. and Donald, D. (1996) Assessment of mechanical parameters of rock using an indentation test, in Proceedings Annual Conference (The Australaian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).

Vutukuri, V. S., Lama, R. D. and Saluja, S. S.(1974) Handbook on Mechanical Properties of Rock, Vol 1 (Trans Tech Publications).