

معرفی دستگاه بارگذاری بر خرده ذرات منفرد و بررسی تکرارپذیری نتایج

اکبر چشمی^{*۱}، ابراهیم احمدی ششده^۲، عباس قلندرزاده^۳

پذیرش مقاله: ۹۲/۰۳/۰۷

دریافت مقاله: ۹۱/۰۲/۱۳

چکیده

یکی از روش‌های ارزیابی ویژگی‌های مقاومتی سنگ بکر، بررسی مقاومت خرده ذرات مربوط به آن سنگ در قالب آزمایش‌های بارگذاری مستقیم بر نمونه و آزمایش نفوذ استاتیک است. در این تحقیق ضمن معرفی دستگاه طراحی و ساخته شده، به تشریح بخش‌ها و عملکرد دستگاه بارگذاری بر خرده ذرات مجزا پرداخته و تکرارپذیری نتایج به دست آمده از آزمایش‌های بارگذاری و نفوذ استاتیکی بر نمونه‌های همگن، بررسی و نمودارهای رفتاری مربوط به آنها رسم شده است. تصویربرداری از شکل ذرات قبل و بعد از آزمایش صورت گرفته و مکانیسم شکست ذرات مربوطه بررسی شده است. جهت بررسی تکرارپذیری نتایج استخراج شده از دستگاه طراحی شده، در تمامی آزمایش‌ها، همخوانی نتایج و شباهت رفتاری ذرات آزمایش شده در قالب نمودارهای رفتار جمعی نمایش داده شده و درجه اعتبار نتایج به دست آمده با استفاده از تئوری کاهش نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور ارزیابی کارایی دستگاه و نتایج به دست آمده در تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ، بین نتایج مربوط به ۴۸۰ آزمایش بارگذاری بر خرده ذرات آهکی میکرایتی و مقاومت فشاری تک‌محوری آنها همبستگی برقرار شده است. همبستگی‌های برقرار شده با ضرایب تعیین بزرگ تر از ۰/۸۳ نشان‌دهنده کاربردی بودن نتایج به دست آمده از دستگاه در تخمین غیر مستقیم مقاومت فشاری تک‌محوری با استفاده از خرده ذرات مجزای سنگی می‌باشد.

کلید واژه‌ها: آزمایش نفوذ استاتیک، تکرارپذیری نتایج، خرده ذرات مجزا، دستگاه بارگذاری، مقاومت فشاری تک‌محوری

۱. استادیار دانشکده زمین‌شناسی دانشگاه تهران a.cheshomi@ut.ac.ir

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده زمین‌شناسی دانشگاه تهران

۳. دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

پیشرفت تکنولوژی همواره لزوم دستیابی به دستگاه‌های آزمایشگاهی نوین جهت گسترش فعالیت‌های پژوهشی در راستای تولید داده‌های علمی دقیق و معتبر را به همراه داشته است. علم مکانیک سنگ به عنوان یکی از زیر شاخه‌های اصلی زمین‌شناسی مهندسی نیز از این اصل مستثنی نبوده است. در سال‌های اخیر آزمایش‌های جدیدی جهت بررسی پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ پیشنهاد شده است. بخشی از این آزمایش‌ها در زمینه‌ی بررسی پارامترهای مقاومتی سنگ و با هدف تعیین مقاومت تک‌محوری سنگ بکر با استفاده از روش‌های غیرمستقیم بوده است. در این میان می‌توان به آزمایش‌های شاخص پانچ بلوکی (Sulukcu and Ulusay, 2001)، شاخص پانچ استوانه‌ای (جعفری و همکاران ۱۳۸۹)، مغزه خفه‌کن (Core strangle test) (Yilmaz, 2009) و آزمایش نفوذ میخ در بلوک سنگی (Kayabali and Selcuk, 2010) اشاره داشت. در تمام روش‌های مذکور سعی بر آن بوده تا با کم‌ترین صرف هزینه و زمان در آماده‌سازی نمونه‌های سنگی و به صورت غیرمستقیم مقاومت تک‌محوری محصور نشده سنگ بکر محاسبه شود. با توجه به این که آزمایش‌های فوق از جمله روش‌های غیرمستقیم در ارزیابی مقاومت تک‌محوری سنگ بکر هستند، ولی به حجم نسبتاً بالایی از نمونه‌ها نیازمندند. تعیین پارامترهای مقاومتی سنگ با استفاده از خرده ذرات مجزا در صورت عدم دسترسی به مغزه حفاری و یا بلوک سنگی می‌تواند به عنوان یک روش غیرمستقیم جایگزین در تعیین پارامترهای مقاومتی سنگ در نظر گرفته شود. استفاده از خرده‌های حفاری در تعیین پارامترهای مقاومتی سنگ در حفاری‌های عمیق چاه‌های نفت، در حین حفاری و قبل از بالا کشیدن مغزه‌های حفاری، تعیین پارامترهای مقاومتی مصالح خرده‌سنگی و سنگ‌های تزئینی بدون نیاز به مغزه‌گیری، ارزیابی سختی سازندهای موجود در مسیر دستگاه‌های حفاری در حین حفاری را به عنوان برخی از جنبه‌های کاربردی این آزمایش می‌توان ذکر کرد.

کوچک بودن ابعاد نمونه در این آزمایش‌ها در اغلب موارد محدودیت‌هایی را به وجود می‌آورد. کاهش اندازه ذرات، کاهش مقاومت نمونه مورد آزمایش را در پی خواهد داشت. در بارگذاری‌های معمول این امر باعث گسیختگی نمونه‌های چند میلی‌متری در مدت زمانی کوتاه می‌شود. در واقع سرعت‌های بارگذاری در آزمایش‌های مرسوم بر چنین نمونه‌هایی به نوعی اعمال نیروی دینامیکی بر آنها محسوب می‌شود. از طرفی در چنین مدت زمان محدودی امکان بررسی دقیق رفتار ذرات در مقابل نیروی اعمالی وجود نخواهد داشت. بنابراین جهت انجام چنین آزمایش‌هایی طراحی سیستم اعمال بار با خصوصیاتی از جمله بارگذاری یکنواخت و قابلیت کنترل بار اعمال شده در مدت زمان مورد نظر ضروری است. نرخ بارگذاری در چنین دستگاه‌های آزمایشگاهی بدین نحو است که نمونه در یک بازه‌ی زمانی مناسب به مقاومت حدی خود برسد به نحوی که نمودار تنش - کرنش مربوطه، به روشنی رفتار نمونه‌ی مورد آزمایش را نمایش دهد. برخی از دستگاه‌های بارگذاری بر خرده ذرات مجزا به صورت سفارشی و با قابلیت اعمال بار و دقت بیشتر طراحی و ساخته می‌شوند. به عنوان مثال ساختار دستگاه بارگذاری بر خرده ذرات مجزا با قابلیت اعمال ۴۰۰۰ کیلونیوتن بار و ۵۰ سانتی‌متر جابه جایی توسط اونلند و سزکزینا (Unland and Szczelina, 2005) مورد بررسی قرار گرفته است. چنین دستگاه‌هایی با قابلیت بارگذاری بر خرده ذرات مجزا در اندازه‌های ۲۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر، تمامی اندازه‌های مورد توجه در آزمایش‌های صنعتی را پوشش می‌دهند. در مورد نمونه‌های بسیار کوچک از دستگاه‌های مجهز به میکروسکوپ‌های الکترونی استفاده می‌شود. با استفاده از این دستگاه‌ها می‌توان بر روی ذراتی کوچکتر از ۱ میکرون آزمایش بارگذاری انجام داد. تغییرات رخ داده در نمونه‌های مورد آزمایش طی فرایند بارگذاری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی مربوطه مشاهده و ثبت می‌شود (Sikong et al., 1990). شایان ذکر است که چنین اطلاعات ارزشمندی در رابطه با رفتار شکننده خرده ذرات مجزا، تنها با استفاده از

۲-۱. واحد اعمال نیرو

اساسی‌ترین بخش دستگاه که آن را از سایر تجهیزات آزمایشگاهی معمول متمایز می‌کند، واحد اعمال نیروی دستگاه می‌باشد. این بخش به گونه‌ای طراحی شده که در بازه زمانی مد نظر میزان نیروی اعمالی مورد نیاز جهت رسیدن مقاومت حدی ذرات با ابعاد $0.5 \mu\text{m}$ تا $5 \mu\text{m}$ میلی‌متر را فراهم می‌کند. خرده ذراتی با چنین ابعاد کوچکی در مقابل نرخ اعمال بار مربوط به سیستم‌های معمول در یک بازه زمانی محدود معادل ۱ تا ۳ ثانیه به مقاومت حدی خود می‌رسند. در چنین مدت زمان کوتاهی امکان ثبت تغییرات رخ داده یا رسم نمودارهای رفتاری (تنش- کرنش) نمونه مورد آزمایش وجود نخواهد داشت.

با این توضیحات سیستم اعمال بار به گونه‌ای طراحی شده که فک‌های بارگذاری دستگاه با سرعتی معادل $0.25 \mu\text{m/s}$ تا $1 \mu\text{m/s}$ در ساعت به هم نزدیک شوند و با نرخ یکنواخت، معادل $0.77 \mu\text{m/s}$ نیوتن در ثانیه به نمونه‌ای صلب نیرو اعمال نماید. از آنجایی که هدف از بارگذاری بر روی نمونه‌های مورد آزمایش بررسی رفتار مواد تحت نیروی اعمالی است، یکنواختی نرخ بارگذاری از اهمیت زیادی برخوردار است. خطی بودن نمودار نرخ بارگذاری در زمان مؤید اعمال بار یکنواخت از دستگاه به نمونه است.

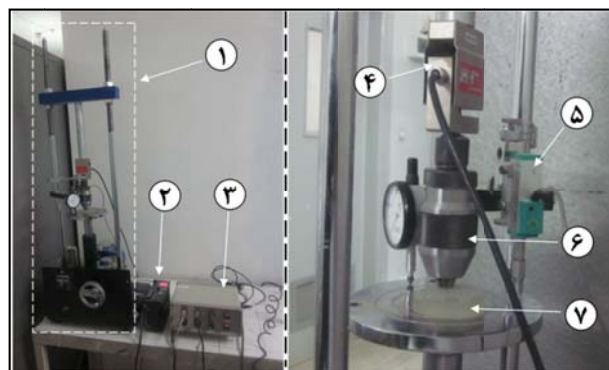
بدنه اصلی دستگاه و فک بارگذاری تا حد امکان، صلب در نظر گرفته شده‌اند تا از تغییر شکل خود سیستم بارگذاری در حین اعمال نیرو به سیستم، جلوگیری به عمل آید. جهت اعمال نیرو به نمونه‌های مورد آزمایش دو نوع فک بارگذاری با قابلیت تعویض، طراحی و ساخته شده‌است. فک بارگذاری بر خرده ذرات مجزا که به صورت مستقیم به نمونه ذرات مورد آزمایش اعمال بار می‌کند. فک نفوذ کننده یا فک سوراخ کننده که با سوزن قابل تعویض به نمونه‌های مورد آزمایش بار مورد نظر را اعمال می‌کند. بخش انتهایی فک بارگذاری و فک سوراخ کننده (محل تماس فک و نمونه) تا حد امکان ساییده و صیقلی شدند تا ناهمواری‌ها و تضاریس موجود در محل تماس فک و نمونه ذرات، کمترین تأثیر را در نتایج آزمایش

دستگاه‌های بسیار پیچیده‌ای به نام نانو نشان‌گذار (Nano indentation machines) که امروزه در علم مواد استفاده‌ی گسترده‌ای پیدا کرده، امکان‌پذیر است (Taylor et al., 2004). به کارگیری نشان‌گذارهایی که دارای سطح تماس هموار و سرعت‌های بارگذاری بسیار ملایم هستند، این دستگاه‌ها را به ادواتی ارزشمند جهت آزمایش بر خرده ذراتی که ابعادی کمتر از $1 \mu\text{m}$ میکرون دارند، تبدیل ساخته است.

در این مقاله ضمن معرفی دستگاه بارگذاری بر خرده ذرات مجزای ساخته شده، تکرارپذیری دستگاه مربوطه با آزمایش بر مواد مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته، رفتار مواد در بارگذاری‌های طولانی مدت بررسی شده و همبستگی پارامترهای مقاومتی مربوط به خرده ذرات مجزا و مقاومت فشاری تک‌محوری مربوط به آنها ارزیابی شده است.

۱. مشخصات دستگاه

دستگاهی که در این تحقیق با نام دستگاه بارگذاری بر خرده ذرات مجزا ساخته شده است، از سه واحد اصلی اعمال نیرو، ثبت داده‌ها و پردازش داده‌ها تشکیل شده است. اجزای اصلی دستگاه ساخته شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

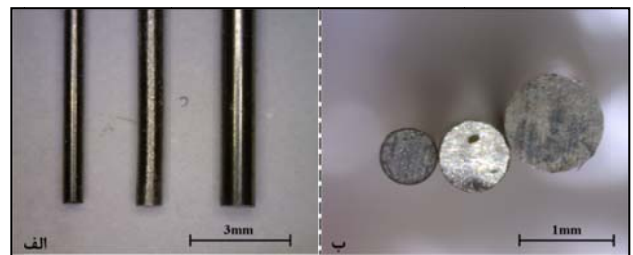


شکل ۱. دستگاه بارگذاری بر خرده ذرات مجزا، (۱) واحد اعمال نیرو، (۲) اینورتور (کنترل سرعت)، (۳) دیتالاگر، (۴) نیروسنج الکترونیکی، (۵) کرنش‌سنج الکترونیکی، (۶) فک گیرنده نفوذ کننده، (۷) نمونه آزمایشی

۲. بارگذاری بر خرده ذرات مجزا و بررسی تکرارپذیری دستگاه

به منظور آشنایی با نحوه عملکرد دستگاه ساخته شده، نحوه رفتار مواد در بارگذاری‌های کند و بررسی تکرارپذیری نتایج به دست آمده، خرده ذرات مختلفی از جمله پلاستیک، نمک و سنگ مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. جهت بررسی تکرارپذیری یک آزمایش بایستی تا حد امکان از ناهمگنی‌های ذاتی مواد کاسته شود. چرا که مواد ناهمگن به ندرت در شرایط یکسان، رفتاری مشابه از خود نشان می‌دهند. بدین منظور می‌توان ذراتی که از لحاظ ترکیبی و ساختاری دارای همگنی نسبی هستند را مورد آزمایش قرار داد. ویژگی‌های نیروی اعمال شده نیز یکی دیگر از فاکتورهای تاثیرگذار بر روند رفتاری یک ماده حتی با فرض همگن بودن آن است. به عنوان مثال رفتار نمک طعام در نرخ بارگذاری بالا در واحد زمان، شکننده و در نرخ‌های پایین خزشی است. هدف از بررسی تکرارپذیری دستگاه نیز اثبات مدل رفتاری یکسان در مواد همگن آزمایش شده در مدت زمان معین و یا کرنشی کنترل شده است. به همین منظور بلورهای مکعب شکل و هم بعد ۲ و ۴ میلی‌متری از نمک طعام بلورین، گلوله‌های پلاستیکی با قطر ۵ میلی‌متر و نمونه‌های کروی و مکعبی شکل با ابعاد ۲، ۳، ۴ میلی‌متر از نوعی سنگ آهک میکرایتی (سنگ آهک آسماری) تهیه شده‌اند. در جدول ۱ خصوصیات مواد آزمایش شده ارائه شده است. خاصیت خزش نمک طعام و گلوله‌های پلاستیکی در نرخ‌های پایین بارگذاری در واحد زمان، امکان بررسی تکرارپذیری الگوی رفتاری این مواد را در کرنش‌های بالا فراهم خواهد ساخت. میزان نیروی اعمالی به نمونه‌ها تا کرنش مد نظر یا نقطه شکست، در آزمایش بارگذاری مستقیم، شاخص مقاومت فشاری خرده ذرات مجزا (Single Compressive Strength Index, SCSI) و در آزمایش نفوذ، شاخص نفوذ استاتیکی در سنگ (Penetration Index, SRPI) نامیده شده است. نحوه بارگذاری در آزمایش‌های بارگذاری مستقیم و نفوذ استاتیک در شکل ۳ نشان داده شده است.

به همراه داشته باشند. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، نفوذ کننده‌های مورد استفاده در فک سوراخ کننده از جنس تنگستن کارباید، با مقطع دایره‌ای، انتهای صاف و با قطری یک میلی‌متر مشابه نمونه استفاده شده توسط متیوس و همکاران (Mateus et al., 2007) بوده است.



شکل ۲. نفوذ کننده‌های به کار رفته در آزمایش نفوذ استاتیک. الف) مقطع طولی و ب) مقطع عرضی

۲-۲. واحدهای ثابت و پردازش داده‌ها

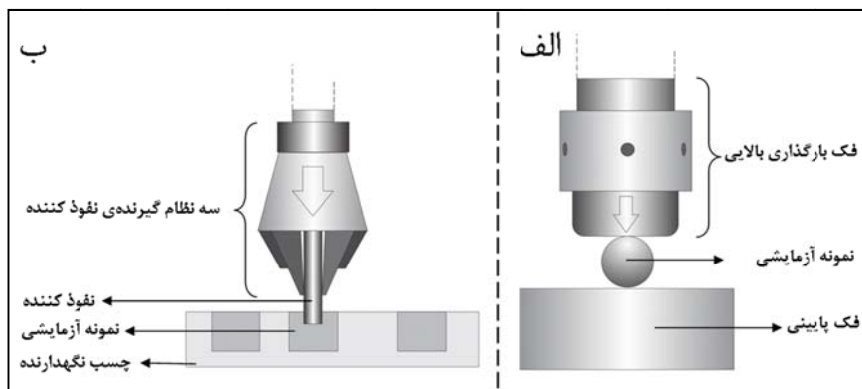
واحد ثبت داده‌ها از یک فشارسنج الکترونیکی با ظرفیت ۲۰۰ کیلوگرم و دقت ۲۰۰ گرم، کرنش‌سنج الکترونیکی با دقت ۱ میکرون و یک گیج قرائت با دقت ۲ میکرون جهت تأیید صحت داده‌های ثبت شده توسط کرنش‌سنج تشکیل شده است. فشارسنج و کرنش‌سنج الکترونیکی به ثبت کننده اصلی متصل شده‌اند. دستگاه ثبت کننده، تغییرات ولتاژ ثبت شده توسط فشارسنج و کرنش‌سنج را به واحد پردازش داده‌ها منتقل می‌کند و واحد پردازش داده‌ها بر اساس همسنجی (کالیبراسیون) انجام شده در فشارسنج و کرنش‌سنج، میزان ولتاژ اعمالی را به نیرو و جابه‌جایی تبدیل کرده، در بازه زمانی معین ثبت می‌کند. با توجه به اندازه کوچک نمونه‌های آزمایشی و سرعت بالای نرخ تغییرات در طول آزمایش، جهت ثبت داده‌ها، بازه زمانی معادل ۵ ثانیه در نظر گرفته شده است. در این حالت هر ۵ ثانیه تغییرات اعمال شده بر نمونه‌های آزمایشی ثبت می‌شود. همسنجی فشارسنج، توسط بارگذاری پله‌ای وزنه‌های دقیق و کرنش‌سنج، با استفاده از گیج قرائت با دقت ۲ میکرون انجام شده است.

جدول ۱. خصوصیات مواد آزمایش شده

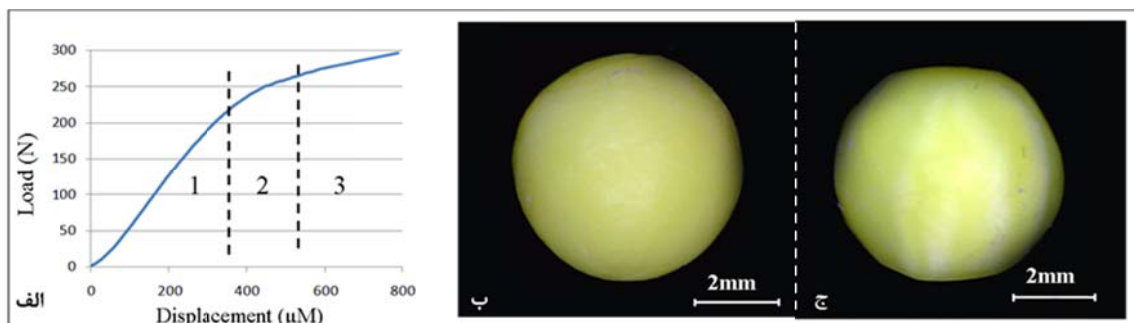
نمونه	وزن مخصوص	شکل نمونه	قطر نمونه
پلاستیک	۲/۱	کروی	۵
بلور نمک	۲/۱۶	مکعب مستطیل	۴
بلور نمک	۲/۱۶	مکعبی	۲
سنگ آهک	۲/۷	کروی	۴،۳،۲
سنگ آهک	۲/۷	مکعبی	۴،۳،۲

گلوله‌های پلاستیکی، گلوله‌های هم قطر و با حداکثر کرویت و حداقل ناهمگنی‌های عینی همانند حفرات ریز و سطوح ناهموار جهت آزمایش بارگذاری انتخاب شدند. از آن جایی که پس از اعمال ۴۰۰ تا ۵۰۰ میکرون کرنش، رفتار گلوله‌های پلاستیکی تحت اعمال بار به صورت یکنواخت، خطی و به صورت خزشی است، آزمایش‌های بارگذاری بر گلوله‌های پلاستیکی با کنترل کرنشی معادل ۱۲ درصد قطر نمونه (۶۰۰ میکرون جابه جایی و ۲۱۶۰ ثانیه بارگذاری) انجام شده است. با توجه به شکل ۴ روند رفتاری گلوله‌های پلاستیکی تحت اعمال بار یکنواخت را می‌توان به سه بخش جداگانه تقسیم نمود. بخش اول نمودار رفتار خطی یا شبه الاستیک، در بخش دوم، رفتار غیر خطی است و نشان دهنده انتقال رفتار الاستیک به پلاستیک می‌باشد و بخش سوم مربوط به رفتار خزش در نمونه‌های پلاستیکی است. رفتار شرح داده شده در مورد همه نمونه‌های پلاستیکی آزمایش شده عمومیت دارد.

۱-۳. آزمایش بارگذاری بر گلوله‌های پلاستیکی
در بین مواد آزمایش شده گلوله‌های پلاستیکی به عنوان نمونه‌های آزمایشی مصنوعی به کار برده شده‌اند. یاشیما و همکاران (Yashima et al., 1979) از شیشه‌های کوارتزی، بیکنم و همکاران (Beekman et al., 2003) از آنزیم‌های چند لایه صنعتی و پیچومانی و همکاران (Pitchumani et al., 2004) از بنزوات سدیم و سلولز میکروکریستالین به عنوان مواد مصنوعی همگن در آزمایش‌های مشابه استفاده کرده‌اند. از بین



شکل ۳. بارگذاری بر خرده ذرات منفرد. الف) بارگذاری مستقیم (SCS)، ب) نفوذ استاتیک (SRP)

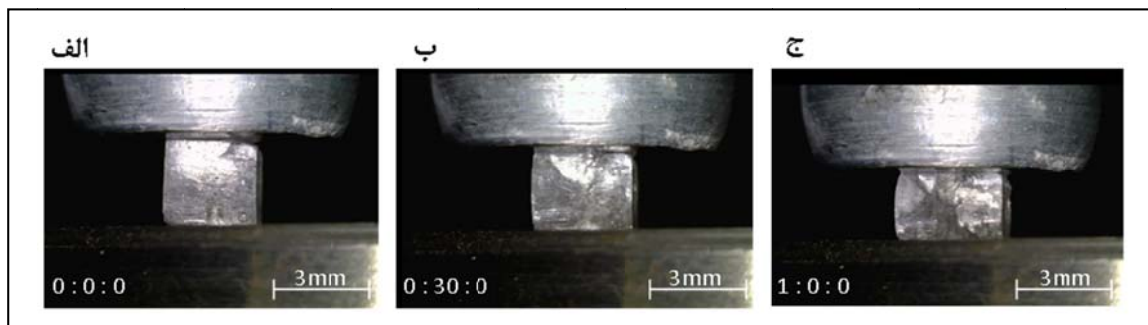


شکل ۴. الف) نمودار رفتاری، ۱) محدوده الاستیک، ۲) محدوده انتقال رفتار الاستیک به پلاستیک (تسلیم) و ۳) محدوده رفتار پلاستیک
ب) گلوله‌ها پلاستیکی قبل و ج) بعد از بارگذاری

۳-۲. آزمایش بارگذاری بر بلورهای نمک

با توجه به رفتار شناخته شده نمک در نرخ بارگذاری پایین (Aubertin et al., 1999)، جهت بررسی تکرارپذیری نتایج در بارگذاری‌های طولانی مدت بر ذرات کوچک، تعداد ۲۰ عدد بلور نمک مکعبی شکل و با ابعاد ۲ میلی‌متر (با دقت ۰/۱ میلی‌متر) آماده گردید. نرخ کرنش اعمالی ۱ میلی‌متر در ساعت بوده و نمونه‌های مربوطه تا کرنشی معادل ۲۰ درصد قطر نمونه (۴۰۰ میکرون کرنش معادل ۱۴۴۰ ثانیه بارگذاری) مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. در شکل ۵ روند بارگذاری بر بلور نمک در دقایق ۰، ۳۰ و ۶۰ نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که پس از ۱ ساعت بارگذاری (۱ میلی‌متر جابه جایی) هیچگونه شکستگی بارزی در نمونه رخ نداده است.

نمودار رفتاری شاخص مربوط به بلورهای بارگذاری شده در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به نمودار، ۳ بخش رفتاری در آن مشاهده می‌شود. بخش اول بارگیری نمونه می‌باشد. در صورتی که بخش بالا و پایین نمونه که در تماس با فک‌های بارگذاری هستند، با یکدیگر موازی نباشند، این قسمت از نمودار قابل مشاهده است. در این حالت بسته به زاویه سطوح نسبت به یکدیگر رفتاری خاص در بخش ابتدایی نمودار مشاهده می‌شود. سایر بخش‌ها مشابه با منحنی رفتاری گلوله‌های پلاستیکی است، با این تفاوت که ورود به فاز پلاستیک در این آزمایش به خوبی آزمایش بارگذاری بر گلوله‌های پلاستیکی مشهود نمی‌باشد. همان‌طور که در شکل ۶ ب و ج مشاهده می‌شود. تغییر شفافیت بلورهای نمک بعد از آزمایش می‌تواند به دلیل بوجود آمدن ریز شکستگی‌ها در آن باشد.



شکل ۵. فک‌های بارگذاری در حال اعمال بار بر بلور نمک ۳ میلی‌متری. الف) قبل از اعمال بار، ب) ۳۰ دقیقه پس از اعمال بار و ج) یک ساعت پس از بارگذاری. بار اعمالی توسط دستگاه طراحی شده به گونه‌ای بر نمونه‌های نمک وارد می‌شود که تحت اعمال بار تنها پدیده‌ی خزش در آنها مشاهده می‌شود

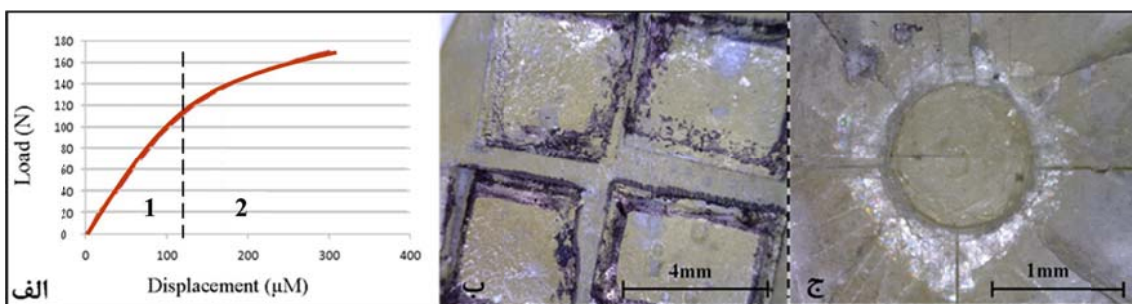


شکل ۶. الف) نمودار رفتاری بلورهای نمک در آزمایش بارگذاری، (ب) بارگیری، (ج) محدوده رفتار شبه الاستیک (۳) محدوده رفتار پلاستیک (ب) بلورهای نمک قبل از بارگذاری و ج) تغییر در شفافیت بلورهای نمک بعد از بارگذاری

۳-۳. آزمایش نفوذ استاتیک در بلورهای نمک

موجود در مقطع، تحت شرایط یکسانی مورد آزمایش نفوذ استاتیکی قرار خواهند گرفت. در این آزمایش، سوزن استوانه‌ای مربوطه با جنس تنگستن کارباید و مقطع دایره‌ای، تا ۳۰۰ میکرون درون نمونه‌ها نفوذ داده شده است. با توجه به شکل ۷ الف، نمودارهای رفتاری بلورهای نمک در آزمایش نفوذ استاتیک دارای دو بخش رفتاری متفاوت است. بخش اول رفتار شبه الاستیک، بخش دوم (بخش غیر خطی نمودار) و مربوط به رفتار پلاستیک یا خزش است.

جهت بررسی تکرارپذیری آزمایش نفوذ استاتیکی، بلورهای نمک با قطر ۴ میلی‌متر در رزین یا چسب مخصوص ثابت شده، سپس آزمایش شده‌اند. از مزیت‌های استفاده از بلورهای نمک در این آزمایش علاوه بر رفتار خزشی، مقاومت کمتر نمک نسبت به چسب نگه‌دارنده آن است؛ چرا که در این حالت کرنش بلور نمک در حین آزمایش تاثیر خاصی بر چسب نگه‌دارنده نخواهد داشت و تمامی بلورهای نمک



شکل ۷. الف) نمودار رفتاری بلورهای نمک در آزمون نفوذ استاتیک، (۱) محدوده رفتار شبه الاستیک (۲) رفتار پلاستیک. ب) بلورهای نمک قبل و ج) بعد از آزمایش نفوذ استاتیک، تغییر در جلای بلور نمک در اطراف محل نفوذ، نشان دهنده ریز شکستگی‌های به وجود آمده در اثر نفوذ استاتیک است.

۳-۴. آزمایش بارگذاری بر سنگ آهک‌های میکرایتی



شکل ۸. خرده‌های سنگ آهکی تهیه شده با ابعاد: الف) ۲ میلی‌متر، ب) ۳ میلی‌متر و ج) ۴ میلی‌متر. نمونه‌های کروی شکل جهت آزمایش بارگذاری مستقیم (SCS) و نمونه‌های مکعبی شکل به منظور آزمایش نفوذ استاتیک (SRP) آماده‌سازی شده‌اند.

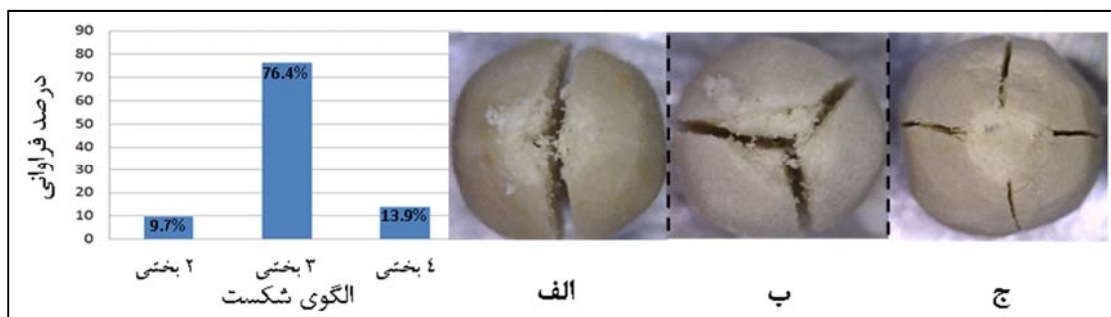
به منظور ارزیابی عملکرد دستگاه در بارگذاری بر مواد شکننده طبیعی و متداول، از خرده‌های مربوط به نوعی سنگ آهک میکرایتی (سنگ آهک آسماری) استفاده شده است. از آن جایی که در بررسی تکرارپذیری نتایج، یکی از فرضیه‌های اصلی مشابه بودن شرایط آزمایش است، بنابراین شکل همه‌ی خرده سنگ‌های آهکی در آزمایش‌های بارگذاری و نفوذ استاتیک به ترتیب کروی و مکعبی بوده و به منظور بررسی اثر اندازه ذرات بر مقاومت، نمونه‌های آهکی مربوط به هر دو آزمایش در اندازه‌های ۲، ۳ و ۴ میلی‌متری آماده شده‌اند. در شکل ۸ نمونه‌های کروی و مکعبی شکل با اندازه‌های ذکر شده جهت آزمایش نشان داده شده است.

است. در شکل ۹-ب و ج تصویر نمونه‌های آهکی قبل و بعد از بارگذاری نشان داده شده است. با توجه به تصاویر تهیه شده از ۶۰ عدد نمونه آزمایش شده بعد از بارگذاری، سه الگوی شکست مشاهده شده است. در شکل ۱۰، الگوهای شکست و درصد فراوانی مربوط به آنها نشان داده شده است. با توجه به شکل، الگوهای شکست دو، سه و چهار بخشی به ترتیب دارای ۹/۷٪، ۷۶/۴٪ و ۱۳/۹٪ فراوانی هستند و الگوی شکست سه بخشی در مورد اکثر خرده سنگ‌های بارگذاری شده مشاهده شده است.

در بارگذاری مستقیم، نمونه‌ها با کرنشی معادل ۱ میلی‌متر در ساعت مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. نمونه‌های ۲، ۳ و ۴ میلی‌متری آهکی در این سرعت بارگذاری به ترتیب به طور متوسط در بازه‌های زمانی ۳، ۷ و ۱۰ دقیقه به نقطه گسیختگی رسیده‌اند. مقاومت نهایی ذرات در آزمایش بارگذاری بر خرده ذرات مجزا در این مقاله، شاخص مقاومت تک ذره (SCSI) نامیده شده است. همان طور که در شکل ۹-الف مشاهده می‌شود، رفتار خرده‌های آهکی به صورت الاستیک خطی



شکل ۹. الف) نمودار رفتاری خرده‌های آهکی در آزمایش بارگذاری. ب) سنگ آهک‌های میکرایتی قبل و ج) بعد از آزمایش بارگذاری

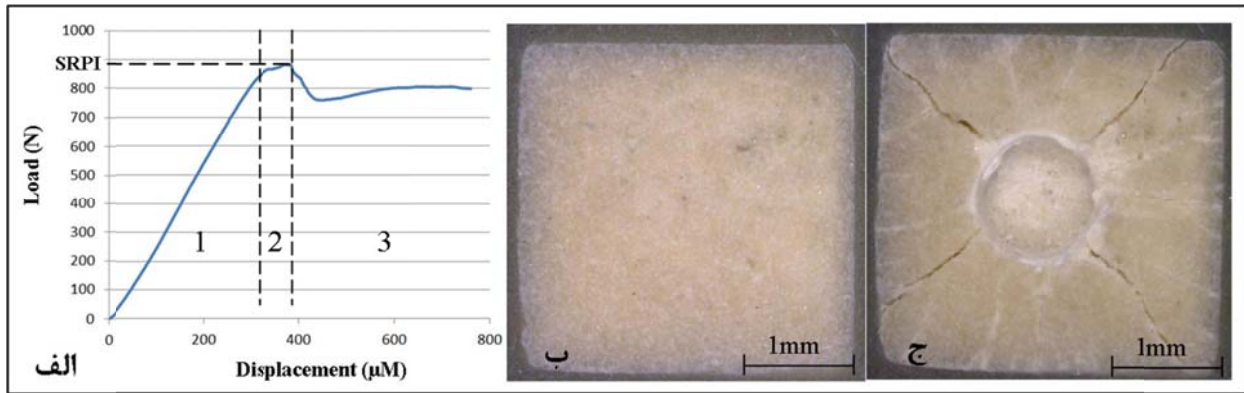


شکل ۱۰. الگوهای شکست و درصد فراوانی مربوط به آنها. الف) الگوی شکست دو بخشی، ب) الگوی شکست سه بخشی و ج) الگوی شکست چهار بخشی

استاتیک قرار گرفته‌اند. نمونه‌های ۲، ۳ و ۴ میلی‌متری به ترتیب تا ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میکرون مورد نفوذ قرار گرفتند و از نمونه‌های آزمایشی قبل و بعد از آزمایش نفوذ تصویر برداری به عمل آمده است. در شکل ۱۱ تصاویر تهیه شده مربوط به یکی از نمونه‌های آزمایشی قبل و بعد از آزمایش و نمودار نیرو - جابه‌جایی مربوطه نشان داده شده است.

۳-۵. آزمایش نفوذ استاتیک در سنگ آهک‌های میکرایتی

به منظور آزمایش نفوذ استاتیک ۳۰ عدد نمونه مکعبی از خرده سنگ‌های آهکی در ابعاد ۲، ۳ و ۴ میلی‌متر در رزین یا چسب مخصوص (با نام تجاری ML506) آماده‌سازی شدند. تمامی نمونه‌های مربوطه با استفاده از نفوذ کننده‌ی استوانه‌ای از جنس تنگستن کارباید با مقطع دایره‌ای، به قطر ۱ میلی‌متر و با نرخ کرنشی معادل ۱ میلی‌متر در ساعت مورد آزمایش نفوذ



شکل ۱۱. الف) نمودار رفتاری سنگ آهک در آزمون نفوذ استاتیک، ۱) محدوده رفتار الاستیک، ۲) محدوده نفوذ ۳) رفتار نمونه بعد از شکست ب) نمونه های آهکی قبل و ج) بعد از آزمایش نفوذ استاتیک، ترک های شعاعی اصلی و فرعی در اطراف محل نفوذ به وضوح مشاهده می شوند.

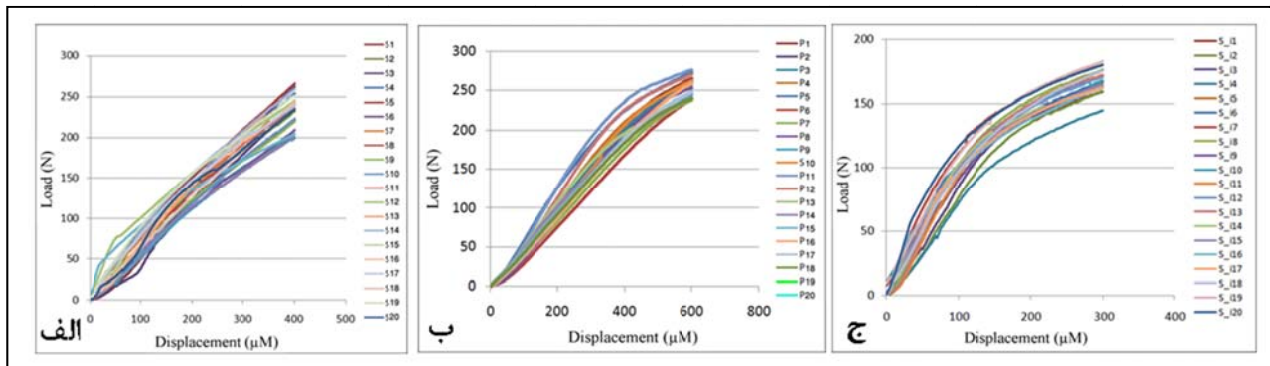
نمودارها گسترده تر خواهد بود و منحنی های رفتاری پراکندگی بیشتری خواهند داشت. شکل ۱۲ نمودارهای رفتار- جمعی مربوط به خرده های آزمایش شده پلاستیک و نمک را نشان می دهد. با توجه به پراکندگی منحنی های رفتاری رسم شده، بیشترین تطابق رفتاری در آزمایش بارگذاری بر گلوله های پلاستیکی مشاهده می شود. آزمایش های نفوذ استاتیک در بلورهای نمک و بارگذاری بر بلورهای نمک در رتبه های بعدی تکرارپذیری رفتاری قرار می گیرند.

نمودارهای رفتار- جمعی مربوط به نمونه های آهکی در بارگذاری مستقیم در شکل ۱۳ نشان داده شده است. با کاهش اندازه ذرات پراکندگی نتایج بیشتر شده، الگوی رفتاری ناهمگن تر به نظر می رسد. با توجه به تغییرات موضعی بافت سنگ در نقاط مختلف یک بلوک سنگی با کوچک تر شدن ابعاد سنگ، تاثیر بافت سنگ بر الگوی رفتاری خرده ذرات مربوطه نمایان تر خواهد بود. از طرفی کنترل پارامتر شکل دانه با کوچک تر شدن اندازه ذرات مشکل تر بوده به همین دلیل ناهمگنی شکل ذرات بارگذاری شده در اندازه های کوچک، عامل موثری در پراکندگی الگوهای رفتاری خواهد بود.

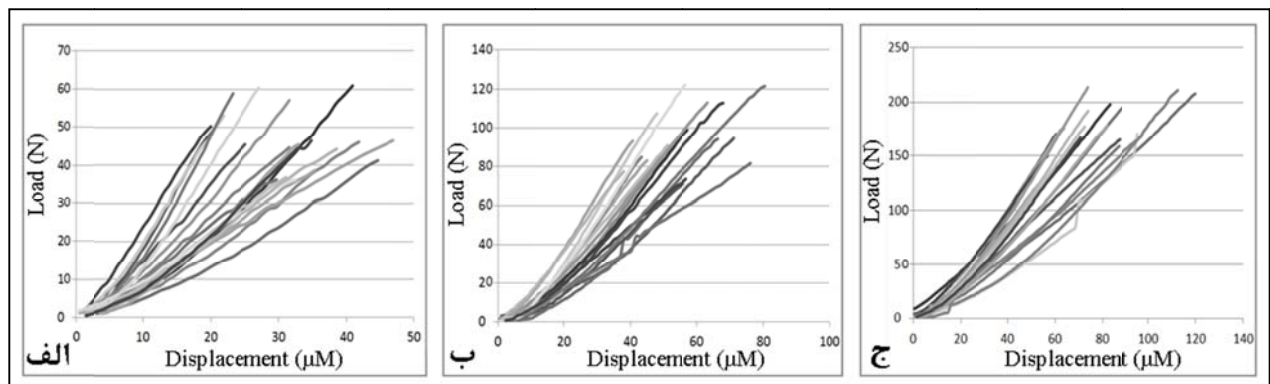
با توجه به شکل بخش ابتدایی نمودار نیرو - جابه جایی مربوط به تغییر شکل الاستیک، بخش دوم تغییر شکل پلاستیک یا آغاز ورود نفوذ کننده در نمونه و بخش انتهایی نمودار مربوط به رفتار نمونه پس از شکست است. با توجه به بخش انتهایی نمودار نیرو- جابجایی مشاهده می شود که منحنی مربوطه به تدریج افت کرده و در نهایت با ادامه روند نفوذ، به مقداری ثابت می رسد. در این حالت نمونه به گسیختگی کامل رسیده و تنها نیروی بازدارنده، فشار جانبی چسب نگهدارنده به نمونه است. میزان نیروی اعمال شده به نمونه تا رسیدن به مرحله گسیختگی یا بخش افتان نمودار در این مقاله، شاخص نفوذ استاتیک (SRPI) نامیده شده است.

۳. بررسی تکرارپذیری نتایج با استفاده از نمودارهای رفتار- جمعی

در این مقاله از نمودارهای رفتار- جمعی به عنوان شاخصی جهت تعیین میزان تکرارپذیری نتایج به دست آمده استفاده شده است. در صورتی که نمونه های آزمایش شده از لحاظ رفتاری دارای تکرارپذیری باشند، مجموعه منحنی های رفتاری آنها در این نمودارها، از روندی مشابه تبعیت خواهند کرد. هر چه تکرارپذیری رفتاری کمتر باشد، بازه رفتاری در این



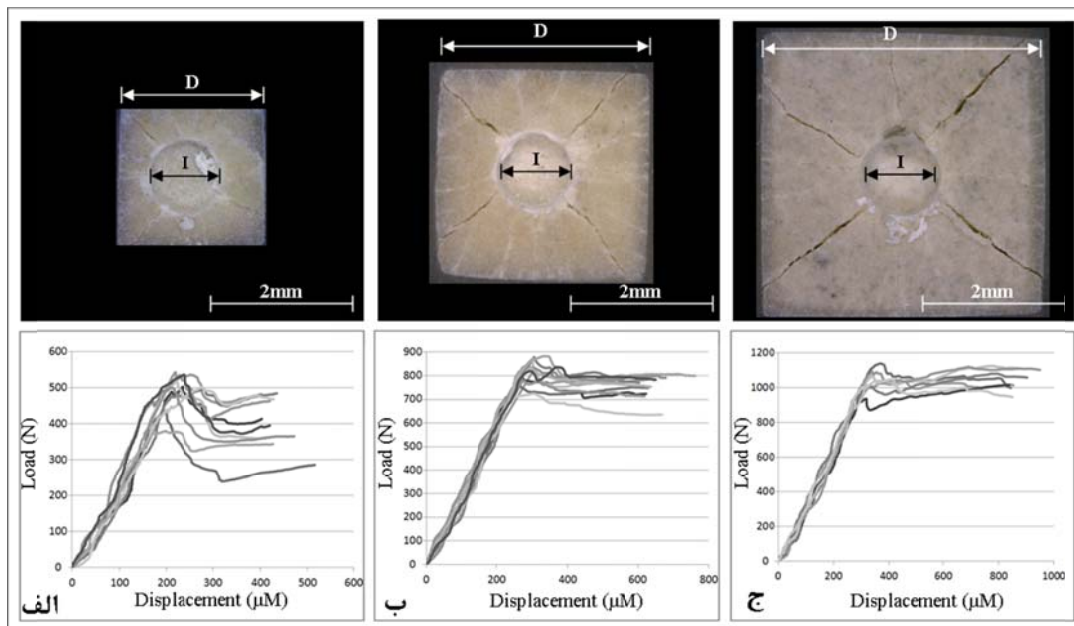
شکل ۱۲. نمودارهای رفتار - جمعی، الف) بارگذاری بر ۲۰ عدد بلورهای نمک، ب) بارگذاری بر ۲۰ عدد گلوله پلاستیکی و ج) نفوذ استاتیک در ۲۰ عدد بلور نمک



شکل ۱۳. نمودارهای رفتار - جمعی مربوط به نمونه‌های آهکی در بارگذاری مستقیم تا لحظه شکست. الف) نمودار مربوط به نمونه‌های ۲ میلی متری، ب) ۳ میلی متری و ج) ۴ میلی متری

مربوط به نفوذ کننده و چسب نگه دارنده همچنین تنوع الگوی شکست در نمونه‌های مختلف، پراکندگی الگوی رفتاری در نمودارهای رفتار - جمعی مشخص تر است. با توجه به این که نسبت قطر سرمه به ابعاد نمونه (I/D) در آزمایش نفوذ عاملی موثر در ادغام تنش‌های اعمالی سرمه و چسب نگه دارنده به نمونه است، با افزایش این نسبت پدیده ادغام تنش نیز تشدید می‌شود. لذا با کاهش ابعاد نمونه، رفتار خرده ذرات پس از شکست از پیچیدگی و ناهمگنی‌های بیشتری برخوردار است.

با توجه به شکل ۱۴، نمودارهای رفتار - جمعی سنگ آهک های میکرایتی در آزمایش نفوذ استاتیک در بخش ابتدایی خود (محدوده رفتار الاستیک) دارای الگوی رفتاری همگن تری نسبت به آزمایش بارگذاری مستقیم هستند. مکانیزم اعمال بار در این آزمایش که تنها سطحی به مساحت $3/14$ میلی متر مربع را مورد نفوذ قرار می‌دهد، بنابراین تغییرات موضعی بافت سنگ تأثیر چندانی در روند رفتاری نمونه‌های آزمایش شده قبل از نفوذ نخواهد داشت. اما پس از مرحله نفوذ (رفتار نمونه پس از شکست) با توجه به پدیده ادغام تنش‌های اعمالی



شکل ۱۴. نمودار رفتار- جمعیتی سنگ آهک میکرایتی مربوط به آزمایش نفوذ استاتیک. الف) نمونه‌های ۲ میلی‌متری با نسبت $I/D = 1/2$ ، ب) نمونه‌های ۳ میلی‌متری با نسبت $I/D = 1/3$ و ج) نمونه‌های ۴ میلی‌متری با نسبت $I/D = 1/4$

۴. بررسی تکرارپذیری نتایج با استفاده از تئوری کاهش تعداد نمونه‌ها

مشخص‌ساختن تعداد نمونه‌های مورد نیاز جهت انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی یکی از دغدغه‌های اصلی متخصصین در زمینه‌ی آزمایش‌های مکانیک سنگ است. جهت بررسی کفایت تعداد نمونه‌های مورد آزمایش، روش‌های مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Park, 1979, Yamaguchi, 1970, Yegulalp et al., 1968, Gill et al., 2005). آن چه در این مقاله حائز اهمیت است استفاده از چنین متدهایی جهت بررسی تکرارپذیری آزمایش‌های انجام شده می‌باشد. هر چه تکرارپذیری بالاتر باشد، تعداد کمتری نمونه‌ی آزمایشی جهت کسب اعتبار علمی مد نظر مورد نیاز است. در بین روش‌های مذکور جهت بررسی اعتبار مورد نیاز، روش گیل و همکاران (Gill et al., 2005) در کاهش تعداد نمونه‌های آزمایشی، مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش جهت ارزیابی اعتبار داده‌های به‌دست آمده، از شاخص دقت استفاده می‌شود که مقدار آن همواره از ۱ بیشتر بوده و از رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$P \geq 1 \quad (1)$$

$$P = \frac{\bar{X} + t_{\beta} \frac{s}{\sqrt{N-1}}}{\bar{X} - t_{\beta} \frac{s}{\sqrt{N-1}}}$$

\bar{X} میانگین حسابی نمونه‌هاست و از رابطه ۲ به دست می‌آید:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^N \frac{X_i}{N} \quad (2)$$

X_i ، ارزش مشاهده شده از N تعداد نمونه‌ی مورد نظر ماست و شاخص دقت در $N = \infty$ برابر ۱ خواهد بود. t_{β} در رابطه (۱)، پارامتری است که ضریب اطمینان مورد نیاز را تعریف می‌کند و s انحراف از معیاری است که پراکندگی ارزش‌های مشاهده شده مربوط به N تعداد از نمونه‌های مورد نظر را تعیین می‌کند و از رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N-1}} \quad (3)$$

(Gill et al., 2005) بوده و اعتبار مورد نیاز جهت فعالیت‌های پژوهشی را دارا می‌باشند. با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده، کم‌ترین و معتبرترین شاخص دقت مربوط به آزمایش بارگذاری بر گلوله‌های پلاستیکی است بدین معنا که این آزمایش از تکرارپذیری بالاتری نسبت به سایر آزمایش‌ها برخوردار است. در یک ارزیابی کلی شاخص‌های دقت مربوط به آزمایش‌های نفوذ استاتیک از آزمایش بارگذاری مستقیم معتبرتر می‌باشند. در هر دو نوع آزمایش با کاهش اندازه خرده ذرات مجزا، اعتبار شاخص دقت مربوطه کاهش یافته و به تعداد بیشتری نمونه جهت انجام آزمایش‌های علمی و معتبر نیاز است.

پروتودیاکونو (Protodyakonov, 1969) و وتوکوری و همکاران (Vutukuri et al., 1974) مقدار $P \leq 1/5$ را به عنوان شاخص دقت مناسب پیشنهاد کردند. گیل و همکاران (Gill et al., 2005) این مقدار را در کارهای معمول مهندسی و فعالیت‌های معدنی با ضریب اطمینان بالا، مورد تأیید قرار داده‌اند و برای کارهای معدنی بلند مدت یا برنامه‌های کاربردی مهندسی عمران مقدار $P \leq 1/35$ و برای فعالیت‌های پژوهشی دقیق $P \leq 1/2$ را به عنوان شاخص دقت مورد پذیرش معرفی نموده‌اند. با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌شود که تمامی شاخص‌های دقت به دست آمده کمتر از مقدار پیشنهادی گیل و همکاران

جدول ۲. داده‌های آماری به دست آمده از نتایج آزمایش‌های بارگذاری بر خرده ذرات مجزا و نفوذ

نمونه و نوع آزمایش	ابعاد نمونه (mm)	میانگین پارامترهای مقاومتی (N)	انحراف معیار	ضریب تغییرات (%)	N*	شاخص دقت
بارگذاری بر گلوله‌های پلاستیکی	۵	۲۵۲/۸۰	۱۲/۲۰	۴/۸۵	۲	۱/۰۴
بارگذاری بر بلورهای نمک	۲	۲۳۴/۵۰	۲۱/۵۰	۹/۱۷	۵	۱/۰۹
نفوذ در بلورهای نمک	۴	۱۶۸/۲۰	۱۰	۵/۹۶	۳	۱/۰۵
بارگذاری بر خرده ذرات سنگی	۲	۴۷/۵۰	۷/۸۸	۱۶/۵۰	۱۶	۱/۱۷
بارگذاری بر خرده ذرات سنگی	۳	۹۱/۴۲	۱۴/۱۲	۱۵/۴۴	۱۴	۱/۱۶
بارگذاری بر خرده ذرات سنگی	۴	۱۷۶/۳۳	۲۸/۸۰	۱۴/۰۶	۱۱	۱/۱۴
نفوذ در خرده ذرات سنگی	۲	۴۹۲/۲۹	۴۸/۳۰	۹/۸۱	۷	۱/۱۶
نفوذ در خرده ذرات سنگی	۳	۸۰۴/۸۶	۵۳/۹۳	۶/۷۰	۴	۱/۱۰
نفوذ در خرده ذرات سنگی	۴	۱۰۵۹/۲۵	۶۵/۳۲	۶/۱۶	۳	۱/۰۹

* تعداد نمونه‌های مورد نیاز به منظور انجام یک آزمایش علمی معتبر

آنالیز پایداری جدار چاه و برنامه‌های توسعه چاه لازم و ضروری است (Mateus et al., 2007). از این رو به منظور تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری می‌توان از همبستگی این پارامتر با شاخص مقاومت فشاری خرده ذرات (SCSI) استفاده کرد تا کارایی دستگاه در زمینه ارزیابی پارامترهای مقاومتی خرده ذرات مجزا به عنوان روشی جدید در تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری نیز مورد ارزیابی قرار گیرد. به منظور توسعه روابط تجربی بین مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ و مقاومت خرده ذرات سنگی، تعداد ۸ نمونه سنگ

۵. ارزیابی همبستگی بین مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) و شاخص مقاومت فشاری خرده ذرات (SCSI)

تعیین مقاومت تک‌محوری محصور نشده (UCS) به عنوان یکی از پارامترهای مکانیکی جهت ارزیابی مقاومت سنگ در بسیاری از پروژه‌های مهندسی لازم است. در برخی از پروژه‌های مهندسی نظیر حفر چاه جهت استخراج مواد هیدروکربوری به دلیل عمق زیاد حفاری، محدودیت‌هایی جهت اخذ نمونه مناسب برای تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری وجود دارد. از طرفی تعیین این پارامتر به منظور

مطالعه اثر اندازه خرده ذرات در همبستگی با مقاومت فشاری تک‌محوری، مطالعه بر روی خرده‌ها، با قطرهای ۲، ۳ و ۴ میلی‌متر انجام شده است. تصویر خرده ذرات بعد از بارگذاری در شکل ۱۵ و نتایج مربوط به آزمایش‌های بارگذاری در جدول ۴ ارائه شده است. به منظور برقراری ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت خرده ذرات مجزا، با سه روش مختلف بین مقادیر UCS و SCSی همبستگی برقرار شده است. زمانی که با استفاده از چند روش مختلف بین پارامترهای اندازه‌گیری شده همبستگی برقرار شود، انتخاب مناسب‌ترین رابطه در مورد تخمین UCS امکان‌پذیر خواهد بود.

آهک میکرایتی از رخنمون‌های سازند آسماری تهیه شده است. مشخصات مربوط به نمونه‌های سنگی در جدول ۳ ارائه شده است.

پس از انجام آزمایش فشاری تک‌محوری بر اساس استاندارد ISRM و تعیین مقادیر UCS آنها، نمونه‌های مذکور خرد گردیده و ۴۸۰ نمونه (۲۰ نمونه در هر اندازه) به عنوان خرده‌های حفاری آماده‌سازی شده است. با استفاده از دستگاه بارگذاری بر خرده ذرات مجزا، شاخص مقاومت فشاری خرده ذرات (SCSI) خرده‌های حفاری تعیین شده است. با توجه به تاثیر شکل خرده ذرات سنگی بر مقاومت آنها، کلیه خرده‌های مطالعه شده به شکل کروی در آورده شده است و به منظور

جدول ۳. مشخصات مربوط به نمونه‌های سنگی

محل نمونه برداری	شناسه نمونه	سازند	سن زمین‌شناختی	نوع سنگ	درصد تخلخل	جرم واحد حجم (g/cm ³)
گلپنجه - خرم آباد	S-1	آسماری	الیگوسن	دولومیکرایت	۲-۳	۲/۶۰
	S-2				<۱	۲/۷۲
	S-4				۵-۶	۲/۶۳
مشگر - خرم آباد	S-3	آسماری	الیگوسن	سنگ آهک میکرایتی	۴-۵	۲/۶۱
	S-5				۲-۳	۲/۶۴
سد ابوالعباس	S-6	آسماری	الیگوسن	سنگ آهک مارنی	۴-۵	۲/۵۳
سد صیدون	S-7	آسماری	الیگوسن	سنگ آهک میکرایتی	۹-۱۲	۲/۳۸
دوان - کازرون	S-8	آسماری	الیگوسن	سنگ آهک میکرایتی	۶-۷	۲/۵۰

جدول ۴. نتایج مربوط به آزمایش‌های بارگذاری

شناسه نمونه	مقاومت فشاری تک‌محوری (MPa)	شاخص مقاومت فشاری خرده ذرات (N)			الگوی شکست غالب
		خرده ذرات ۲ میلی‌متری	خرده ذرات ۳ میلی‌متری	خرده ذرات ۴ میلی‌متری	
S-1	۲۷۲/۸۰	۸۹/۵۰	۱۹۶/۴۰	۳۴۸/۸۰	سه بخشی
S-2	۲۶۲/۹۰	۱۰۸/۴۰	۲۵۹/۱۰	۴۳۰/۵۰	سه بخشی
S-3	۲۲۵/۱۳	۷۹	۱۸۳	۲۴۸/۵۰	سه بخشی
S-4	۱۸۷/۳۵	۴۷/۴۰	۹۱/۴۰	۱۷۷/۲۰	سه بخشی
S-5	۲۲۸/۱۰	۸۵	۱۷۹/۸۰	۳۲۹/۴۰	سه بخشی
S-6	۹۰/۶۰	۳۰	۵۰/۵۰	۹۱/۸۰	دو بخشی
S-7	۳۵/۴۰	۱۹/۱۰	۴۴/۷۰	۵۹/۶۰	سه بخشی
S-8	۱۵۰/۷۰	۴۵/۱۱	۹۷	۱۵۰/۶۹	سه بخشی

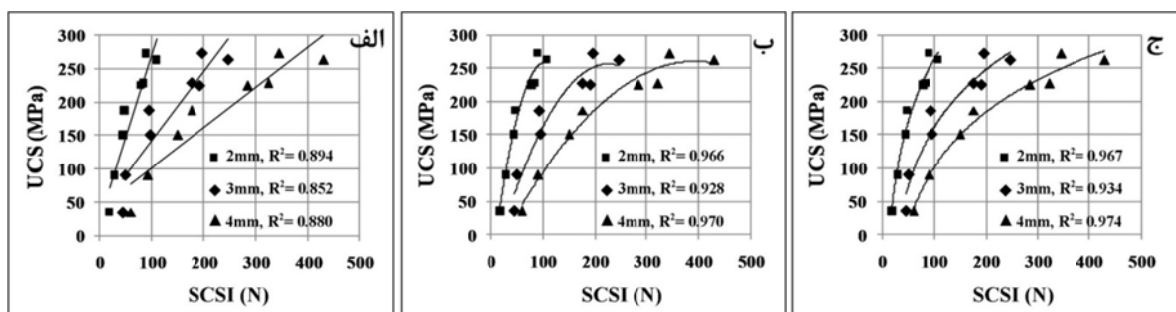


شکل ۱۵. خرده ذرات سنگی اصلاح شده بعد از آزمایش بارگذاری بر خرده ذرات مجزا

همان طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، در هر سه نوع همبستگی به ازای افزایش اندازه خرده ذرات آزمایش شده شیب نمودار مربوطه کاهش یافته است. کاهش شیب نمودارها به دلیل افزایش مقاومت خرده ذرات به ازای افزایش قطر آنها یا به عبارت دیگر همان اثر اندازه خرده ذرات آزمایش شده می‌باشد. بنابراین به ازای هر اندازه، یک رابطه تجربی جهت تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری به دست آمده است. با توجه به این‌که همبستگی‌های مربوطه با استفاده از سه روش مختلف برقرار شده است، بنابراین ۹ رابطه تجربی به دست آمده که در جدول ۵ ارائه شده است.

رینگستال و همکاران (Ringstad et al., 1998) نیز با آزمایش بر روی نمونه‌های سنگی با لیتولوژی‌های مختلف، به این نتیجه رسیدند که بهتر است از چند روش مختلف جهت برقراری همبستگی بین پارامترهای اندازه‌گیری شده استفاده شود.

نتایج مربوط به همبستگی بین مقادیر USC و SCSI مربوط به نمونه‌های اصلاح شده در قالب نمودارهای شکل ۱۶ ارائه شده است. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود، بالاترین ضرایب، مربوط به همبستگی نمایی است و در حالت کلی بیشترین ضرایب تعیین به ترتیب مربوط به نمونه‌های ۴، ۲ و ۳ میلی‌متری بوده و در تمامی موارد دارای مقادیر قابل قبولی هستند.



شکل ۱۶. همبستگی بین مقادیر UCS و SCSI در حالت‌های الف) خطی، ب) درجه دوم و ج) نمایی در مورد ذرات با قطرهای مختلف

جدول ۵. روابط تجربی حاصل از همبستگی بین مقادیر USC و SCSI

نوع همبستگی	قطر ذرات (mm)	رابطه تجربی	ضریب تعیین (R^2)	شماره رابطه
خطی	۲	$UCS = 2.456(SCSI) + 30.87$	۰/۸۹	۴
	۳	$UCS = 0.980(SCSI) + 42.33$	۰/۸۵	۵
	۴	$UCS = 0.587(SCSI) + 40.18$	۰/۸۸	۶
درجه دوم	۲	$UCS = -0.032(SCSI)^2 + 6.484(SCSI) - 66.45$	۰/۹۶	۷
	۳	$UCS = -0.005(SCSI)^2 + 2.488(SCSI) - 41.99$	۰/۹۲	۸
	۴	$UCS = -0.001(SCSI)^2 + 1.406(SCSI) - 35.22$	۰/۹۷	۹
نمایی	۲	$UCS = 135.5 \ln(SCSI) - 357.2$	۰/۹۶	۱۰
	۳	$UCS = 124.6 \ln(SCSI) - 416.6$	۰/۹۳	۱۱
	۴	$UCS = 120.4 \ln(SCSI) - 457.9$	۰/۹۷	۱۲

۶. نتیجه‌گیری

هدف از طراحی دستگاه بارگذاری بر خرده ذرات مجزا، بررسی پارامترهای مقاومتی خرده ذراتی است که آزمایش بر آنها با استفاد از امکانات آزمایشگاهی متداول، امکان پذیر نمی‌باشد. دستگاه مربوطه امکان بررسی دقیق پارامترهای مقاومتی مواد مختلف در اندازه‌های بسیار کوچک، در بارگذاری‌های بلند مدت را برای بخش آزمایشگاهی واحدهای صنعتی، آزمایشگاه‌های دانشگاهی و طرح‌های پژوهشی در گرایش‌هایی که به هر نحوی با علم مواد در ارتباط هستند (متالوژی، مهندسی مواد، مکانیک سنگ، مکانیک خاک، ژئوتکنیک، مهندسی معدن و ...) را امکان پذیر می‌کند. در این مقاله پس از معرفی دستگاه طراحی شده کارایی دستگاه بارگذاری بر خرده ذرات مجزا با آزمایش بر مواد مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته، تکرارپذیری نتایج آزمایش بررسی شده، همبستگی پارامترهای مقاومتی خرده ذرات (SCSI) با مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت نتایج زیر به دست آمده است:

انجام آزمایش با دستگاه ساخته شده بر روی نمونه‌های مصنوعی (گلوله‌های پلاستیکی)، همگن نشان دهنده عملکرد مناسب دستگاه در اعمال نیرو، ثبت داده‌ها و تکرارپذیری بالای نتایج می‌باشد و سرعت پایین بارگذاری در دستگاه طراحی شده امکان بررسی رفتار خرده ذرات در اندازه‌های کوچک را در هنگام اعمال بار فراهم می‌آورد.

با توجه به سرعت پایین بارگذاری، در نمودارهای رفتاری مربوط به گلوله‌های پلاستیکی و بلورهای نمک پس از محدوده تسلیم، تغییرات رخ داده فقط به صورت خزش مشاهده شده و گسیختگی کلی در نمونه‌ها رخ نداده است.

در آزمایش بارگذاری بر سنگ آهک‌های میکرایتی علاوه بر خصوصیات رفتاری، الگوی شکست نیز دارای تکرارپذیری نسبی است و الگوی شکست سه وجهی با $76/4\%$ فراوانی به عنوان الگوی شکست غالب در نظر گرفته شده است.

با کاهش اندازه ذرات، الگوی رفتاری نمونه‌های آزمایش شده ناهمگن‌تر و تکرارپذیری نتایج به دست آمده کم‌تر است.

نمودارهای رفتار جمعی به خوبی تکرارپذیری نتایج مربوط به نمونه‌های آزمایش شده را نشان می‌دهند. با توجه به نمودارهای رفتار جمعی و شاخص‌های دقت، آزمایش‌هایی که از تکرارپذیری رفتاری بیشتری برخوردار هستند، شاخص دقت مربوط به آنها به ۱ نزدیک‌تر بوده و داده‌های آنها از اعتبار بیشتری برخوردارند.

با توجه به توصیه گیل و همکاران (Gill et al., 2005) ضرایب دقت مربوط به نتایج به دست آمده از آزمایش بر خرده ذرات مجزا همگی کمتر از $1/2$ بوده و در محدوده فعالیت‌های پژوهشی قرار می‌گیرند.

با افزایش اندازه خرده سنگ‌های آهکی آزمایش شده، شاخص‌های SCSI و SRPI افزایش یافته است.

در آزمایش نفوذ استاتیک با کاهش نسبت قطر نفوذ کننده به ابعاد نمونه، رفتار خرده ذرات پس از شکست از پیچیدگی و ناهمگنی‌های کمتری برخوردار است و تکرارپذیری نتایج مربوطه بیشتر است.

ضرایب دقت مربوط به آزمایش نفوذ نسبت به آزمایش بارگذاری مستقیم از اعتبار بیشتری برخوردار بوده و به تعداد کمتری نمونه جهت انجام یک آزمایش معتبر علمی نیازمند است.

ضرایب تعیین مربوط به همبستگی بین شاخص مقاومت فشاری خرده ذرات (SCSI) و مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) در تمامی اندازه‌های آزمایش شده (قطرهای ۲، ۳ و ۴ میلی‌متری) دارای مقادیر بالا است ($R^2 > 0.83$) از این رو آزمایش بارگذاری بر خرده ذرات مجزا را می‌توان به عنوان یکی از آزمایش‌های کاربردی در تخمین غیر مستقیم مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ‌های کربناتی با استفاده از خرده‌های حفاری در شرایطی که دسترسی به مغزه‌های سنگی استاندارد یا نمونه‌های سنگی بزرگ مقدور نیست، به کار برد.

با توجه به این که در تحقیق حاضر تنها از نمونه‌های کربناتی به منظور برقراری همبستگی با مقاومت فشاری تک‌محوری استفاده شده است، لذا پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی همبستگی شاخص مقاومت تک ذره و مقاومت فشاری

تشکر و قدردانی

از صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور که در تأمین بخشی از هزینه‌های تحقیق حاضر همکاری نموده‌اند تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

تک‌محوری مربوط به سایر سنگ‌ها از جمله ماسه سنگ و سنگ‌های آذرین نیز مورد بررسی قرار گیرد.

منابع

- جعفری، ا.، نیکودل، م.، احمدی، م.، ۱۳۸۹. ارزیابی ویژگی‌های مقاومتی سنگ‌ها با استفاده از نتایج آزمایش پانچ بلوکی و پانچ استوانه‌ای. مجله علوم دانشگاه تهران، جلد ۳۶، شماره ۱. صفحات ۵۵-۶۶.
- Aubertin, M., Julien, M.R., Servant, S., Gill, D.E., 1999. A rate-dependent model for the ductile behavior of salt rocks. *Canadian Geotechnical Journal*, 36: 660-674.
- Beekman, W.J., Meesters, M.H., Becker, T., Gaertner, A., Gebert, M., Scarlett, B., 2003. Failure mechanism determination for industrial granules using a repeated compression test, *Powder Technology*, 130: 367-376.
- Gill, D.E., Corthesy, R., Leite, M.H., 2005. Determining the minimal number of specimens for laboratory testing of rock properties. *Engineering Geology*, 78: 29-51.
- Kayabali, K., Selcuk, L., 2010. Nailpenetration test for determining the uniaxial compressive strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47: 265-271.
- Mateus, J., Saavedra, N.F., Carrillo, Z., Mateus, D., 2007. Correlation development between indentation parameters and uniaxial compressive strength for colombian sandstones. *C.T.F Cienc. Tecnol. Futuro*, 3(3): 125-136.
- Park, W.J., 1979. On estimation of sample size for testing composite materials. *Journal of Composite Materials*, 13: 219-224.
- Pitchumani, R., Zhupanska, O., Meesters, G.M.H., Scarlett, B., 2004. Measurement and characterization of particle strength using a new robotic compression tester. *Powder Technology*, 143-144: 56-64.
- Protodyakonov, M.M., 1969. Method of determining the strength of rock under uniaxial compression. *Mechanical Properties of Rocks, Academic Sciences, USSR, Transaction, Israel Prog. Sciencer Transactin*, pp. 1-8.
- Ringstad, C., Lofthus, E.B., Sonstebo, E.F., Fjær, E., Zausa, F., and Giin-Fa Fuh., 1998. Prediction of rock parameters from micro-indentation measurements: The effect of sample size. *Society of Petroleum Engineers. Conference paper. Document ID 47313-MS, Trondheim, Norway, July 8-10.*
- Sikong, L., Hashimoto, H. and Yashima S., 1990. Breakage behaviour of fine particles of brittle minerals and coals. *Powder Technology*, 61: 51-57.
- Sulukcu, S., Ulusay, R., 2001. Evaluation of the block punch index test with particular reference to the size effect, failure mechanism and its effectiveness in predicting rock strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38: 1091-1111.
- Taylor, L.J., Papadopoulos, D.G., Dunn, P.J., Bentham, A.C., Mitchell, J.C., Snowden, M.J., 2004. Mechanical characterization of powders using Nano indentation. *Powder Technology*, 179: 143-144.
- Unland, G., Szczelina, P., 2005. Coarse crushing of brittle rocks by compression, *International Journal of Minereral Processing*, 74S: 209-217.
- Vutukuri, U.S., Lama, R.D., Saluja, S.S., 1974. *Handbook on Mechanical Properties of Rocks: Volume I. Testing Techniques and Results*, Trans Tech. Pub. 280 p.
- Yashima, S., Morohashi, S., Saito, F., 1979. Single particle crushing under slow rate of loading. *Science reports of the Research Institute, Tokyo University. Series A, Physics, chemistry and metallurgy*, 28(1): 116-133
- Yamaguchi, U., 1970. The number of test-pieces required to determine the strength of rock, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Geomechanics Abstracts*, 7: 209-227.
- Yegulalp, T.M., Wane, M.T., 1968. Application of extreme values statistics to test data, *Transaction of the Society of Mining Engineers of AIME*, 241: 372-376.
- Yilmaz, I., 2009. A new testing method for indirect determination of the unconfined compressive strength of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46: 1349-1357.