تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ‌آهک میکرایتی با استفاده از آزمایش بارگذاری بر خرده‌ذرات مجزا

*اکبر چشمی، ابراهیم احمدی ششده: دانشگاه تهران، دانشکده علوم

تاریخ: دریافت ۹۱/۲/۲۷ **پذیرش** ۹۱/۸/۱۴

چکیده

تعیین مقاومت تک‌محوره محصور نشده (UCS) به‌عنوان یکی از پارامترهای مکانیکی برای ارزیابی مقاومت سنگ در بسیاری از پروژه‌های مهندسی لازم است. در برخی از پروژه‌های مهندسی نظیر حفر چاه برای استخراج مواد هیدروکربوری به‌دلیل عمق زیاد حفاری، محدودیت‌هایی برای اخذ نمونهٔ مناسب برای تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری وجود دارد. از طرفی تعیین این پارامتر به‌منظور آنالیز پایداری جدار چاه و برنامه‌های توسعهٔ چاه لازم و ضروری است. بدین‌منظور ایدهٔ استفاده از خرده‌های حفاری برای تعیین این پارامتر مطرح شده است. در این مقاله به‌منظور توسعهٔ روابط تجربی بین مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ و مقاومت خرده ذرات، تعداد ۷ نمونه سنگ آهک میکرایتی از رخ‌نمون‌های سازند آسماری تهیه شده و پس از انجام آزمایش فشاری تک‌محوری و تعیین مقادیر UCS آن‌ها، نمونه‌های مذکور خرد شد و ٤٢٠ نمونه به‌عنوان خرده‌های حفاری آماده‌سازی شده است. با استفاده از دستگاه بارگذاری بر خرده ذرات مجزا، مقاومت فشاری تک‌ذره (SCS) خرده‌های حفاری تعیین شده است. با توجه به تأثیر شکل خرده‌ها بر مقاومت آن‌ها، همهٔ خرده‌های بررسی شده به شکل کروی در آمده است و به‌منظور بررسی اثر اندازهٔ خرده بر مقاومت آن‌ها پژوهش بر روی خرده‌ها، با قطرهای ۲، ۳ و ٤ میلی‌متر انجام شده است. با تعریف متغیرهای مقاومت و اندازه، نمودارهایی برای تعیین مقاومت خرده ذرات پشنهاد شده که در آن‌ها اثر اندازهٔ دانه در آزمایش بارگذاری بر ذرات مجزا حذف شده است. ضریب هم‌بستگی بین UCS و SCS در حالت‌های مختلف بیش‌تر از ۰/۹۱ است که نشان‌دهندهٔ هم‌بستگی قابل قبول این دو پارامتر با هم است.

واژه‌های کلیدی: مقاومت تک‌محوره محصور نشده، خرده حفاری، سنگ آهک میکرایتی، سازند آسماری، آزمایش بارگذاری بر خرده ذرات مجزا.

*نویسندهٔ مسئول a.cheshomi@ut.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.3.5]

مقدمه

در صورت عدم دسترسی به مغزهٔ حفاری و یا بلوک سنگی، تعیین پارامترهای مقاومتی سنگ با استفاده از خرده‌های حفاری می‌تواند به‌عنوان یک روش غیرمستقیم جای‌گزین در تعیین پارامترهای مقاومتی سنگ در نظر گرفته شود. مقاومت فشاری تک‌محوره محصور نشده (UCS) به‌عنوان یکی از پارامترهای مکانیکی سنگ برای ارزیابی مقاومت جداره چاه نفت در زمان حفاری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در حین عملیات حفاری مقاومت فشاری تک‌محوره محصور نشده از سایر عوامل تأثیرگذار بر مقاومت جداره چاه همانند جهت، شیب، مدت زمان حفاری و وزن گل حفاری تأثیرگذارتر است [۲]. از سوی دیگر، در سال‌های اخیر استفاده از خرده‌های حفاری برای ارزیابی مقاومت سنگ‌های حفاری شده، هم‌زمان با عملیات حفاری و تعیین پارامترهای مقاومتی مصالح حفاری شده، برای ارزیابی عمل‌کرد و تعیین جنس سرمتهٔ حفاری مورد توجه زیادی قرار گرفته است. از این رو ابداع و به کارگیری روش‌های جدید آزمایشگاهی با ویژگی‌هایی از جمله قابلیت ارزیابی پارامترهای مقاومتی مصالح حفاری شده با استفاده از خرده‌های حفاری و هم‌زمان با عملیات حفاری، سادگی آزمایش‌ها و در عین حال سرعت زیاد آماده‌سازی نمونه‌ها و نتایج قابل قبول و نزدیک به واقعیت، در این زمینه ضروری است. پژوهش بر گسیختگی خردهٔ ذرات مجزا، اساس بسیاری از تحقیقات در زمینهٔ علم مواد را که از سال ۱۹۶۰ در ایالات متحده [۷]–[٤]، آلمان [۱۰]–[۸] و ژاپن [١٤]–[۱۱] شروع شد پایه‌ریزی کرده است. آزمایش بارگذاری بر خردهٔ ذرات مجزا به‌منظور بررسی پدیدهٔ شکست [۱۰]–[۷]، انرژی به‌کار گرفته شده به‌منظور گسیختگی ذرات و ارزیابی انواع مختلف شکست [۸]، [۱۰]، [۱۵]، [١٦]، [۱۷]، بررسی تاثیر پارامترهایی از جمله اندازه، شکل، خصوصیات فیزیکی مواد و نحوهٔ اعمال بار بر ویژگی‌های شکست در خردهٔ ذرات [١٤]، [۱۸]، روابط کاهش اندازه–انرژی [٦]، [۸]، [۱۹]، [۲۰]، ویژگی‌های شکست در مواد برای مدل‌سازی فرایند گسیختگی در آن‌ها [۲۳]–[۲۰] و پاسخ تغییر شکل مواد تحت تنش اعمالی [٢٤] استفاده شده است. یافته‌های بسیاری در مورد مکانیسم شکست ذرات با بررسی شکست خرده ذرات مجزا حاصل شده است و در تحقیقات انجام شده در مورد مدل‌های تئوریک

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.3.5]

بنیادی تعریف شده، اجماع نظر وجود دارد. برای انجام چنین آزمایش‌هایی طراحی سیستم اعمال بار با خصوصیاتی از جمله بارگذاری یک‌نواخت و قابلیت کنترل بار اعمال شده در مدت زمان موردنظر ضروری است. میزان بارگذاری در چنین دستگاه‌های آزمایشگاهی به‌نحوی است که نمونه در یک بازهٔ زمانی مناسب به مقاومت حدی خود برسد به‌نحوی که نمودار نیرو- جابه‌جایی مربوط، به روشنی رفتار نمونهٔ آزمایش شده را تا لحظه شکست و بعد از آن را نمایش دهد.

به‌منظور ارزیابی مقاومت خرده ذرات در این مقاله، آزمایش بارگذاری استاتیک بر خرده ذرات مجزا به‌کار گرفته شده است. مقاومت ٤٢٠ خرده سنگ به‌عنوان خرده‌های حفاری مربوط به هفت نمونه از رخ‌نمون‌های آهک میکرایتی سازند آسماری با استفاده از آزمایش بارگذاری بر خرده ذارت مجزا تعیین شده است. برای بررسی اثر اندازه خرده ذرات بر نتایج و روابط به‌دست آمده، مقاومت خرده ذرات در اندازه‌های ۲، ۳ و ٤ میلی‌متری با هم مقایسه شده است. نتایج به‌دست آمده از آزمایش بارگذاری برخرده ذرات مجزا با آزمایش بارگذاری فشاری تک محوری مقایسه و روابط هم‌بستگی مربوط، ارائه شده است.

تهیه و آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی

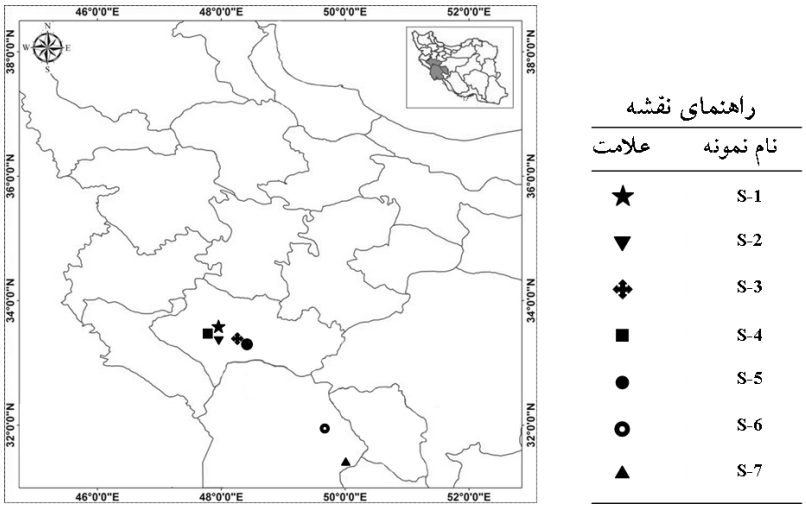
تعداد هفت نمونه سنگ آهک میکرایتی از رخنمون‌های سازند آسماری انتخاب شده و به صورت بلوک‌های سنگی در ابعاد تقریبی ۲۰ در ۲۰ در ٤٠ سانتی‌متر، برای آماده‌سازی به محل آزمایشگاه انتقال داده شده است. محل نمونه‌های انتخاب شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

مغزه‌های سنگی مطابق استاندارد ASTM D4543 آماده‌سازی شده است [۳]. از میان مغزه‌های تهیه شده نمونه‌هایی که دارای شکستگی‌های جزئی بودند حذف و تنها نمونه‌های کاملاً بکر به‌منظور انجام آزمایش فشاری تک‌محوری انتخاب شدند. حداقل تعداد نمونه‌های آهکی مورد نیاز برای انجام یک آزمایش علمی معتبر بر اساس راوبط کاهش نمونه‌ها [۲۵]، در آزمایش بارگذاری بر خرده ذرات مجزا، ۱۷ عدد تخمین زده شده است [۱]. بنا بر این از هر نمونه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.3.5]

سنگ آهک میکرایتی ۲۰ عدد نمونه اصلاح شده در اندازه‌های ۲، ۳ و ٤ میلی‌متری تهیه شدند تا علاوه بر بررسی هم‌بستگی شاخص فشاری تک‌محوری و آزمایش بارگذاری بر خرده ذرات مجزا، اثر اندازه خرده ذرات نیز بررسی شود.



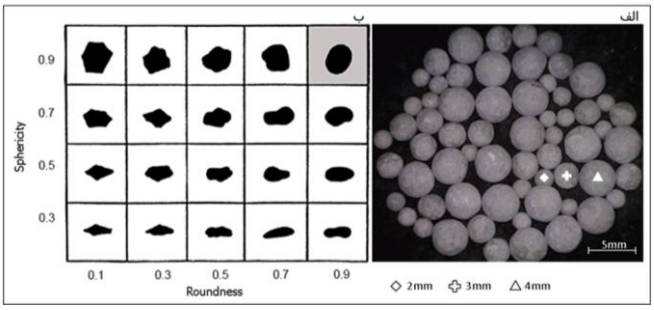
شکل ۱. محل برداشت نمونه‌های انتخابی از رخ‌نمون‌های سازند آسماری. نمونه‌های S-1، S-2 و S-4 از معدن گل پنبه خرم آباد، S-3 و S-5 از روستای مشگر خرم‌آباد، S-6 از سد ابوالعباس و S-7 از سد صیدون تهیه شده‌اند.

عواملی مانند گوشه‌داری و عدم مشابهت هندسه ذرات آزمایشی و در نتیجه، عدم مشابهت مکانیسم توزیع تنش القایی مربوط به بار اعمالی در خرده ذرات مجزا، باعث پراکندگی نتایج به‌دست آمده از آزمایش بارگذاری بر خرده ذرات مجزا می‌شوند [۱]. بنا بر این به‌منظور حذف اثر پارامتر شکل دانه، نمونه‌های مربوطه به‌گونه‌ای اصلاح شدند که دارای حداکثر کرویت و گردشدگی باشند. در این صورت هم‌شکلی خرده ذرات آزمایشی از طرفی باعث تشابه شرایط القای تنش، و از طرف دیگر باعث افزایش تکرارپذیری نتایج به‌دست آمده خواهد شد. در شکل ۲–الف تعدادی از نمونه‌های اصلاح شده که در این تحقیق آزمایش شده‌اند نشان داده شده است و در شکل ۲–ب نمودار کرومباین و اسلاس [۲٦] که الگویی برای کمی کردن متغیرهای شکل دانه است، ارائه شده است. خرده ذرات آزمایش شده در بخش نشان داده شده

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.3.5]

در شکل۲–ب قرار می‌گیرند و دارای حداکثر کرویت و گردشدگی هستند. مشخصات مربوط به نمونه‌های آزمایشگاهی آماده شده در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۲. الف) نمونه‌ای از خرده ذرات اصلاح شده در اندازه‌های ۲ ، ۳ و ٤ میلی‌متری، ب) مقایسهٔ پارامترهای شکل نمونه‌های اصلاح شده با نمودار کرومباین و اسلاس

جدول ۱. مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی

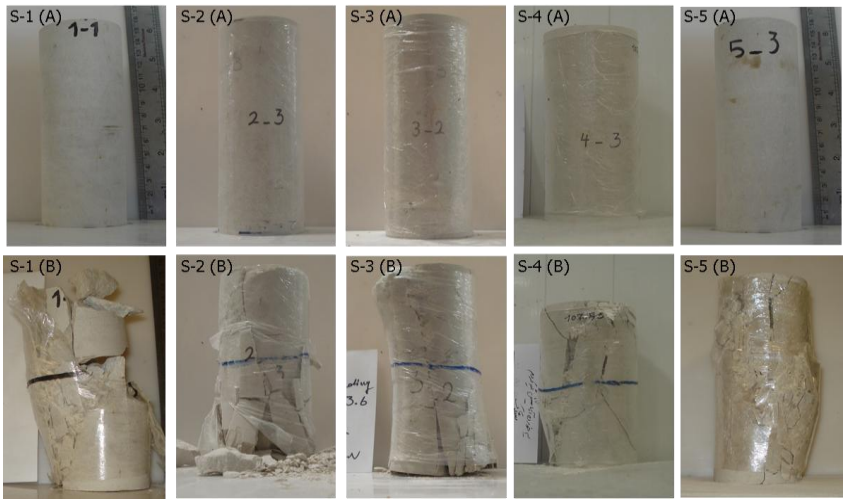
قطر خرده ذره (mm)	جرم واحد حجم (kN/m^3)	شکل نمونه	جنس نمونه	شماره نمونه
٢ ، ٣ ، ٤	٢٦٠٠	کروی	آهک میکرایتی	S - 1
٢ ، ٣ ، ٤	٢٧٢٠	کروی	آهک میکرایتی	S - 2
٢ ، ٣ ، ٤	٢٦١٠	کروی	آهک میکرایتی	S - 3
٢ ، ٣ ، ٤	٢٦٣٠	کروی	آهک میکرایتی	S - 4
٢ ، ٣ ، ٤	٢٦٤٠	کروی	آهک میکرایتی	S - 5
٢ ، ٣ ، ٤	٢٥٠٠	کروی	آهک میکرایتی	S - 6
٢ ، ٣ ، ٤	٢٤٨٠	کروی	آهک میکرایتی	S - 7

آزمایش فشاری تک‌محوری

آزمایش‌های بارگذاری فشاری تک‌محوری مطابق استاندارد ASTM D2938 [۳]، انجام شده و از نمونه‌های آزمایشی قبل و بعد از آزمایش تصویربرداری شده است. در شکل ۳ تعدادی از مغزه‌ها قبل و بعد از آزمایش فشاری تک‌محوری نشان داده شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.3.5]



شکل ۳. مغزه‌های سنگی قبل و بعد از آزمایش فشاری تک‌محوری

نتایج مربوط به آزمایش بارگذاری فشاری تک‌محوری در جدول ۲ و نمودار تغییرات مقاومت مربوط به نمونه‌های آزمایش شده، در شکل ٤ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۲ بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر USC به‌ترتیب مربوط به نمونه‌های ۱ و ۷ با ۲۷۲/۸ و ۳۵/۳۰ مگاپاسکال هستند.

جدول۲. مقادیر میانگینUCS به‌دست آمده مربوط به نمونه‌های آزمایش شده

شماره نمونه	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7
UCS (MPa)	۲۷۲/۸۰	۲٦۲/۹۰	۲۲۵/۱۳	۱۸۷/۳۵	۲۲۸	۹۰/٦۰	۳۵

طیف مقاومتی نمونه‌های آزمایش شده بر اساس تعاریف موجود [۲۹]، [۲۸] از بسیار مقاوم تا کم مقاوم متغیر بوده و نتایج به‌دست آمده از آزمایش از توزیع مورد نظر بر خوردار هستند.

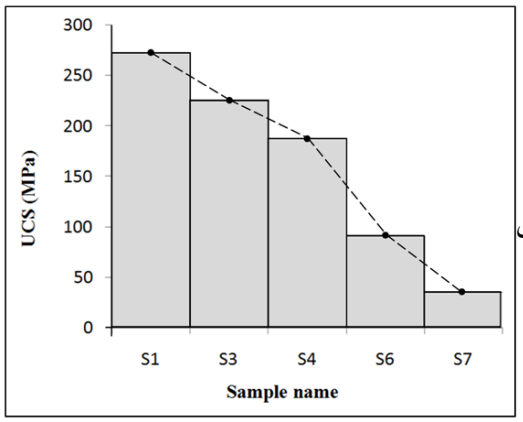
آزمایش بارگذاری بر خرده ذرات مجزا

از روش‌های مختلفی به‌منظور ارزیابی پارامترهای مقاومتی خرده ذرات مجزا استفاده می‌شود. در برخی از این روش‌ها ذرات مجزا با شتابی خاص به سطحی سخت برخورد می‌کنند. میزان نیروی جنبشی به‌کار گرفته شده به‌منظور خردایش ذرات در این آزمایش‌ها

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.3.5]

به‌عنوان انرژی شکست در نظر گرفته می‌شود. به این دسته از آزمایش‌ها، آزمایش‌های برخوردی پرسرعت گفته می‌شود [۲۹]، [۱۵]. آزمایش‌های سقوط وزنه و چکش‌های پاندولی نیز برای ارزیابی پارامترهای مقاومتی خرده ذرات مجزا استفاده می‌شود [۲۲]، [۲۱]. در این آزمایش‌ها میزان نیروی اعمالی به جسم با توجه به وزن و ارتفاع سقوط وزنه یا چکش‌های مربوطه، با عنوان انرژی شکست محاسبه می‌شود [۱۸]. به این دسته از آزمایش‌ها، آزمایش‌های شبه استاتیک گفته می‌شود. از دیگر روش‌های کاربردی در این زمینه آزمایش‌های بارگذاری ملایم بر خرده ذرات مجزا است. تفاوت این آزمایش با سایر آزمایش‌ها قابلیت کنترل میزان میزان کرنش اعمالی به خرده ذرات آزمایشی است. تاکنون دستگاه‌های مختلف، از دستگاه‌های بارگذاری بر ذراتی با قطر بیش از نیم متر [۳۰] گرفته تا دستگاه‌های نانو نشان‌گذار که برای بارگذاری بر خرده ذرات مجزا به قطر چند میکرون [۳۱]، در زمینه بارگذاری بر خرده ذرات مجزا و با اهداف مختلف استفاده شده است.



شکل ٤. نمودار توزیع مقاومت فشاری تک‌محوری که پراکندگی یا اختلاف مقادیر به‌دست آمده از آزمایش فشاری تک‌محوری بر نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد.

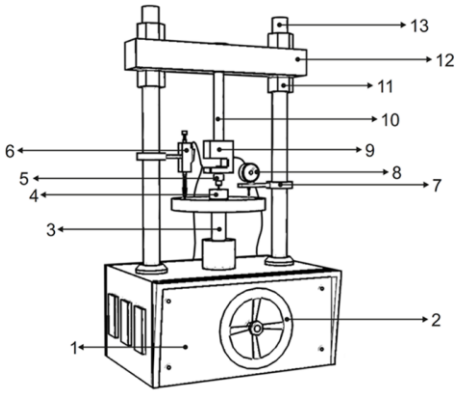
سیستم اعمال بار در دستگاه بارگذاری بر خرده ذرات مجزا به‌کار گرفته شده در این مقاله به‌گونه‌ای طراحی شده که فک‌های بارگذاری با سرعتی معادل ۰/۲۵ تا ۱ میلی‌متر در ساعت به‌هم نزدیک شوند و با میزانی یک‌نواخت، معادل ۰/۷۷ نیوتن در ثانیه به نمونه‌ای صلب نیرو اعمال نمایند. بنا بر این دستگاه مورد نظر از نوع کرنش کنترل بوده و بارگذاری مربوطه از نوع استاتیک است. به‌منظور اندازه‌گیری جابه‌جایی در روند آزمایش از کرنش سنج دیجیتال با دقت ۱ میکرون و برای اندازه‌گیری میزان نیروی اعمالی از نیروسنج دیجیتال با دقت ۱۰۰ گرم

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.3.5]

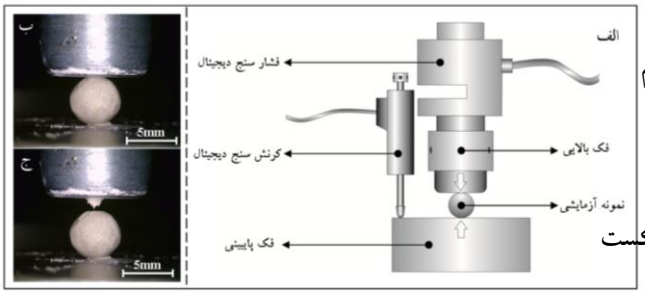
استفاده شده است. تکرارپذیری دستگاه مربوطه با آزمایش بارگذاری بر ذرات مختلف و با استفاده از روش تخمین تعداد نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است [۱]. در شکل ۵ نمایی از دستگاه بارگذاری به‌کار رفته برای بارگذاری استاتیک بر خرده ذرات مجزا نشان داده شده است [۱].

شماره قطعه	نام قطعه
۱	جعبه سیستم محرک
۲	اهرم محرک دستی
۳	شافت اتصال حلزونی
٤	فک پایینی
٥	فک بالایی
٦	کرنش سنج
۷	بست های اتصالی
۸	گیج جابجایی
۹	نیرو سنج
۱۰	بازوی اتصال نیرو سنج
۱۱	پیچ اتصال قاب نگهدارنده
۱۲	قاب نگهدارنده
۱۳	ستونک های عمودی چهارچوب



شکل ۵. دستگاه بارگذاری بر خرده ذرات مجزا و اجزای مربوط [۱].

در آزمایش بارگذاری بر خرده ذرات مجزا، دو سطح کاملاً صاف، صیقلی و موازی به گونه‌ای به خرده ذره مورد نظر بار اعمال می‌کنند که فرصت کافی برای ثبت تغیرات روی داده در نمونه آزمایشی تا لحظه شکست وجود داشته باشد. آزمایش بارگذاری تا لحظهٔ شکست خرده ذرات مجزا ادامه داشته و تغییرات اعمالی با استفاده از نیرو سنج و کرنش سنج مربوط ثبت می‌شود. به‌منظور بررسی عینی رفتار ذرات تحت اعمال بار، با استفاده از دوربین نصب شده بر روی دستگاه از نمونه‌های مربوطه تصویربرداری به‌عمل آمده است. در شکل ٦ نحوهٔ اعمال بار و ثبت تغییرات در آزمایش بارگذاری بر خرده ذرات مجزا نشان داده شده است.

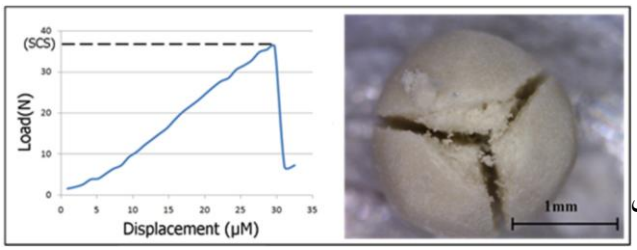


شکل ٦. الف) بارگذاری بر خرده ذرات مجزا و سیستم ثبت تغییرات، ب) خرده ذره کروی در حال بارگذاری، ج) خرده ذره کروی پس از شکست

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.3.5]

در شکل ۷ نمودار رفتاری شاخص خرده ذرات مجزا و الگوی شکست غالب در آن‌ها نشان داده شده است [۱]. رفتار مکانیکی خرده ذرات آزمایش شده شبیه به‌حالت الاستیک خطی بوده و مقاومت نهایی آن‌ها به‌عنوان مقاومت فشاری تک‌ذره[1] (SCS) معرفی شده است [۱]. میانگین مقادیر به‌دست آمده از ٤۲۰ آزمایش بارگذاری بر خرده ذرات مجزا در قطرهای مختلف و الگوی شکست غالب در مورد هر نمونه در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به جدول ۳ ، بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیرSCS به‌ترتیب مربوط به نمونه‌های ۲ و ۷ است.



شکل ۷. نمودار نیرو جابه‌جایی خرده سنگ آهک‌های میکرایتی در آزمایش بارگذاری و تصویر خرده ذره پس از آزمایش بارگذاری

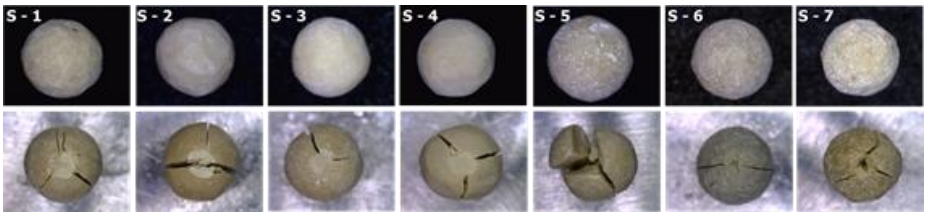
جدول ۳. نتایج حاصل از آزمایش‌های بارگذاری بر ٤۲۰ نمونه از خرده ذرات مجزا

شماره نمونه	SCS (N) D=2mm	SCS (N) D=3mm	SCS (N) D=4mm	الگوی شکست
S - 1	۸۹/۵۰	۱۹٦/٤۰	۳٤۸/۸۰	سه بخشی
S - 2	۱۰۸/٤۰	۲۵۹/۱۰	٤۳۰/۵۰	سه بخشی
S - 3	۷۹	۱۸۳	۲٤۸/۵۰	سه بخشی
S - 4	٤۷/٤۰	۹۱/٤۰	۱۷۷/۲۰	سه بخشی
S - 5	۸۵	۱۷۹/۸۰	۳۲۹/٤۰	سه بخشی
S - 6	۳۰	۵۰/۵۰	۹۱/۸۰	دو بخشی
S - 7	۱۹/۱۰	٤٤/۷۰	۵۹/٦۰	سه بخشی

از نمونه‌های مربوطه قبل و بعد از آزمایش تصویربرداری به‌عمل آمده و نوع شکست در مورد نمونه‌های مختلف بررسی شده است. در شکل ۸ خرده ذرات آزمایش شده قبل و بعد از بارگذاری نشان داده شده است. سه الگوی شکست ۲، ۳ و ٤ بخشی در نمونه‌های آزمایشی مشاهده و مشخص شده اکثر نمونه‌ها دارای الگوی شکست سه وجهی هستند [۱].

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

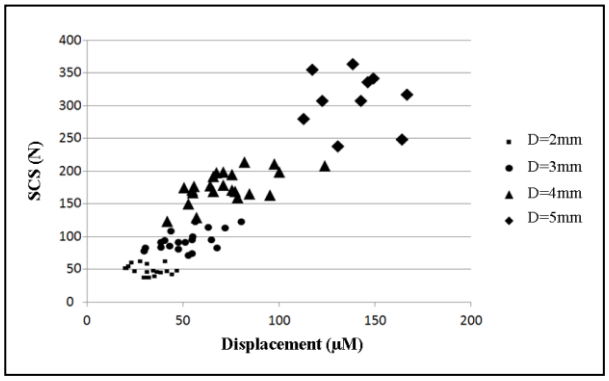
[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.3.5]



شکل ۸. ذرات اصلاح شده ٤ میلی‌متری قبل و بعد از آزمایش بارگذاری بر خرده ذرات مجزا چنان‌که مشاهده می‌شود الگوی شکست خرده ذرات آزمایش شده بیش‌تر از نوع سه بخشی است.

تحلیل و تفسیر نتایج حاصل از آزمایش

نمودار تغییرات شاخص SCS و جابه‌جایی ثبت شده تا لحظه شکست در آزمایش بارگذاری بر خرده ذرات تهیه شده از نمونه‌های S-4 در چهار اندازه مختلف، در شکل ۹ نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، با کاهش قطر خرده ذرات علاوه بر کاهش مقاومت، میزان جابه‌جایی ثبت شده تا لحظه شکست نیز کاهش یافته است. کاهش قطر ذرات منجربه کاهش اتصال واحدهای کانیایی در خرده ذرات شده، نمونه‌های مورد نظر در کرنش‌های کم‌تری به گسیختگی می‌رسند. شکل ۹ روند خطی افزایش میزان تغییر شکل و مقاومت ذرات به‌ازای افزایش قطر آن‌ها را نشان می‌دهد.



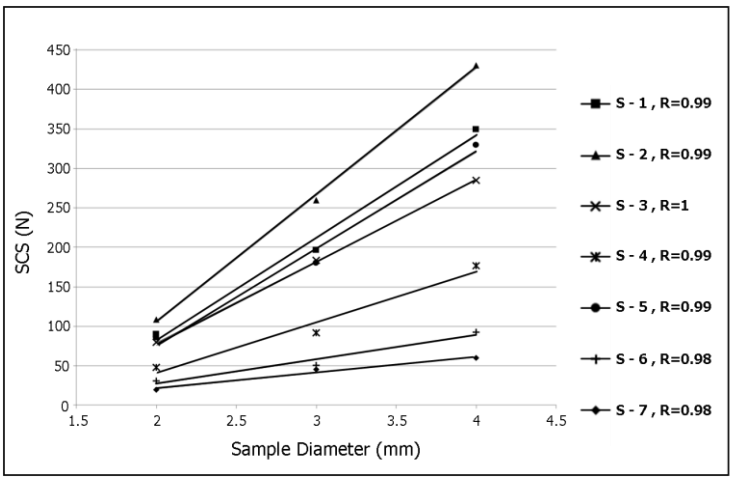
شکل ۹. نمودار شاخص SCS و جابه‌جایی ثبت شده تا لحظه شکست، مربوط به ٤ قطر مختلف از نمونهٔ S-4

در شکل ۱۰ رابطهٔ میزان شاخص SCS با قطر ذرات در مورد هر هفت نمونهٔ آزمایش شده نشان داده شده است. هر نقطهٔ مشخص شده در این شکل مؤید میانگین SCS مربوط به ۲۰

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.3.5]

خرده ذره با قطری مشخص است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که شاخص مربوط در مورد تمام نمونه‌ها با قطر ذرات رابطهٔ مستقیم دارد و به‌ازای افزایش قطر ذرات افزایش می‌یابد. ضرایب هم‌بستگی ایجاد شده بین این دو پارامتر در حالت خطی بیش از ۰/۹۸ است.



شکل ۱۰. هم‌بستگی خطی برقرار شده بین قطر ذرات آزمایش شده و مقادیر SCS به‌دست آمده

بنا بر این می‌توان مقدار شاخص SCS ذرات در قطرهای مختلف را با استفاده از رابطهٔ ۱ محاسبه کرد:

$$SCS = ID - \Delta \qquad (۱)$$

D قطر ذرات آزمایش شده، I و Δ به‌دلیل ارتباط مستقیم با مقاومت خرده ذرات مجزا به‌عنوان متغیرهای مقاومتی خرده ذرات مجزا آزمایش شده معرفی شده‌اند.

با توجه به هم‌بستگی‌های برقرار شده بین مقادیر SCS به‌دست آمده از آزمایش بارگذاری بر خرده ذرات مجزا در اندازه‌های مختلف، بیش‌ترین و کم‌ترین عرض از مبدأ (Δ) و شیب خطوط برازش داده شده (I) به‌ترتیب مربوط به مقاوم‌ترین (S-2) و کم‌مقاومت‌ترین نمونه آزمایش شده (S-7) است. بنا بر این می‌توان نتیجه گرفت برای ۷ نمونه سنگ آهک میکرایتی آزمایش شده به‌ازای افزایش مقادیر SCS، متغیرهای I و Δ نیز افزایش یافته‌اند. به‌منظور حذف پارامتر قطر ذرات (D) از رابطهٔ ۱، مقادیر I و Δ برای هر کدام از نمونه‌ها با توجه به

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.3.5]

شکل ۱۰ تعیین شده است. نمودار تغییرات I و Δ به ازای مقادیر SCS برای خرده ذرات با قطرهای مختلف مربوط به هر نمونه در شکل ۱۱ ترسیم شده است. با توجه به این شکل‌ها می‌توان روابط ۲ و ۳ را بین هر کدام از متغیرهای مقاومتی و مقاومت خرده ذرات ارائه کرد. کاهش شیب خطوط برازش داده شده در شکل به‌طور مستقیم به قطر ذرات آزمایش شده مربوط است و با افزایش قطر ذرات، شیب خطوط کاهش یافته است.

$$I = \alpha_i SCS - \beta_i \qquad (۲)$$

$$\Delta = \alpha_\Delta SCS - \beta_\Delta \qquad (۳)$$

α و β در روابط ۲ و ۳ به‌ترتیب معادل شیب و عرض از مبدأ خطوط برازش داده شده هستند و به‌دلیل ارتباط مستقیم با قطر ذرات، به‌عنوان متغیرهای اندازه ذره معرفی شده‌اند.

روابط ٤، ٥، ٦ و ٧ از هم‌بستگی بین متغیرهای اندازه (α و β) و قطر خرده ذرات مجزا آزمایش شده (D) به‌دست آمده‌اند. با استفاده از این روابط می‌توان متغیرهای اندازه مربوط به ذرات مجزا در قطرهای مختلف را محاسبه کرد.

$$\alpha_i = ٦/٦١\ D^{-٢/٠٦} \qquad (٤)$$

$$\beta_i = ٤/٩٤\ D^{-٢/٠٨} \qquad (٥)$$

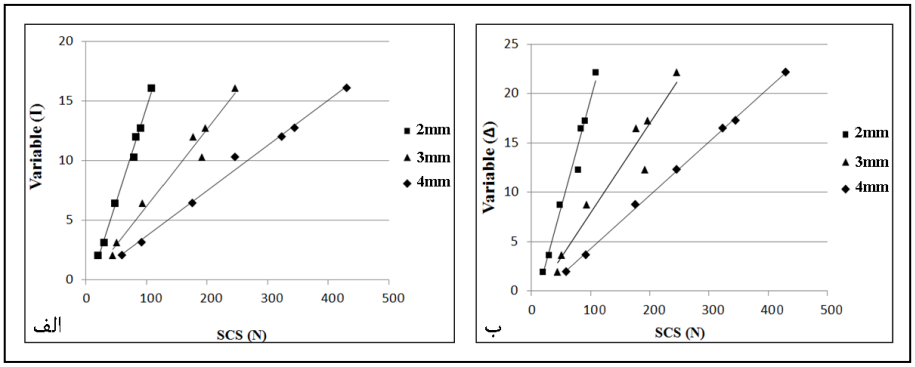
$$\alpha_\Delta = ٩/٤٢\ D^{-٢/٠٦} \qquad (٦)$$

$$\beta_\Delta = ٥/١٨\ D^{-١/١١} \qquad (٧)$$

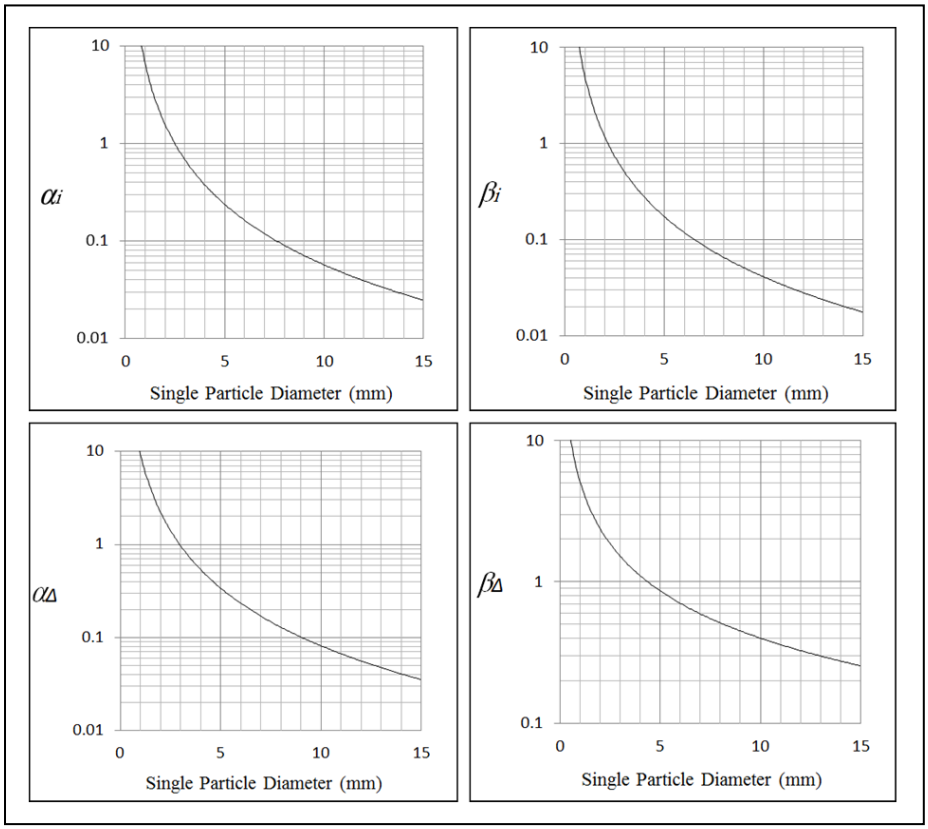
به‌منظور سهولت در محاسبات، روابط برقرار شده در قالب منحنی‌های نیمه لگاریتمی در شکل۱۲ ارائه شده است. با استفاده از منحنی‌های ارائه شده می‌توان مقادیر SCS اندازه‌گیری شده از آزمایش بر خرده ذرات در اندازه‌های مختلف را به SCS معیار مربوط به خرده ذرات مجزا مربوط به قطرهای آزمایش شده (۲، ۳ و ٤ میلی‌متر) تبدیل ساخت. به‌عبارت دیگر می‌توان اثر اندازه خرده ذرات مجزا را حذف کرد و با آزمایش بر ذرات کروی در هر قطری، شاخص UCS را با استفاده از شاخص SCS به‌دست آمده، محاسبه کرد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.3.5]



شکل ۱۱.

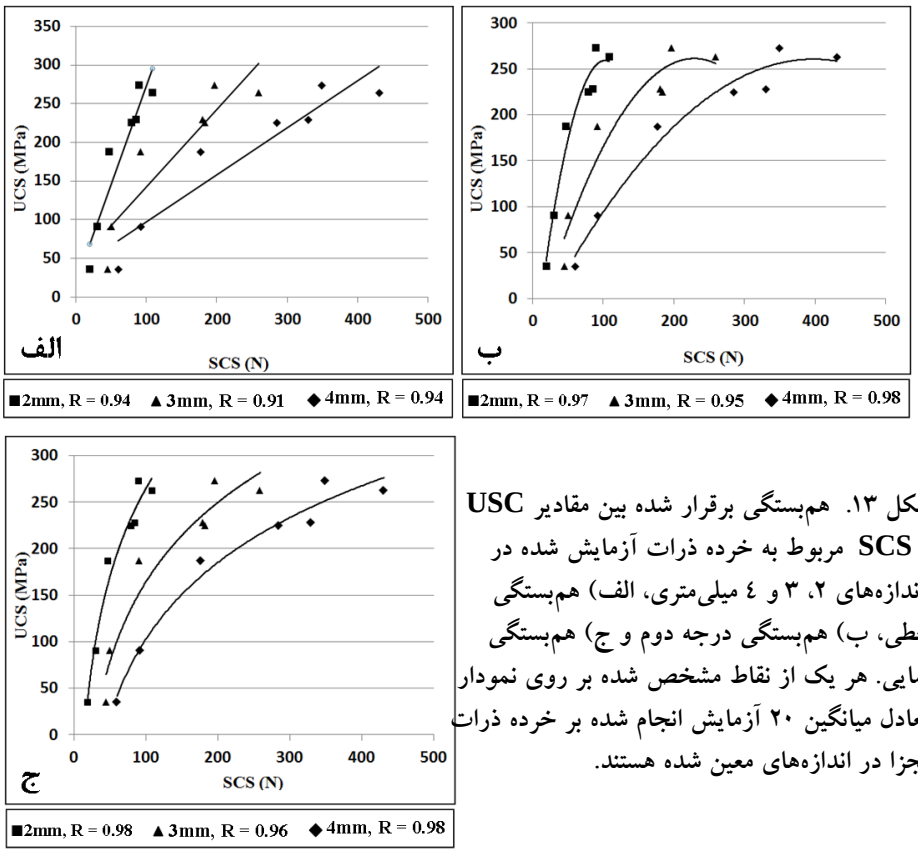


شکل ۱۲. منحنی‌های پیشنهادی به‌منظور حذف اثر قطر ذرات کروی که از رابطهٔ برقرار شده بین متغیرهای اندازه و اندازهٔ خرده ذرات مجزا به‌دست آمده‌اند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.3.5]

به‌منظور برقراری ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت خرده ذرات مجزا، با سه روش مختلف بین مقادیر UCS و SCS هم‌بستگی برقرار شده است. نتایج مربوط به هم‌بستگی بین مقادیر USC و SCS در شکل ۱۳ نشان داده شده است. چنان‌که در شکل مشاهده می‌شود، بالاترین ضرایب، مربوط به هم‌بستگی نمایی است و در حالت کلی بیش‌ترین ضرایب هم‌بستگی به‌ترتیب مربوط به نمونه‌های ٤، ۲ و ۳ میلی‌متری و در تمامی موارد دارای مقادیر قابل قبولی هستند.



شکل ۱۳. هم‌بستگی برقرار شده بین مقادیر USC و SCS مربوط به خرده ذرات آزمایش شده در اندازه‌های ۲، ۳ و ٤ میلی‌متری، الف) هم‌بستگی خطی، ب) هم‌بستگی درجه دوم و ج) هم‌بستگی نمایی. هر یک از نقاط مشخص شده بر روی نمودار معادل میانگین ۲۰ آزمایش انجام شده بر خرده ذرات مجزا در اندازه‌های معین شده هستند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.3.5]

با توجه به نمودارهای ارائه شده در شکل ۱۳ در هر سه نوع هم‌بستگی مشاهده می‌شود که به‌ازای افزایش اندازهٔ خرده ذرات آزمایش شده شیب نمودار مربوط کاهش یافته است. کاهش شیب نمودارها به‌دلیل افزایش مقاومت خرده ذرات به‌ازای افزایش قطر ذرات یا به‌عبارت دیگر همان اثر اندازه خرده ذرات آزمایش شده است. بنا بر این به‌ازای هر اندازه، یک رابطهٔ تجربی برای تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری با استفاده از نتایج آزمایش بارگذاری بر خرده ذرات مجزا به‌دست آمده است. با توجه به این‌که هم‌بستگی‌های مربوط با استفاده از سه روش مختلف برقرار شده است، بنا بر این ۹ رابطهٔ تجربی به‌دست آمده که در جدول ٤ ارائه شده است.

جدول ٤.

قطر نمونه	خطی	درجهٔ دوم	نمایی
۲	UCS = ۲/٥٤ (SCS)+	UCS = −۰/۰۳۰ (SCS)^{۲} + ٦/٤٤	UCS = ۱۳٦/۳۳ ln(SCS) −
۳	UCS = ۱/۰۰۲	UCS = −۰/۰۰٦ (SCS)^{۲} + ۲/٦٥	UCS = ۱۲۳/۲۰ln(SCS) −
٤	UCS = ۰/٦۱ (SCS)+	UCS = −۰/۰۰۲ (SCS)^{۲} + ۱/٤۹	UCS = ۱۱۸/۷۰ ln(SCS) −

ارزیابی صحت نتایج به‌دست آمده

به‌منظور ارزیابی صحت روابط تجربی پیشنهاد شده و منحنی‌های مربوط به حذف اثر اندازه، ۱۰ خرده ذره با قطر یک میلی‌متر از نمونه‌های $S-2$ و ۱۰ خرده ذره با قطر ۵ میلی‌متر از نمونه $S-4$ انتخاب شده است. پس از آزمایش بارگذاری بر خرده ذرات مجزا، با توجه به قطر ذرات آزمایش شده ابتدا با استفاده از منحنی‌های پیشنهادی (شکل ۱۲)، متغیرهای اندازه محاسبه شده‌اند. مقادیر به‌دست آمده از منحنی‌های پیشنهادی مربوط به خرده ذرات ۱ و ۵ میلی‌متری در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵. متغیرهای اندازه مربوط به ذرات ۱ و ۵ میلی‌متری که با استفاده از منحنی های پیشنهادی محاسبه شده‌اند

شمارهٔ نمونه	قطر ذرات	میانگین	متغیر های اندازه			
			α_i	B_i	α_Δ	B_Δ
$S-2$	۱	۲۳/۳۳	٦/٦۱	٤/۹٤	۹/٤۲	٥/۱۸
$S-4$	٥	۳۰۸/۹٥	۰/۲۳	۰/۱۷	۰/۳٤	۰/۸٦

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.3.5]

پس از محاسبهٔ متغیرهای اندازه، با استفاده از روابط ۲ و ۳ متغیرهای مقاومتی محاسبه شده است. با استفاده از رابطهٔ ۱ و متغیرهای مقاومتی می‌توان مقدار SCS مربوط به خرده ذرات در قطرهای آزمایش شده (۲، ۳ و ٤ میلی‌متر) را محاسبه کرد. نتایج مربوط به آزمایش‌های متغیرهای مقاومتی و مقادیر SCS محاسبه شده در جدول ٦ ارائه شده است.

جدول ٦. مقادیر میانگین SCS و پارامترهای مقاومتی محاسبه شده و پارامترهای آماری مربوطه

شماره نمونه	میانگین متغیرهای مقاومتی		میانگین SCS محاسبه شده (N)		
	I	Δ	D = 2 mm	D = 3 mm	D = 4 mm
S - 2	۱٤۹/٤۳	۲۱٤/٦۹	۸٤/۱۷	۲۳۳/٦۱	۳۸۳/۰٤
S - 4	۷۳/۵۹	۱۰٤/۱۹	٤۲/۹۹	۱۱٦/۵۷	۱۹۰/۱۰

پس از تبدیل مقادیر SCS اندازه‌گیری شده در مورد ذرات ۱ و ۵ میلی‌متری به مقادیر SCS محاسبه شده در اندازه‌های ۲، ۳ و ٤ میلی‌متری با استفاده از رابطهٔ ۱، مقادیر محاسبه شده در روابط به‌دست آمده از هم‌بستگی‌های برقرار شده بین شاخص‌های UCS و SCS قرار داده شده و مقادیر UCS مربوط محاسبه شده است. نتایج نهایی محاسبات انجام شده در جدول ۷ ارائه شده است.

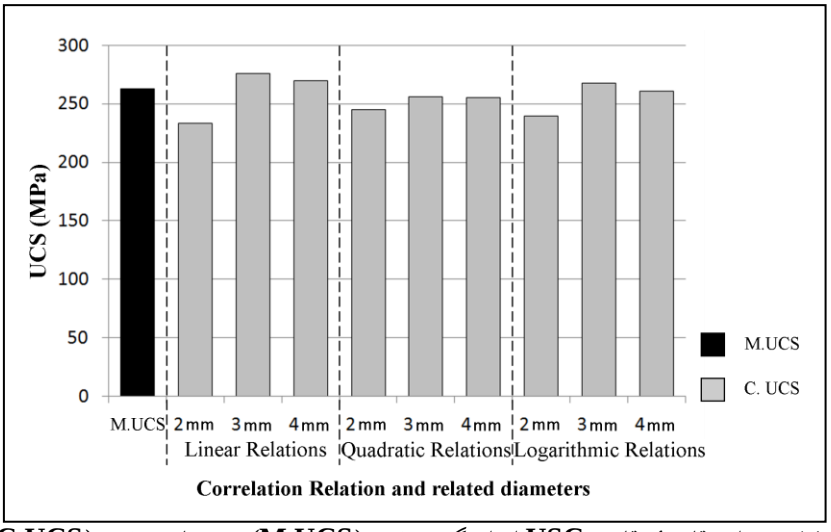
جدول ۷. مقادیر میانگین USC محاسبه شده با استفاده از روابط به‌دست آمده از هم‌بستگی‌های مختلف و پارامترهای آماری مربوطه

شمارهٔ نمونه	میانگین(UCS(MPa محاسبه شده								
	هم‌بستگی خطی			هم‌بستگی درجهٔ۲			هم‌بستگی نمایی		
	D=2mm	D=3mm	D=4mm	D=2mm	D=3mm	D=4mm	D=2mm	D=3mm	D=4mm
S - 2	۲۳۳/۵٤	۲۷٦/۲۵	۲٦۹/٤۸	۲٤٤/۹۰	۲۵۵/۸۱	۲۵۵/۲٦	۲۳۹/۹۱	۲٦۷/٦۷	۲٦۱/۱٦
S - 4	۱۲۸/۸۲	۱۵۸/۹۹	۱۵۲/۱۵	۱٤۷/۱٤	۱۸۷/۱۱	۱۷۸/٤۹	۱٤۸/۲۸	۱۸۱/۹۷	۱۷۷/۹٦

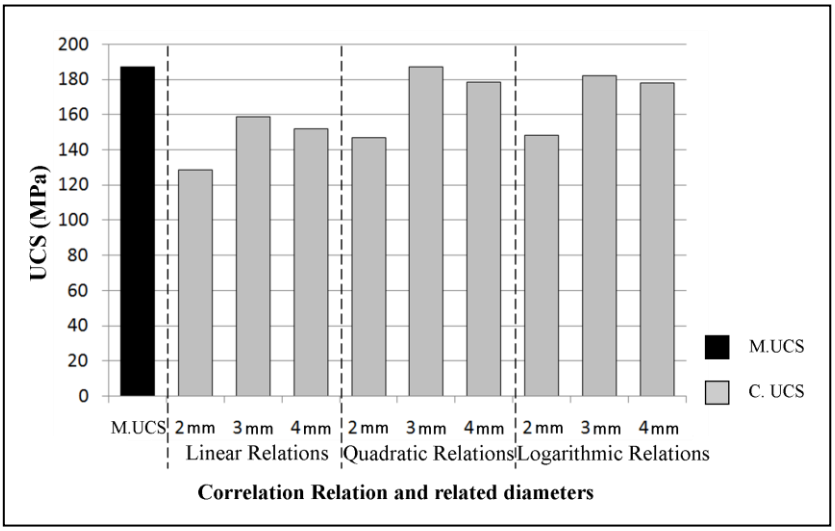
مقایسهٔ میانگین مقادیر UCS محاسبه شده و اندازه‌گیری شده مربوط به نمونه‌های S - 2 و S - 4 در شکل‌های ۱٤ و ۱۵ نشان داده شده است. با توجه به نمودارهای مربوط مقادیر UCS محاسبه شده مربوط به نمونه‌های S - 2 و S - 4 به‌ترتیب به‌طور متوسط ۹۵/۳۲٪ و ۸٦/٦٤٪ با مقادیر اندازه‌گیری شده مشابهت دارند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.3.5]



شکل ١٤. نمودار مقایسهٔ مقادیر USC اندازه‌گیری شده (M.UCS) و محاسبه شده (C.UCS) با استفاده از روابط به‌دست آمده در قطرهای مختلف مربوط به خرده ذرات مجزا ۱ میلی‌متری از نمونه S - 2



شکل ۱۵. نمودار مقایسهٔ مقادیر USC اندازه‌گیری شده (M.UCS) و محاسبه شده (C.UCS) با استفاده از روابط به‌دست آمده در قطرهای مختلف مربوط به خرده ذرات مجزا ۵ میلی‌متری از نمونه S - 4

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.3.5]

نتیجه‌گیری

استفاده از روش‌های غیرمستقیم برای تعیین مقاومت تک‌محوری سنگ در مواردی که امکان تهیهٔ نمونهٔ مناسب وجود ندارد، جای‌گزینی مناسب برای آزمایش‌های آزمایشگاهی متداول در رابطه با ارزیابی مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ در شرایط عدم دسترسی به مغزه‌های حفاری است. تعیین مقاومت خرده ذرات حاصل از حفاری و برقراری رابطهٔ تجربی بین آن‌ها و مقاومت تک‌محوری روشی است که در این مقاله بررسی شده است. نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های انجام شده بر روی ٤۲۰ خرده حفاری از ۷ نمونه سنگ آهک میکرایتی مربوط به رخ‌نمون‌های سازند آسماری نشان‌دهندهٔ هم‌بستگی خوب بین نتایج مقاومت خرده ذرات و مقاومت تک‌محوری است. به‌طوری‌که روابط تجربی پیشنهاد شده حاصل از هم‌بستگی بین SCS و UCS دارای ضریب هم‌بستگی بیش‌تر از ۰/۹۱ است. آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های مختلف با شکل‌های یک‌سان و قطرهای متفاوت، نشان داد که با افزایش قطر ذرات مقاومت آن‌ها افزایش می‌یابد. رابطهٔ بین مقاومت خرده ذرات و قطر آن‌ها در محدودهٔ قطرهای بررسی شده از نوع خطی است. با معرفی پارامترهای مربوط به اندازهٔ دانه‌ها، روابط و منحنی‌هایی پیشنهاد شده که با استفاده از آن‌ها امکان حذف اثر قطر دانه در تعیین مقاومت خرده ذرات وجود دارد. به‌منظور اعتبارسنجی روابط تجربی بین SCS و UCS و منحنی‌هایی ارائه شده است. برای حذف اثر قطر ذرات، آزمایش بر روی خرده ذرات کروی شکل به قطر ۱ و ۵ میلی‌متر انجام شده است. مقاومت تک‌محوری محاسبه شده با استفاده از روش پیشنهادی در این مقاله برای نمونه‌های ۱ و ۵ میلی‌متری به‌ترتیب ۹۵/۳۲ و ۸٦/٦٤ درصد با مقاومت تک‌محوری اندازه‌گیری شده انطباق دارد. این اعتبارسنجی نشان می‌دهد روابط تجربی و روش پیشنهادی برای حذف اثر اندازهٔ خرده ذرات دارای دقت لازم برای تعیین مقاومت تک‌محوری سنگ است. به‌منظور افزایش دقت در محاسبات انجام شده پیشنهاد می‌شود، از مقادیر میانگین به‌دست آمده از روابط مربوط به هر سه نوع هم‌بستگی استفاده شود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.3.5]

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از صندوق حمایت از پژوهش‌گران و فناوران کشور که در تأمین منابع مالی لازم برای این پژوهش همکاری کرده‌اند صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

۱. احمدی‌ششده، الف. چشمی، الف. قلندرزاده، ع.، *طراحی و ساخت دستگاه بارگذاری بر خرده ذرات مجزا و بررسی تکرارپذیری نتایج به‌دست آمده از آن*. هفتمین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه صنعتی شاهرود (۱۳۹۰).

2. Jaramillo R. A., "Estudio geomecánicoestadístico delaestabilidaddurantela perforación de pozos en el Piedemonte Llanero, campo Recetor", Tesis professional Fac. Minas., Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia (2004) (in Colombian).

3. American Society for Testing and Materials, "Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens, Soil and Rock, Building Stones", Annual Book of ASTM Standards 04, 08, Philadelphia, Pennsylvania (1984).

4. Gilvarry J. J., Bergstrom B. H., "Fracture of brittle solids: 1. Distribution function for fragment size in single fracture", J Appl Phys Vol.32 (1961) 400-410.

5. Bergstrom B. H., Sollenberger C. L., "Kinetic energy effect in single particle crushing", Trans, SME, AMIE Vol.220 (1961) 373-379.

6. Bergstorm B. H., Sollenberger C. L., Mitchell W., "Energy aspects of single particle crushing", Trans. SME/AIME Vol.220 (1961) pp. 367-372.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.3.5]

7. Arbiter N., Harris C. C., Stamboltzis G. A., "Single fracture of brittle spheres", Trans, SME/AIME Vol.244 (1969) 118-133
8. Rumpf H., "Physical aspects of commnuition and 'New formation of a law of comminution". Powder Technology Vol.7 (1973) 145.
9. Schonert K., "Role fracture physics in understanding comminution phenomena", Trans, SME/AIME Vol.252 (1972) 21-26.
10. Schubert H., "On the microprocesses of comminution", Aufbereit,-Tech., Vol.5 (1987) 237- 246.
11. Yashima S., Saito F., Sagawa T., Suzuki H., Sano S., "Kagaku Kogaku Ronbunshu1" (1975) 344 (in Japanese).
12. Yashima S., Morohashi S., Saito F., "Single Particel Crushing Under Slow Rate of Loading, Scientific Reports of the Research Institute-Tohoku University", No. 1 (1979) 116-133.
13. Yashima S., Saito F., Mikuni T., "Effect of environmental water on single- particle crushing, Kagaku Kogaku Ronbunshu", Powder Technology Vol.2 (1976) 150-153.
14. Yashima S., Kanda Y., Sano S., "Relationship Between Particle Size and Fracture Energy or Impact Velocity Required to Fracture, as Estimated from Single Particle Crushing", Powder Technology Vol.51 (1987) 277-282.
15. Dan C. C., Schubert H., "Breakage probability, progeny size distribution and energy utilization of comminution by impact", Aufbereit, Tech Vol. 31 (1990) 241-247.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.3.5]

16. Awachie S. E. A., "Development of crusher models using laboratory particle breakage data", Ph. D. thesis, University of Queensland, Brisbane (1983).
17. Tavares, L.M., "Energy absorbed in breakage of single particles in drop weight testing", Miner. Eng. Vol.12 (1999).
18. Tavares L. M., King R. P., "Single-particle fracture under impact loading", Int. J. Miner. Process, Vol.541 (1998) 1-28.
19. Piret E. L., "Fundamental aspects of grinding", Chem. Eng. Prog, Vol.49 (1953) 56-63.
20. Narayanan S. S., Whiten W. J., "Breakage Characteristics for Ores for Ball Mill Modeling Proc". Australia's Inst, Min. Metall, (3rd Edn.) No. 286 (1983).
21. Krogh S. R., "Crushing characteristics", Powder Technology Vol.27 (1980) 171-181.
22. Napier-Munn T. J., Morrell S., Morrison R. D., Kojovic T., "Mineral Comminution Circuits: Their Operation and Optimization", University of Queensland, Brisbane (1996).
23. Barnard W. J., Bull F. A., "Primary breakage of brittle particles", Fourth Tewksbury Symposium University of Melbourne, Melbourne (1979) 1-20.
24. Sikong L., Hashimoto H., Yashima S.,"Breakage behavior of fine particles of brittle minerals and coals", Powder Technology Vol.61 (1990) 51-57.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.3.5]

25. Denis E. Gill, Robert Corthe´sy, Maria Helena Leite, "Determining the minimal number of specimens for laboratory testing of rock properties", Engineering Geology Vol.78 (2005) 29-51.
26. Krumbein W. C., Sloss L. L., "Stratigraphy and Sedimentation", W. H. Freeman, San Francisco, CA (1963).
27. Bieniawski Z. T., "Engineering classification of jointed rock masses". Trans S Afr Inst Civ. Eng. Vol.15 (1973) 335-344.
28. Deere D. U., Miller R. P., "Engineering classification and index properties of intact rock", Air Force Lab Tech Rep AFNLTR-65-116 Albuquerque NM (1966).
29. Cleaver J. A. S., Ghadiri M., Rolfe, N., "Impact Attrition of Sodium Carbonate Monohydrate Crystals", Powder Technology Vol.76 (1993) 15-22.
30. Unland G., Szczelina P., "Coarse crushing of brittle rocks by compression", International Journal of Mineral Processing Vol.74 (2004) 209-217.
31. Sikong L., Hashimoto H., Yashima S., "Breakage behavior of fine particles of brittle minerals and coals". Powder Technology Vol.61 (1990) 51-57.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.3.5]