

تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ آهک میکرایتی با استفاده از آزمایش نفوذ

ابراهیم احمدی ششده، اکبر چشمی*؛

دانشگاه تهران، پردیس علوم، دانشکده زمین‌شناسی

پذیرش ۹۲/۱۰/۹

تاریخ: دریافت ۹۱/۹/۱۹

چکیده

تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) سنگ در بیش‌تر پروژه‌های مهندسی ضروری است. در حفاری‌های عمیق برای دستیابی به منابع هیدروکربوری و یا حفاری‌های اکتشافی برای تونل‌های عمیق تهیه نمونه مناسب برای اندازه‌گیری مستقیم UCS مشکل، هزینه‌بر و گاهی غیرممکن است. بنا بر این استفاده از روش‌های غیرمستقیم (نظیر استفاده از خرده‌های حفاری) برای تخمین UCS متداول شده است. استفاده از نفوذ کننده‌ای سخت که به داخل خرده سنگ تثبیت شده در یک چسب نگه‌دارنده نفوذ می‌کند و به‌عنوان آزمایش نفوذ^۱ شناخته می‌شود، یکی از این روش‌ها است. در این مقاله تعداد ۸ نمونه سنگ آهک میکرایتی تهیه و پس از تعیین UCS آن‌ها در آزمایشگاه، نمونه‌ها خرد و آزمایش نفوذ با نفوذ کننده‌هایی به قطرهای ۰/۸، ۰/۶، ۱ و ۱ میلی‌متر روی ۷۲۰ خرده ذره با اندازه‌های ۲، ۳ و ۴ میلی‌متر انجام شده و نیروی انتقال بحرانی (CTF) که معرف مقاومت نهایی خرده ذره در مقابل ورود نفوذکننده به داخل آن است، تعیین شده است. روابط تجربی بین UCS و CTF برای نمونه‌ها و نفوذکننده‌های با قطرهای مختلف با $R^2 \geq 0.78$ پیشنهاد شده است. با استفاده از رگرسیون چند متغیره، رابطه‌ای کلی بین UCS، CTF، اندازه ذرات (D) و قطر نفوذکننده (I) با $R = 0.85$ ارائه شده است. صحت روابط تجربی پیشنهادی با انجام ۱۳۵ آزمایش نفوذ روی ۳ نمونه سنگ آهک میکرایتی و مقایسه UCS اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه با UCS تخمین زده شده ارزیابی شده که شباهت ۸۸٪ آن‌ها نشان دهنده رواداری روابط تجربی پیشنهادی در تحقیق حاضر است.

واژه‌های کلیدی: آزمایش نفوذ، مقاومت فشاری تک‌محوری، نیروی انتقال بحرانی، خرده حفاری،

* نویسنده مسنول a.cheshomi@ut.ac.ir

1. Indentation test

مقدمه

مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ (UCS) از کاربردی‌ترین پارامترهای مکانیکی سنگ است که در طراحی‌ها بیش‌تر از سایر پارامترها استفاده می‌شود [۱]. مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ ۹ برابر کاربردی‌تر از دومین پارامتر مهم مکانیک سنگ یعنی مقاومت فشاری سه‌محوری است [۲]. مقادیر UCS با استفاده از آزمایش‌های برجا یا با استفاده از آزمایش‌های آزمایشگاهی بر اساس استانداردهای رایج (ASTM, ISRM) تعیین می‌شود. این آزمایش بر خلاف سادگی فهم و درک منطق آن، به نسبت گران‌قیمت و مستلزم صرف وقت زیادی است. از مهم‌ترین محدودیت‌هایی که این آزمایش با آن روبه‌روست، محدودیت‌های موجود در تهیه نمونه‌های استاندارد به‌منظور انجام آزمایش است. به‌منظور تعیین UCS با استفاده از استانداردهای موجود به مغزه‌های حفاری سالم و با شکل هندسی معین نیاز است. بنا بر این به‌عنوان راه حل، در مواردی که تهیه نمونه‌های استاندارد مقدور نیست، محققان به تعیین UCS سنگ با استفاده از روش‌های غیرمستقیم توجه کرده‌اند.

آزمایش‌های استفاده شده به‌منظور تعیین غیرمستقیم USC را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: دسته اول آزمایش‌هایی است که روی نمونه‌های بزرگ مقیاس^۱ (به‌عنوان مثال بلوک‌های سنگی یا مغزه‌های حفاری) انجام می‌شوند. در مورد استفاده از نتایج آزمایش‌هایی نظیر عدد چکش اشمیت^۲، شاخص بار نقطه‌ای، تعیین سرعت صوت، تخلخل، چگالی، مقاومت کششی و برخی دیگر از آزمایش‌ها به‌منظور تخمین غیرمستقیم مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ تحقیقات نسبتاً مفصلی در گذشته انجام شده است [۳]. از دیگر آزمایش‌هایی که با استفاده از آن‌ها مقاومت فشاری تک‌محوری به‌صورت غیرمستقیم تعیین می‌شود می‌توان به آزمایش پانچ بلوکی^۳ [۴، ۵، ۶، ۷، ۸]، آزمایش پانچ استوانه‌ای^۴ [۹]، آزمایش فشارنده مغزه (CST)^۵ [۱۰] و آزمایش نفوذ میخ (NPT)^۶ [۱۱] اشاره کرد.

در صورتی که نمونه‌های بزرگ مقیاس برای آزمایش‌های دسته اول موجود نباشد، به‌منظور ارزیابی پارامترهای مقاومتی سنگ بکر به‌ناچار از آزمایش‌های دسته دوم استفاده می‌شود.

- | | | |
|---------------------------|-----------------------|--------------------------|
| 1. Big-Scale Rock Samples | 2. Schmitt Hammer | 3. Block Punch test |
| 4. Cylindrical Punch test | 5. Core Strangle Test | 6. Nail Penetration Test |

در این دسته از آزمایش‌ها با استفاده از نمونه‌های کوچک مقیاس (به‌عنوان مثال خرده‌های حفاری) پارامترهای مقاومتی سنگ بکر ارزیابی می‌شود. بنا بر ادعای سانتارلی و همکاران [۱۲]، از آن‌جاکه خرده‌های حفاری به‌اندازه کافی نماینده سازند و منبعی قابل اطمینان از اطلاعات در مورد رفتار مکانیکی آن‌ها هستند، مقاومت ذره آزمایش شده می‌تواند تابعی از مقاومت فشاری تک‌محوری مغزه حفاری مربوط باشد. بنا بر این با استفاده از خرده‌های سنگی به‌عنوان نمونه‌های کوچک مقیاس و تجهیزات آزمایشگاهی مناسب می‌توان مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ را به‌طور غیرمستقیم تخمین زد. از جمله آزمایش‌هایی که به‌منظور تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری روی نمونه‌های کوچک انجام شدند، می‌توان به آزمایش بارگذاری مستقیم بر خرده ذرات مجزا چشمی و احمدی شده، (۱۳۹۱) [۱۳]، آزمایش بارگذاری بر مغزه‌های بازسازی شده از خرده‌های حفاری^۱ [۱۴]، آزمایش ثبت امواج پیوسته در خرده ذرات مجزا^۲ [۱۵] و تعیین غیرمستقیم مقاومت فشاری تک‌محوری با استفاده از خصوصیات سنگ‌شناسی [۱۶]، [۱۷] اشاره داشت.

آزمایش نفوذ نیز از روش‌هایی است که به‌منظور ارزیابی پارامترهای مقاومتی خرده‌های حفاری استفاده شده است [۱۸]. در این آزمایش نفوذکننده‌ای سخت با میزان کرنش ثابت در خرده ذرات سنگی نفوذ داده شده، ضمن نفوذ پارامترهای مقاومتی سنگ ارزیابی می‌شود. زاوسا و همکاران [۱۹] با استفاده از آزمایش نفوذ، پایداری چاه حفر شده را هم‌زمان با عملیات حفاری بررسی کردند. رینگاستاد و همکاران [۱۸] با استفاده از هم‌بستگی خطی بین آزمایش نفوذ و مقاومت فشاری تک‌محوری مربوط به سنگ‌های مختلف همانند ماسه سنگ شیل و سنگ آهک از سازندهای مختلف و با سختی‌های مختلف روابطی ارائه کردند. یوبلدی و همکاران [۲۰] پژوهش‌هایی برای انتخاب خرده‌های حفاری با آزمایش نفوذ انجام دادند. ماتئوس و همکاران [۲۱] بین مقادیر حاصل از آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری و نفوذ مربوط به نمونه‌های ماسه سنگی هم‌بستگی برقرار کردند. در پژوهش‌های ماتئوس و همکاران

1. Reconstructed Cores

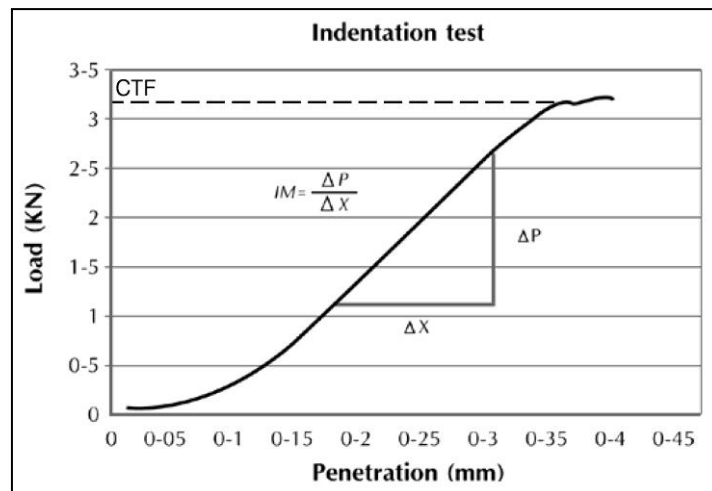
2. Continuous Wave Technique

به منظور تعیین غیرمستقیم مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ پارامترهای مقاومتی به دست آمده از نمودار نیرو-جاب‌جایی استفاده شده و نتایج به دست آمده در قالب روابط تجربی ۱ و ۲ ارائه شده است.

$$UCS = 17.38(IM) \quad , \quad R^2 = 0.81 \quad (1)$$

$$UCS = 91.97(CTF) \quad , \quad R^2 = 0.70 \quad (2)$$

CTF نیروی انتقال بحرانی^۱ (نیروی ثبت شده تا زمان ورود نفوذکننده به نمونه بر حسب نیوتن) و IM مدول نفوذ^۲ (شیب نمودار در بخش خطی بر حسب نیوتن-میلی‌متر) است که مطابق شکل ۱ از نمودار نیرو-جاب‌جایی مربوط به آزمایش نفوذ به دست می‌آید.



شکل ۱. نمودار شاخص مربوط به آزمایش نفوذ که در آن نحوه تعیین پارامترهای مقاومتی (CTF و IM) خرد ذرات آزمایش شده نشان داده شده است [۲۱]

در تحقیقی مشابه، گارسیا و همکاران [۲۲] روابط تجربی مربوط را با استفاده از هم‌بستگی بین پارامترهای حاصل از آزمایش نفوذ و آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری در رابطه با نمونه‌های شیلی سازند پاچا-کلمبیا^۳ توسعه دادند. در این تحقیق به منظور برقراری ارتباط بین پارامترهای مقاومتی خرد ذرات حفاری و مقاومت فشاری تک‌محوری، ۲۰۰ آزمایش نفوذ روی خرد ذرات سنگی بی‌شکل شیلی با ابعاد تقریبی ۵ میلی‌متر انجام و روابط تجربی ۳ و ۴ پیشنهاد شد.

1. Critical Transitional Force 2. Indentation Modulus 3. Paja Formation

$$UCS = 0.0005(IM)^2 + 3.2847(IM) \quad , \quad R^2 = 0.6513 \quad (۳)$$

$$UCS = -0.0083(CTF)^2 + 33.082(CTF) \quad , \quad R^2 = 0.8111 \quad (۴)$$

روش انجام کار

تهیه و آماده‌سازی نمونه‌های سنگی

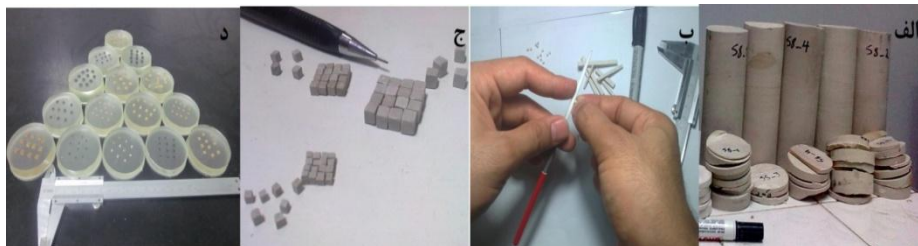
با توجه به اهمیت سازند آسماری در صنعت نفت ایران [۲۳]، [۲۴]، نمونه‌های به‌کار رفته در این تحقیق عمدتاً از سنگ‌های کربناته سازند آسماری انتخاب شده است. بدین‌منظور ۹ بلوک سنگی از رخنمون‌های سازند آسماری و ۲ بلوک سنگی از رخنمون سازندهای تله زنگ و سروک (با ابعاد تقریبی ۲۰×۴۰×۴۰ سانتی‌متر) تهیه و به آزمایشگاه انتقال داده شده است. در جدول ۱ مشخصات چینه‌نگاری، پارامترهای فیزیکی و مقاومتی مربوط به نمونه‌های سنگی ارائه شده است. نمونه‌های S-1 تا S-8 برای تولید روابط تجربی و نمونه‌های S-9 تا S-11 به‌منظور ارزیابی صحت روابط تجربی استفاده شده است.

برای آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری از هر بلوک سنگی ۵ مغزه سنگی کاملاً بکر بدون هیچ‌گونه درزه، ناپیوستگی و شکستگی تهیه شده و بر اساس استاندارد ISRM [۲۵] برای آزمایش، آماده شدند. به‌منظور تولید خرده ذرات، برای انجام آزمایش نفوذ از بخش‌های باقی‌مانده مربوط به مغزه‌های سنگی استفاده شده است. از آن‌جاکه در تحقیق حاضر هدف از آزمایش نفوذ علاوه بر بررسی رابطه تجربی بین UCS و CTF، بررسی اثر اندازه خرده ذرات و قطر نفوذکننده است از این رو، نمونه‌های مربوط به آزمایش نفوذ، هم‌شکل و به‌صورت مکعب‌های هم‌بعد در سه اندازه ۲، ۳، و ۴ میلی‌متری آماده‌سازی شده‌اند. بدین‌منظور ابتدا نمونه‌های مکعب مستطیلی به ابعاد ۲۰×۲۰×۲۰، ۳۰×۳۰×۳۰ و ۴۰×۴۰×۴۰ میلی‌متر آماده شده و سپس با استفاده از سنگ‌چین و سوهان به‌صورت مکعب‌های هم‌بعد چیده و بخش‌های ناهموار آن اصلاح و خرده ذرات مکعبی شکل در ابعاد ۲، ۳ و ۴ میلی‌متری تولید شده است. مراحل آماده‌سازی نمونه‌های خرده سنگی مکعبی در شکل ۲ نشان داده شده است.

1. International Society of Rock Mechanics

جدول ۱. مشخصات چینه‌نگاری، فیزیکی و مقاومتی نمونه‌های سنگی برداشت شده نمونه‌های S-1 تا S-8 برای توسعه روابط تجربی و نمونه‌های S-9 تا S-11 به منظور ارزیابی صحت نتایج تجربی ارائه شده به کار رفته‌اند.

| محل نمونه برداری | شناسه نمونه | سازند | سن زمین‌شناسی | نوع سنگ | درصد تخلخل | جرم واحد حجم (g/cm ³) | مقاومت فشاری تک‌محوری (Mpa) |
|--------------------|-------------|---------|---------------|-------------|------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| خرم‌آباد - گل‌پنبه | S-1 | آسماری | الیگوسن | دولومیکرایت | ۲ - ۳ | ۲/۶۰ | ۲۷۲/۸۰ |
| | S-2 | | | | ۱ < | ۲/۷۲ | ۲۶۲/۹۰ |
| | S-4 | | | | ۵ - ۶ | ۲/۶۳ | ۱۸۷/۳۵ |
| خرم‌آباد - مشگر | S-3 | آسماری | الیگوسن | آهک | ۴ - ۵ | ۲/۶۱ | ۲۲۵/۱۳ |
| | S-5 | | | | ۲ - ۳ | ۲/۶۴ | ۲۲۸/۱۰ |
| سد | S-6 | آسماری | الیگوسن | آهک مارنی | ۴ - ۵ | ۲/۵۳ | ۹۰/۶۰ |
| سد صیدون | S-7 | آسماری | الیگوسن | آهک | ۹ - ۱۲ | ۲/۳۸ | ۳۵/۴۰ |
| کازرون - دوان | S-8 | آسماری | الیگوسن | آهک | ۶ - ۷ | ۲/۵۰ | ۱۵۰/۷۰ |
| | S-9 | | | | ۳ - ۴ | ۲/۶۰ | ۱۶۶/۳۵ |
| لرستان - چنار | S-10 | تله زنگ | پلیوسن | آهک | ۱ < | ۲/۷۵ | ۲۶۰/۴۵ |
| سد | S-11 | سروک | کرتاسه | آهک | ۱ < | ۲/۷۰ | ۲۰۰ |



شکل ۲. مراحل آماده‌سازی خرده ذرات سنگی مکعبی شکل مربوط به آزمایش نفوذ: الف) دسته‌بندی بخش‌های باقی‌مانده از مغزه‌های اصلاح شده (ب) آماده‌سازی نمونه‌های مکعبی شکل با استفاده از سنگ‌چین و اصلاح بخش‌های چیده شده، ج) دسته‌بندی نمونه‌های مکعبی آماده شده، د) قالب‌گیری نمونه‌های سنگی مکعبی.

به‌منظور ثابت کردن نمونه‌های مکعبی آماده شده در حین آزمایش نفوذ، نمونه‌های مربوط در چسب صنعتی (با نام تجاری ML-506) قالب‌گیری شدند. مشخصات چسب مذکور در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. پارامترهای فیزیکی و مکانیکی چسب قالب‌گیری (ML-506)

| ویسکوزیته (Centipoise) | وزن مخصوص (gr/cm ³) | مقاومت ضربه‌ای (N/cm ²) | مقاومت چسبندگی (N/cm ²) | مدول کششی (N/cm ²) | استحکام کششی (N/cm ²) | مدول خمشی (N/cm ²) | مقاومت خمشی (N/cm ²) | مدول فشاری (N/cm ²) | مقاومت فشاری (N/cm ²) |
|---------------------------|---------------------------------------|---|---|--------------------------------------|---|--------------------------------------|--|---------------------------------------|---|
| ۱۴۵۰ | ۱/۱۱ | ۸۷/۵۰ | ۵۴۸۰ | ۲۷۸۹۰۰ | ۷۶۱۰ | ۳۶۴۵۴۰ | ۹۶۰ | ۹۳۷۱۰ | ۹۷۴۰ |

آزمایش‌های بارگذاری

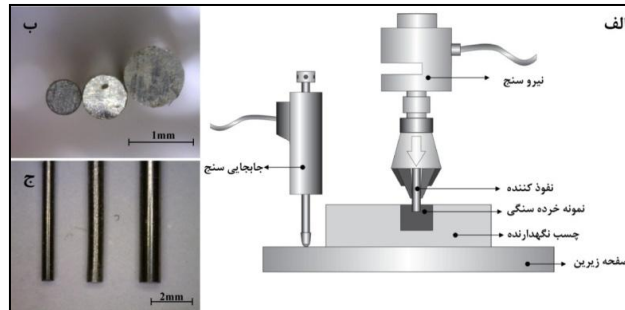
آزمایش فشاری تک‌محوری

روی مغزه‌های سنگی آماده شده (۵ مغزه سنگی کاملاً بکر از هر بلوک سنگی) مطابق استاندارد ISRM و در رطوبت طبیعی، آزمایش بارگذاری فشاری تک‌محوری انجام شده است. با توجه به جدول ۱ بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر USC به ترتیب مربوط به نمونه‌های ۱ و ۷ با مقاومت ۲۷۲/۸ و ۳۵/۳۰ مگاپاسکال هستند. مقادیر UCS اندازه‌گیری شده بر اساس تعریف دیر و میلر [۲۶] و بنیاوسکی [۲۷] از کم مقاوم تا بسیار مقاوم، کوآتس [۲۸] ضعیف تا خیلی قوی، IAEG، ISRM و انجمن زمین‌شناسی بریتانیا [۲۹] نسبتاً قوی تا بسیار قوی و براچ و فرانکلین [۳۰] از مقاومت زیاد تا فوق‌العاده مقاوم، متغیر است. اختلاف کم‌ترین بیش‌ترین مقادیر USC در تحقیق حاضر معادل ۲۳۵ MPa است که با توجه به توصیه وزارت معدن کانادا در باره طیف مقاومتی نمونه‌های آزمایش شده به‌منظور هم‌بستگی پارامترهای مقاومتی با UCS، مقداری مناسب است [۳۱].

آزمایش نفوذ

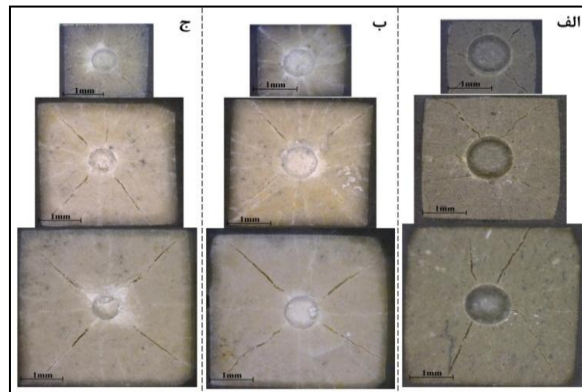
در شکل ۳ الف نحوه اعمال بار و سیستم ثبت تغییرات در آزمایش نفوذ نشان داده شده است. به‌منظور بررسی قطر نفوذکننده در آزمایش نفوذ، نفوذکننده‌هایی با قطر ۰/۶، ۰/۸ و ۱ میلی‌متر از جنس تنگستن کارباید استفاده شده است. در شکل ۳ ب و ج، مقطع عرضی و طولی نفوذکننده‌های به‌کار رفته در تحقیق حاضر نشان داده شده است. با هدف بررسی اثر

ابعاد خرده ذرات نمونه‌های آزمایشگاهی مکعبی با ابعاد ۲، ۳ و ۴ میلی‌متری به ترتیب تا ۳۰۰، ۵۰۰ و ۸۰۰ میکرون و با نرخ کرنش ۱ میلی‌متر در ساعت (معادل ۱۸، ۳۰ و ۴۸ دقیقه بارگذاری) آزمایش شده‌اند.



شکل ۳. الف) آزمایش نفوذ در خرده ذرات مجزا و سیستم ثبت تغییرات، ب) مقطع عرضی نفوذکننده‌های به کار رفته در تحقیق حاضر، ج) مقطع طولی نفوذکننده‌ها.

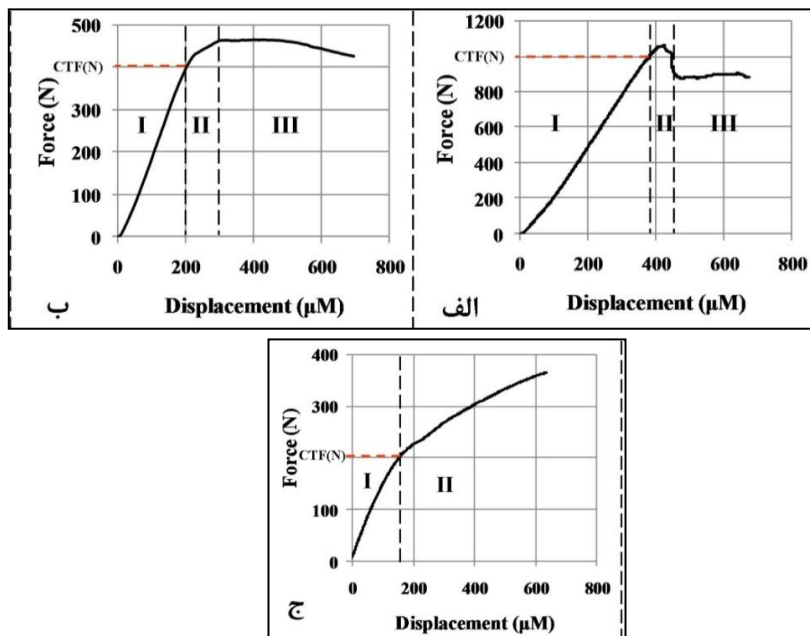
با توجه به پیشنهاد احمدی و همکاران تعداد نمونه‌های آزمایش شده در ابعاد مختلف با استفاده از نفوذکننده‌های مختلف، ۱۰ عدد در نظر گرفته شده است [۳۲]. بنا بر این ۷۲۰ آزمایش بر خرده ذرات مربوط به نمونه‌های S-1 تا S-8 به منظور هم‌بستگی پارامتر مقاومتی خرده ذرات (CTF) و مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) انجام شده است. شکل ۴، خرده ذرات آزمایش شده در ابعاد مختلف را پس از آزمایش نفوذ با استفاده از نفوذکننده‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۴. ذرات خرده سنگی پس از آزمایش نفوذ. که با استفاده از نفوذکننده‌های الف) ۱ میلی‌متری، ب) ۰/۸ میلی‌متری و ج) ۰/۶ میلی‌متری، تحت نفوذ قرار گرفته‌اند

نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی

شکل ۵ حالت‌های مختلفی از نمودار نیرو-جاب‌جایی مربوط به آزمایش نفوذ در خرده ذرات آهکی مختلف را نشان می‌دهد. نمودارهای مذکور مربوط به سه خرده ذره آهکی ۳ میلی متری، با مقاومت‌های مختلف است که از آزمایش نفوذ با نفوذکننده ۱ میلی متری به دست می‌آیند.



شکل ۵. نمودارهای نیرو-جاب‌جایی مربوط به آزمایش نفوذ با استفاده از نفوذکننده‌های ۱ میلی متری در خرده ذرات سنگی ۳ میلی متری با الف) الگوی شکست الاستیک در مورد نمونه‌های با مقادیر UCS بالاتر از ۱۹۰ مگاپاسکال (نمونه‌های 1-S تا S-5 و S-10 و S-11)، ب) الاستوپلاستیک، در مورد نمونه‌های با مقادیر UCS در محدوده کم‌تر از ۱۶۰ مگاپاسکال (S-8 و S-9) و ج) پلاستیک، در مورد نمونه‌های با مقادیر UCS کم‌تر از ۹۰ مگاپاسکال (S-6 و S-7).
با توجه به شکل ۵، سه ناحیه متمایز در نمودارها قابل تشخیص است. ناحیه I، که به صورت خطی صاف در نمودار مشخص شده و منطقه تناسب^۱ نامیده می‌شود [۲۲]. در این ناحیه رفتار

1. Proportionality zone

نمونه تحت اعمال بار از نوع الاستیک است. ناحیه II، به‌عنوان ناحیه‌گذار معرفی می‌شود که در آن رفتار نمونه از الاستیک به پلاستیک (با حالت غیرقابل بازگشت) تغییر یافته است. در این ناحیه افت قابل توجه در بار اعمالی، مشاهده نمی‌شود. نیروی انتقال بحرانی^۱، (CTF) در این ناحیه از نمودار اندازه‌گیری شده است و عبارت است از نیرویی که به‌ازاء آن نمودار نیرو-جاب‌جایی از حالت خطی خارج شده است. این پارامتر بر حسب نیوتن اندازه‌گیری می‌شود و نشان دهنده آغاز ورود فک نفوذکننده به نمونه آزمایشی است. در شکل ۵ نیروی انتقال بحرانی حداکثر نیروی ثبت شده در انتهایی‌ترین بخش ناحیه I و ابتدایی‌ترین بخش ناحیه II است. ناحیه III، به‌عنوان ناحیه شکست شناخته می‌شود. در این ناحیه رفتار خرده ذرات غیرقابل بازگشت است و با توجه به شکستگی‌های رخ داده در نمونه، با ادامه روند بارگذاری، میزان نیروی اعمالی به نمونه پیوسته کاهش می‌یابد. سیر نزولی ناگهانی که در ناحیه III شکل ۵ الف مشاهده می‌شود، به رفتار خرده ذرات مقاوم در لحظه شکست مربوط است. خرده ذرات مربوط به نمونه‌های S-1 تا S-5، S-10 و S-11 با مقادیر UCS بیش‌تر از ۱۹۰ مگاپاسکال دارای چنین رفتاری (الگوی رفتاری الاستیک) در لحظه گسیختگی هستند.

در نمودار نیرو-جاب‌جایی ارائه شده در شکل ۵ ب سیر نزولی نمودار پس از شکست نمونه، ملایم و یک‌نواخت است. این الگوی رفتاری (الگوی الاستوپلاستیک) در آزمایش نمونه‌هایی که دارای مقادیر UCS حدود ۱۶۰ الی ۱۵۰ مگاپاسکال هستند، مشاهده می‌شود. خرده ذرات مربوط به نمونه‌های S-8 و S-9 در این گروه رفتاری قرار می‌گیرند.

با توجه به شکل ۵ ج، نمودار نیرو-جاب‌جایی فاقد ناحیه III است. این الگوی رفتاری به نمونه‌های نرم که مقادیر UCS کم‌تر از ۱۰۰ مگاپاسکال دارند مربوط است. پس از نفوذ فک مربوطه در این نمونه‌ها روند صعودی نمودار مربوط با شیب کم‌تری حفظ شده و افت خاصی در نمودار نیرو-جاب‌جایی مشاهده نمی‌شود. خرده ذرات مربوط به نمونه‌های S-6 و S-7 دارای این الگوی رفتاری (الگوی رفتاری پلاستیک) هستند.

در همه نمودارهای نیرو-جاب‌جایی، نمودار پس از شکست خرده ذره به‌دلیل فشار جانبی چسب نگه‌دارنده به‌صورت ناگهانی افت نکرده، بلکه شیب خط نمودار نیرو-جاب‌جایی به‌سمت

1. Critical Transition Force (CTF)

صفر میل می‌کند. در این حالت نمونه به‌طور کلی گسیخته شده و میزان نیروی باقی مانده، به فشار جانبی چسب نگه‌دارنده مربوط است. مقادیر میانگین CTF به‌دست آمده از آزمایش نفوذ بر ۷۲۰ نمونه خرده سنگی با ابعاد مختلف و بازا نفوذکننده‌های مختلف مربوط به آزمایش نفوذ در جدول ۳ ارائه شده است.

به‌منظور ارزیابی دقت داده‌های به‌دست آمده و بررسی کفایت تعداد آزمایش‌های انجام شده، از روش گیل و همکاران استفاده شده است [۳۳]. در این روش برای ارزیابی اعتبار داده‌های به‌دست آمده، از شاخصی به‌نام شاخص دقت^۱ (P) استفاده می‌شود که مقدار آن همواره از ۱ بیش‌تر است و از رابطه^۵ (۵) محاسبه می‌شود:

$$P = \frac{\bar{X} + t_{\beta} \frac{s}{\sqrt{N-1}}}{\bar{X} - t_{\beta} \frac{s}{\sqrt{N-1}}} \quad P \geq 1 \quad (5)$$

\bar{X} میانگین حسابی داده‌های مورد نظر است. شاخص دقت بازا $N = \infty$ برابر ۱ خواهد شد. t_{β} پارامتری است که شاخص اطمینان را تعریف می‌کند و s انحراف از معیاری است که پراکندگی ارزش‌های مشاهده شده از N تعداد نمونه‌های مورد نظر را تعیین می‌کند و از رابطه^۶ محاسبه می‌شود:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N-1}} \quad (6)$$

در رابطه^۶، X_i مقادیر اندازه‌گیری شده از N تعداد نمونه مورد نظر است. گیل و همکاران مقدار $P \leq 1/2$ با شاخص اطمینان بیش‌تر از ۹۵٪ را به‌عنوان شاخص دقت پذیرفته شده در فعالیت‌های پژوهشی دقیق معرفی کرده‌اند.

در جدول ۴، شاخص دقت، تعداد نمونه‌های مورد نیاز (N) برای انجام آزمایش علمی معتبر، میانگین انحراف معیار^۲، ضریب تغییرات^۳ (CV) مربوط به CTF به‌دست آمده از آزمایش نفوذ بر خرده ذرات سنگی مکعبی شکل در سه اندازه مختلف (۲، ۳ و ۴ میلی‌متر) و با استفاده سه نفوذکننده با قطرهای ۰/۶ میلی‌متر، ۰/۸ میلی‌متر و ۱ میلی‌متر ارائه شده است.

1. Precision Index (P) 2. Standard Deviation 3. Coefficient of Variation

جدول ۳. میانگین مقادیر CTF مربوط به آزمایش نفوذ بر خرده ذرات سنگی با ابعاد ۲، ۳ و ۴ میلی‌متری، با استفاده از نفوذکننده‌های ۰/۶، ۰/۸ و ۱ میلی‌متری و الگوی رفتاری مربوط به خرده ذرات بارگذاری شده بر اساس دسته‌بندی‌های انجام شده در شکل ۵

| شناسه نمونه | UCS (MPa) | اندازه خرده ذرات (mm) | قطر نفوذ کننده (mm) | | | الگوی رفتاری |
|-------------|-----------|-----------------------|---------------------|--------|---------|---------------|
| | | | ۰/۶۰ | ۰/۸۰ | ۱ | |
| | | | میانگین CTF (N) | | | |
| S-1 | ۲۷۲/۸۰ | ۲ | ۳۶۸/۰۳ | ۴۲۹/۹۸ | ۴۸۹/۹۷ | الاستیک |
| | | ۳ | ۵۵۰/۵۶ | ۷۱۵/۹۵ | ۹۴۷/۷۷ | |
| | | ۴ | ۶۷۸/۳۹ | ۸۸۴/۱۰ | ۱۱۴۶/۶۰ | |
| S-2 | ۲۶۲/۹۰ | ۲ | ۳۷۸/۶۲ | ۶۴۶/۷۹ | ۴۲۹/۳۷ | الاستیک |
| | | ۳ | ۵۳۲/۱۲ | ۶۹۲/۰۶ | ۶۹۰/۳۱ | |
| | | ۴ | ۵۷۹/۱۵ | ۷۴۴/۵۸ | ۱۰۲۲/۳۰ | |
| S-3 | ۱۸۷/۳۵ | ۲ | ۳۰۴/۵۰ | ۴۱۷/۴۰ | ۴۱۴/۷۹ | الاستیک |
| | | ۳ | ۴۱۸/۰۱ | ۵۸۰/۶۱ | ۶۹۰/۷۲ | |
| | | ۴ | ۵۰۷/۵۴ | ۵۷۹/۴۸ | ۸۸۶/۶۳ | |
| S-4 | ۲۲۵/۱۳ | ۲ | ۳۳۱/۸۷ | ۴۰۵/۱۹ | ۴۹۲/۲۹ | الاستیک |
| | | ۳ | ۴۰۱/۵۱ | ۵۷۸/۲۲ | ۸۰۴/۸۶ | |
| | | ۴ | ۵۰۷/۹۸ | ۷۲۹/۵۰ | ۱۰۶۹/۴۰ | |
| S-5 | ۲۲۸/۱۰ | ۲ | ۳۵۴/۸۴ | ۳۹۷/۴۷ | ۴۸۱/۴۸ | الاستیک |
| | | ۳ | ۴۵۸/۴۱ | ۶۵۹/۷۹ | ۸۶۶/۷۱ | |
| | | ۴ | ۶۲۲/۱۰ | ۸۰۴/۷۶ | ۱۲۶۲/۲۰ | |
| S-6 | ۹۰/۶۰ | ۲ | ۶۸ | ۱۳۱/۰۲ | ۱۹۱/۶۴ | پلاستیک |
| | | ۳ | ۸۷ | ۱۴۱/۴۹ | ۲۱۳/۳۱ | |
| | | ۴ | ۱۱۰ | ۱۶۸/۱۸ | ۲۵۶/۸۸ | |
| S-7 | ۳۵/۴۰ | ۲ | ۱۰۰ | ۱۵۵/۸۹ | ۲۳۴/۷۰ | پلاستیک |
| | | ۳ | ۱۱۰ | ۱۲۵/۰۳ | ۱۶۰ | |
| | | ۴ | ۹۲/۵۰ | ۱۶۲/۹۱ | ۱۵۵ | |
| S-8 | ۱۵۰/۷۰ | ۲ | ۱۹۲/۳۰ | ۲۲۶ | ۲۹۴/۲۰ | الاستوپلاستیک |
| | | ۳ | ۲۲۶ | ۳۲۵ | ۴۸۲/۲۰ | |
| | | ۴ | ۲۵۵ | ۳۵۲/۵۰ | ۵۱۰ | |

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴ با کاهش قطر نفوذکننده و افزایش ابعاد خرده ذره آزمایش شده ضریب تغییرات، تعداد نمونه‌های لازم برای انجام آزمایشی علمی و شاخص دقت کاهش یافته است. به این معنا که با افزایش قطر خرده ذرات و کاهش قطر نفوذکننده، نتایج مربوط از تکرارپذیری بیش‌تری برخوردارند. با توجه به شاخص N در جدول، تعداد

نمونه‌های آزمایش شده (۱۰ عدد در هر اندازه و با هر قطر نفوذکننده) به منظور ارزیابی مقاومت خرده ذرات سنگی کافی بوده است.

جدول ۴. پارامترهای آماری مربوط به مقادیر CTF به دست آمده از آزمایش نفوذ

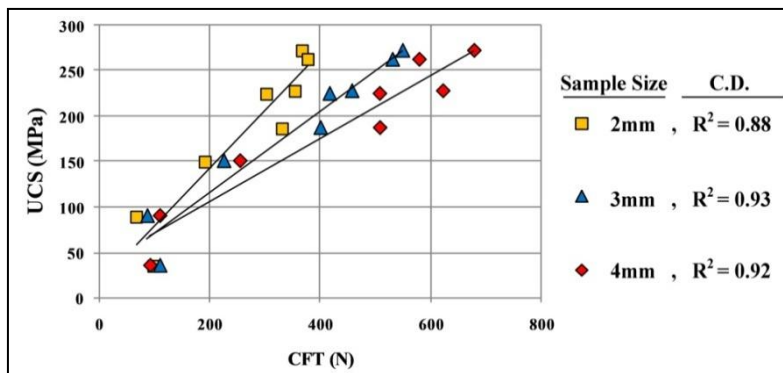
| N | شاخص دقت | ضریب تغییرات (%) | انحراف معیار | اندازه خرده ذرات (mm) | قطر نفوذ کننده (mm) |
|---|----------|------------------|--------------|-----------------------|---------------------|
| ۵ | ۱/۱۳ | ۷/۸۵ | ۲۷/۲۹ | ۲ | ۰/۶۰ |
| ۷ | ۱/۱۶ | ۹/۵۳ | ۴۵/۵۱ | ۳ | |
| ۴ | ۱/۱۰ | ۶/۱۷ | ۳۵/۶۶ | ۴ | |
| ۶ | ۱/۱۴ | ۸/۳۴ | ۳۲/۶۱ | ۲ | ۰/۸۰ |
| ۵ | ۱/۱۲ | ۷/۷۱ | ۳۹/۹۳ | ۳ | |
| ۴ | ۱/۱۱ | ۷/۱۸ | ۴۴/۳۸ | ۴ | |
| ۶ | ۱/۱۴ | ۸/۷۴ | ۳۶/۳۷ | ۲ | ۱ |
| ۶ | ۱/۱۴ | ۸/۶۳ | ۵۸/۴۹ | ۳ | |
| ۵ | ۱/۱۳ | ۸/۰۸ | ۷۳/۵۸ | ۴ | |

همبستگی بین UCS و CTF

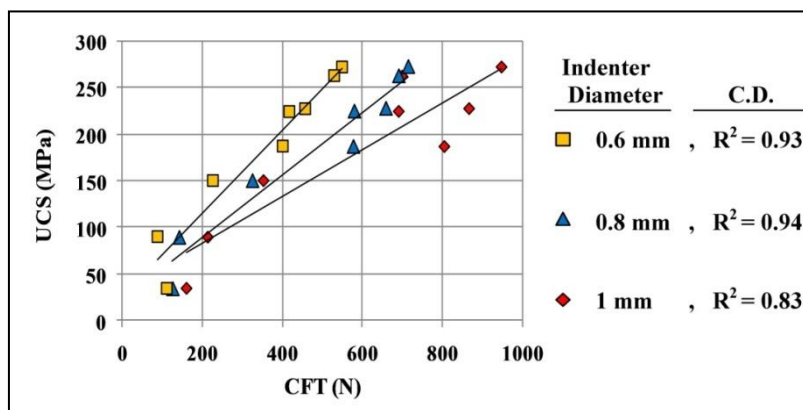
شکل ۶ همبستگی بین مقادیر UCS و CTF خرده ذرات در اندازه‌های ۲، ۳ و ۴ میلی‌متر که با نفوذکننده ۰/۶ میلی‌متری آزمایش شده‌اند را نشان می‌دهد. با افزایش اندازه خرده ذرات، شیب خطوط برازش داده شده کاهش یافته است. با این حال مقادیر بالای ضرایب تعیین (C.D.) مربوط به همبستگی‌های برقرار شده، نشان‌دهنده ارتباط خوب بین مقاومت فشاری تک محوری سنگ و پارامترهای مقاومتی خرده ذرات (نیروی انتقال بحرانی) مربوط به سنگ مورد نظر است. با توجه به شکل ۶، بیشترین همبستگی مربوط به ذرات ۳ و ۴ میلی‌متری و کمترین همبستگی مربوط به ذرات ۲ میلی‌متری است.

شکل ۷، همبستگی UCS-CTF خرده ذرات ۳ میلی‌متری که با نفوذکننده دارای قطرهای ۰/۶، ۰/۸ و ۱ میلی‌متری آزمایش شده‌اند را نشان می‌دهد. چنان‌که مشاهده می‌شود، با افزایش قطر نفوذکننده شیب خطوط برازش داده کاهش یافته است و بیشترین همبستگی مربوط به نفوذکننده‌های ۰/۶ و ۰/۸ میلی‌متری و کمترین همبستگی مربوط به نفوذکننده ۱ میلی‌متری است.

1. Confection of Determination



شکل ۶. هم‌بستگی CTF-UCS مربوط به خرده‌های سنگی ۲، ۳ و ۴ میلی‌متری که با نفوذکننده ۰/۶ میلی‌متری آزمایش شده‌اند



شکل ۷. هم‌بستگی CTF-UCS مربوط به خرده‌های سنگی ۳ میلی‌متری که با نفوذکننده‌های ۰/۶، ۰/۸ و ۱ میلی‌متری آزمایش شده‌اند.

با این حال مقادیر زیاد ضرایب تعیین مربوط به هم‌بستگی‌های برقرار شده، نشان‌دهنده ارتباط خوب بین مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ و پارامترهای مقاومتی خرده ذرات (نیروی انتقال بحرانی) بازای نفوذکننده با قطرهای مختلف است.

شکل‌های ۶ و ۷ به روشنی نشان می‌دهند که اندازه خرده ذرات و قطر نفوذکننده در هم‌بستگی‌های برقرار شده تاثیرگذار است. با توجه به این‌که در تحقیق حاضر خرده ذرات در سه اندازه مختلف با سه نفوذکننده با قطرهای مختلف آزمایش شده‌اند از این رو، رابطه تجربی به شرح جدول ۵ برای تخمین UCS از روی CTF پیشنهاد شده است. ضرایب تعیین

برای هر کدام از روابط تجربی در این جدول مشخص شده است. این ضرایب نشان می‌دهد با افزایش اندازه خرده ذرات و کاهش قطر نفوذ کننده، همبستگی مربوط به روابط تجربی افزایش یافته است. کمترین ضریب تعیین به خرده ذرات ۲ میلی‌متری که با نفوذکننده ۱ میلی‌متری آزمایش شده‌اند، مربوط است ($R^2 = 0.78$). در این مقاله روابط تجربی ارائه شده در جدول ۵ به‌عنوان روابط تجربی اولیه^۱ معرفی شده‌اند.

جدول ۵. روابط تجربی بین UCS و CTF مربوط به خرده ذرات آزمایش شده در ابعاد مختلف با استفاده از نفوذکننده‌های مختلف

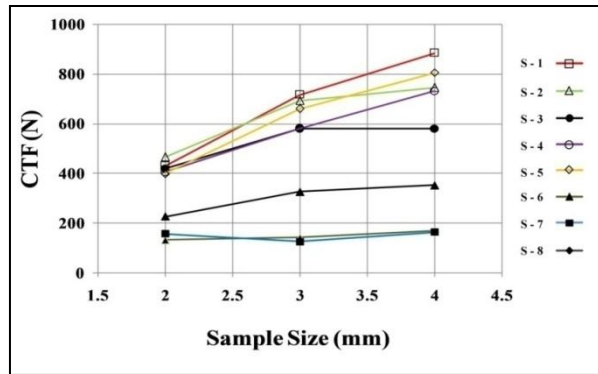
| شناسه رابطه | ضریب تعیین (R^2) | رابطه تجربی | اندازه نمونه (mm) | قطر نفوذ کننده (mm) |
|-------------|----------------------|--------------------------|-------------------|---------------------|
| ۷ | ۰/۸۸ | UCS = 0.65 (CTF) + 9.48 | ۲ | ۰/۶۰ |
| ۸ | ۰/۹۳ | UCS = 0.46 (CTF) + 17.59 | ۳ | |
| ۹ | ۰/۹۲ | UCS = 0.36 (CTF) + 25.80 | ۴ | |
| ۱۰ | ۰/۸۷ | UCS = 0.61 (CTF) - 25.88 | ۲ | ۰/۸۰ |
| ۱۱ | ۰/۹۴ | UCS = 0.34 (CTF) + 14.1 | ۳ | |
| ۱۲ | ۰/۸۶ | UCS = 0.28 (CTF) + 21.71 | ۴ | |
| ۱۳ | ۰/۷۸ | UCS = 0.63 (CTF) - 58.75 | ۲ | ۱ |
| ۱۴ | ۰/۸۵ | UCS = 0.26 (CTF) + 20.01 | ۳ | |
| ۱۵ | ۰/۸۴ | UCS = 0.19 (CTF) + 30.16 | ۴ | |

۱. همبستگی بین CTF و UCS با استفاده از رگرسیون چند متغیره

روابط تجربی ارائه شده در جدول ۵ در مورد خرده ذرات با اندازه مشخص (۲، ۳ و ۴ میلی‌متری) که با نفوذکننده‌های با قطر مشخص (۰/۶۰، ۰/۸۰ و ۱ میلی‌متر) آزمایش شده‌اند، کاربرد دارند. به‌منظور ارائه رابطه تجربی کلی که در آن اثر اندازه خرده ذرات و قطر نفوذکننده لحاظ شده باشد از رگرسیون چند متغیره استفاده شده است. در این روش متغیرهای مستقل و وابسته پردازش شده و اثر هر یک از متغیرهای مستقل بر متغیرهای وابسته تعیین شده است.

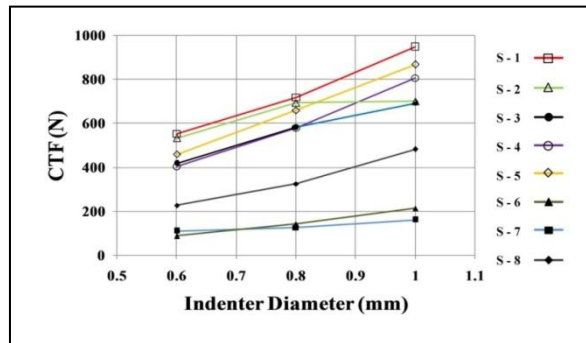
1. Primary

اولین متغیر مستقل تأثیرگذار در هم‌بستگی UCS-CTF اندازه خرد ذرات است. در شکل ۸ میانگین CTF به‌ازای اندازه خرد ذرات که همگی با نفوذکننده‌ای با قطر یک‌سان (۰/۸ میلی‌متر) آزمایش شده‌اند، با یک‌دیگر مقایسه شده، چنان‌که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، با افزایش اندازه خرد ذرات، CTF مربوط به نمونه‌های آزمایش شده، افزایش یافته است.



شکل ۸. مقایسه میانگین مقادیر CTF مربوط به خرد ذرات در اندازه‌های مختلف که با نفوذ کننده ۰/۸ میلی‌متری آزمایش شده‌اند

قطر نفوذکننده به کار رفته در آزمایش نفوذ، دومین متغیر مستقل تأثیرگذار در هم‌بستگی‌های برقرار شده است. در شکل ۹ تغییر میانگین مقادیر CTF مربوط به خرد ذرات ۳ میلی‌متری به‌ازای افزایش قطر نفوذکننده نشان داده شده، با افزایش قطر نفوذکننده، میانگین CTF اندازه‌گیری شده افزایش یافته است.



شکل ۹. مقایسه میانگین مقادیر CTF مربوط به خرد ذرات ۳ میلی‌متری که با نفوذکننده‌های مختلف آزمایش شده‌اند

میانگین CTF به خصوصیات مواد^۱ تشکیل دهنده خرده ذرات وابسته است و به عنوان سومین متغیر مستقل در نظر گرفته شده است. در نهایت مقدار UCS نمونه‌های سنگی به عنوان متغیر وابسته که از متغیرهای مستقل یاد شده تأثیرپذیر است، در نظر گرفته شده است. رابطه (۱۶) با ضریب همبستگی $(R^2) = 0.85$ به عنوان رابطه تجربی حاصل از رگرسیون چند متغیری انجام گرفته در نرم افزار SPSS است که در این تحقیق با عنوان رابطه تجربی کلی^۳ معرفی شده است:

$$R^2=0.85, \quad USC = 0.29(CTF) - 41.28(D) - 186.47(I) + 317.63 \quad (16)$$

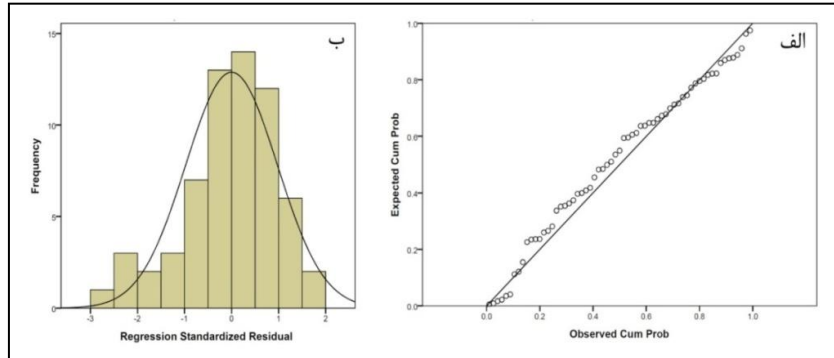
در رابطه مذکور D، اندازه خرده ذرات آزمایش شده و I قطر نفوذکننده به کار رفته در آزمایش نفوذ است. با توجه به ضریب همبستگی بالا انتظار می‌رود رابطه فوق در تخمین مقادیر UCS، کاربردی باشد. در شکل ۱۰ الف مقایسه بین مقادیر نرمال شده متغیر وابسته ارائه شده به نرم افزار SPSS و تخمین زده با استفاده از رگرسیون چند متغیره و شکل ۱۰ ب نمودار توزیع نرمال داده‌های پردازش شده در نرم افزار SPSS، ارائه شده است. چنان‌که در شکل مشاهده می‌شود، توزیع داده‌های مربوطه نرمال است و مقادیر تخمین زده و اندازه‌گیری شده با اختلاف کمی به هم نزدیک هستند.

۲. ارزیابی صحت روابط تجربی ارائه شده

به منظور ارزیابی صحت روابط به دست آمده از رگرسیون خطی (روابط ۷ تا ۱۵) به عنوان روابط تجربی اولیه و رابطه (۱۶) که با استفاده از رگرسیون چند متغیره به دست آمده به عنوان رابطه کلی، ابتدا ذرات خرده سنگی مربوط به نمونه‌های S-9، S-10 و S-11 مطابق آنچه در بخش ۱ توضیح داده شد، در اندازه‌های ۲، ۳ و ۴ میلی‌متر آماده شدند. با توجه به نتایج به دست آمده در جدول ۴، از هر نمونه در هر اندازه تعداد ۱۵ خرده ذره تهیه شده است. در این حالت ۵ خرده ذره در هر اندازه با استفاده از نفوذ کننده‌های ۰/۶، ۰/۸ و ۱ میلی‌متری آزمایش شده (تعداد ۱۳۵ آزمایش) و CTF مربوط به آن‌ها تعیین شده است. برای تخمین UCS

1. Material Properties 2. Correlation Coefficient 3. General Relation

نمونه‌ها ابتدا از روابط تجربی اولیه (روابط موجود در جدول ۵) استفاده شده و مقادیر UCS هر نمونه تخمین زده شده است. علاوه بر آن با توجه به مشخص بودن اندازه خرده ذرات (D)، قطر نفوذکننده (I) و مقدار CTF با استفاده از رابطه تجربی کلی (رابطه ۱۶)، UCS هر نمونه تخمین زده شده که مقادیر مربوط به آن در جدول ۶ ارائه شده است.



شکل ۱۰. نمودارهای حاصل از پردازش داده‌ها با استفاده از رگرسیون چند متغیره الف) مقایسه بین مقادیر نرمال شده متغیر وابسته ارائه شده به نرم‌افزار SPSS و تخمین زده با استفاده از رگرسیون چندمتغیره، ب) نمودار توزیع نرمال داده‌ها.

مقایسه مقادیر UCS تخمین زده شده و اندازه‌گیری شده در شکل ۱۱ ارائه شده است. به‌منظور دقت کمی تخمین مقادیر UCS از میزان خطای تخمین^۱ استفاده شده است. درصد خطای مقادیر UCS تخمین زده نیز با استفاده از رابطه ۱۷ محاسبه و در جدول ۶ ارائه شده است. این رابطه در واقع درصد میزان اختلاف مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمین زده را نشان می‌دهد. مقدار درصد خطای تخمین در صورتی که مقادیر تخمین زده و اندازه‌گیری شده به هم نزدیک باشند به سمت صفر میل می‌کند، مثبت بودن این مقدار نشان می‌دهد که مقادیر تخمین زده از مقادیر اندازه‌گیری شده بیش‌تر است و منفی بودن این مقدار خلاف این مطلب را نشان می‌دهد.

$$E.e. = \left(\frac{E_{UCS}}{M_{UCS}} - 1 \right) \times 100 \quad (17)$$

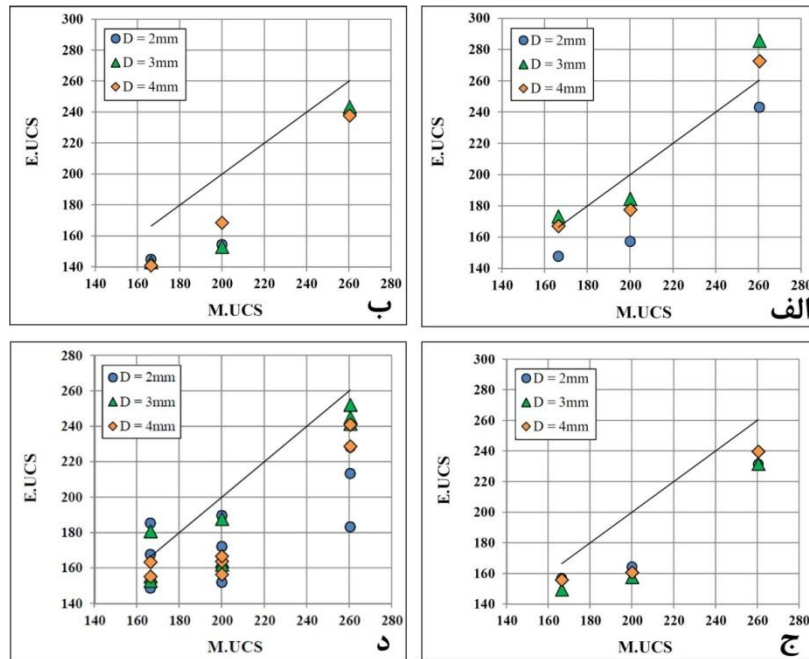
در رابطه مذکور E.e. و E_{UCS} و M_{UCS} به ترتیب درصد خطای تخمین، UCS تخمین زده شده و UCS محاسبه شده هستند.

1. Error of Estimation

جدول ۶. مقادیر میانگین UCS اندازه گیری شده و تخمین زده با استفاده از روابط تجربی اولیه (روابط ارائه شده در جدول ۵) و رابطه تجربی کلی (رابطه ۱۶) به همراه مقادیر درصد خطای تخمین مربوط

| شنا سه نمونه | UCS اندازه گیری | قطر نفوذکننده (mm) | اندازه نمونه (mm) | CTF (N) | UCS تخمین زده با استفاده از | مقادیر خطای تخمین روابط | UCS تخمین زده با | مقادیر خطای تخمین رابطه کلی | | |
|--------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------------|------------|-----------------------------------|-------------------------------|------------------------|-----------------------------------|--------|--------|
| S-9 | ۱۶۶/۳۵ | ۰/۶ | ۲ | ۲۱۲/۵۰ | ۱۴۷/۶۰ | -۱۱/۲۶ | ۱۸۵/۲۲ | ۱۱/۳۴ | | |
| | | | ۳ | ۳۳۸/۷۱ | ۱۷۳/۳۹ | ۴/۲۳ | ۱۸۰/۷۹ | ۸/۶۸ | | |
| | | | ۴ | ۳۹۲/۴۷ | ۱۶۷/۰۸ | ۰/۴۴ | ۱۵۵/۲۰ | -۶/۷۰ | | |
| | | ۰/۸ | ۲ | ۲۷۹/۸۸ | ۱۴۴/۸۴ | -۱۲/۹۲ | ۱۶۷/۶۰ | ۰/۷۵ | | |
| | | | ۳ | ۳۷۹/۰۶ | ۱۴۲/۹۸ | -۱۴/۰۴ | ۱۵۵/۲۸ | -۶/۶۵ | | |
| | | | ۴ | ۴۲۵/۶۳ | ۱۴۰/۸۸ | -۱۵/۳۰ | ۱۳۵/۴۷ | -۱۸/۵۶ | | |
| | | ۱ | ۲ | ۳۴۲/۱۳ | ۱۵۶/۷۹ | -۵/۷۴ | ۱۴۸/۴۹ | -۱۰/۷۳ | | |
| | | | ۳ | ۴۹۸/۱۲ | ۱۴۹/۵۲ | -۱۰/۱۱ | ۱۵۲/۷۵ | -۸/۱۷ | | |
| | | | ۴ | ۶۶۱/۳۳ | ۱۵۵/۸۱ | -۶/۳۳ | ۱۶۳/۲۸ | -۱/۸۴ | | |
| | | S-11 | ۲۶۰/۴۵ | ۰/۶ | ۲ | ۳۵۹/۵۴ | ۲۴۳/۱۸ | -۶/۶۳ | ۲۲۸/۱۶ | -۱۲/۳۹ |
| | | | | | ۳ | ۵۸۲/۷۷ | ۲۸۵/۶۶ | ۹/۶۸ | ۲۵۲/۰۵ | -۳/۲۲ |
| | | | | | ۴ | ۶۸۵/۹۲ | ۲۷۲/۷۳ | ۴/۷۱ | ۲۴۰/۸۹ | -۷/۵۱ |
| ۰/۸ | ۲ | | | ۴۳۵/۹۳ | ۲۴۰/۰۳ | -۷/۸۳ | ۲۱۳/۱۷ | -۱۸/۱۵ | | |
| | ۳ | | | ۶۷۴/۴۴ | ۲۴۳/۴۰ | -۶/۵۴ | ۲۴۱/۵۳ | -۷/۲۶ | | |
| | ۴ | | | ۷۷۱/۵۹ | ۲۳۷/۷۵ | -۸/۷۱ | ۲۲۸/۶۱ | -۱۲/۲۲ | | |
| ۱ | ۲ | | | ۴۶۰/۴۵ | ۲۳۱/۳۳ | -۱۱/۱۷ | ۱۸۳/۰۴ | -۲۹/۷۲ | | |
| | ۳ | | | ۸۱۳/۶۵ | ۲۳۱/۵۵ | -۱۱/۰۹ | ۲۴۴/۸۸ | -۵/۹۷ | | |
| | ۴ | | | ۱۱۰۳/۰۵ | ۲۳۹/۷۴ | -۷/۹۵ | ۲۸۸/۱۰ | -۱۰/۶۱ | | |
| S-12 | ۲۰۰ | | | ۰/۶ | ۲ | ۲۲۷/۰۵ | ۱۵۷/۰۶ | -۲۱/۴۶ | ۱۸۹/۴۷ | -۵/۲۶ |
| | | | | | ۳ | ۳۶۲/۸۷ | ۱۸۴/۵۱ | -۷/۷۴ | ۱۸۷/۸۵ | -۶/۰۷ |
| | | | | | ۴ | ۴۲۱/۵۲ | ۱۷۷/۵۴ | -۱۱/۲۲ | ۱۶۳/۶۸ | -۱۸/۱۶ |
| | | ۰/۸ | ۲ | ۲۹۵/۳۳ | ۱۵۴/۲۷ | -۲۲/۸۶ | ۱۷۲/۱۲ | -۱۳/۹۴ | | |
| | | | ۳ | ۴۰۸/۳۰ | ۱۵۲/۹۲ | -۲۳/۵۳ | ۱۶۳/۸۱ | -۱۸/۰۹ | | |
| | | | ۴ | ۵۲۴/۲۰ | ۱۶۸/۴۸ | -۱۵/۷۵ | ۱۵۶/۳۷ | -۲۱/۸۱ | | |
| ۱ | ۲ | ۳۵۳/۸۵ | ۱۶۴/۱۷ | -۱۷/۹۱ | ۱۵۱/۹۱ | -۲۴/۰۴ | | | | |
| | ۳ | ۵۲۹/۳۵ | ۱۵۷/۶۴ | -۲۱/۱۷ | ۱۶۱/۸۷ | -۱۹/۰۶ | | | | |
| | ۴ | ۶۸۷/۰۴ | ۱۶۰/۶۹ | -۱۹/۶۵ | ۱۶۶/۶۳ | -۱۶/۶۸ | | | | |

با توجه به جدول ۶، روابط تجربی اولیه با خطای کم‌تری (به‌طور میانگین ۱۱/۷۱ درصد) نسبت به رابطه کلی (به‌طور میانگین ۱۲ درصد) مقادیر UCS خرده ذرات سنگی آزمایش شده را تخمین زده‌اند. در مجموع می‌توان اذعان داشت، مقادیر به‌دست آمده از رابطه کلی نیز به‌خوبی روابط تجربی اولیه قابلیت تخمین مقادیر UCS مربوط به نمونه‌های سنگ آهک میکرایتی را داراست. بنا بر این روابط ارائه شده قادرند مقادیر UCS مربوط به نمونه‌های سنگی آهک میکرایتی را با کم‌تر از ۱۲ درصد خطا تخمین بزنند.



شکل ۱۱. مقایسه مقادیر UCS تخمین زده (M.UCS) و اندازه‌گیری شده (E.UCS) با استفاده از روابط تجربی ابتدایی (P) و کلی (G)، الف) نفوذ ۰/۶ میلی‌متری (رابطه ۷ الی ۹)، ب) نفوذکننده ۰/۸ میلی‌متری (رابطه ۱۰ الی ۱۲)، ج) نفوذکننده ۱ میلی‌متری (رابطه ۱۳ الی ۱۵) د) رابطه کلی (رابطه ۱۶)

نتیجه گیری

در این مقاله برای تخمین غیرمستقیم UCS، استفاده از خرده ذرات سنگی پیشنهاد شد و از آزمایش نفوذ در خرده ذرات سنگی، استفاده شده است. بدین منظور بعد از آزمایش فشاری تک محوری روی ۸ نمونه در آزمایشگاه تعداد ۷۲۰ خرده ذره از نمونه‌های آزمایش شده، آماده‌سازی شده است. با توجه به تأثیر شکل و اندازه خرده ذرات بر مقاومت آن‌ها در مقابل نفوذ، همه ذرات مکعبی شکل، تولید شده‌اند. از سوی دیگر به منظور ارزیابی اثر اندازه خرده ذرات، ذرات در اندازه‌های ۲، ۳ و ۴ میلی‌متر اصلاح^۱ شدند. قطر نفوذکننده در آزمایش نفوذ نیز بر مقاومت اندازه‌گیری شده در این آزمایش تأثیر دارد از این رو، به منظور ارزیابی قطر نفوذ کننده، از نفوذکننده‌های با قطرهای ۰/۶، ۰/۸ و ۱ میلی‌متری استفاده شده است. نیروی انتقال بحرانی (CTF) برای ذرات با اندازه‌های مختلف، بزاء نفوذ کننده‌های با قطر مختلف در آزمایش نفوذ تعیین و این نتایج به دست آمده است:

- با افزایش قطر نفوذکننده و ابعاد خرده ذرات آزمایش شده، CTF خرده ذرات افزایش یافته است. تکرارپذیری نتایج به دست آمده با افزایش ابعاد خرده ذرات و کاهش قطر نفوذکننده، افزایش یافته است.
- الگوی رفتاری خرده ذرات در آزمایش نفوذ به شکل الاستیک، الاستوپلاستیک و پلاستیک است که تابع مقاومت خرده ذرات است. با کاهش مقاومت خرده ذرات، الگوی رفتاری از الاستیک به پلاستیک تغییر می‌کند و مستقل از هر گونه الگوی رفتاری، تعیین مقدار CTF از روی منحنی نیرو- جابه‌جایی امکان‌پذیر است.
- رگرسیون خطی با $R^2 \geq 0.78$ بین CTF-UCS، برقرار است. هم‌بستگی با افزایش ابعاد خرده ذرات و کاهش قطر نفوذکننده افزایش می‌یابد. با افزایش ابعاد خرده ذرات و قطر نفوذکننده‌ها شیب خطوط برازش داده شده کاهش می‌یابد. بنا بر این ابعاد خرده ذرات و قطر نفوذکننده به‌عنوان عوامل مؤثر در برقراری رابطه میان پارامترهای مقاومتی در نظر گرفته شده است.

1. Modified

با استفاده از تحلیل آماری رگرسیون چند متغیره رابطه‌ای تجربی بین اندازه خرده ذرات، قطر نفوذ کننده، CTF با UCS با $R = 0.85$ نتیجه‌گیری شده است.

- کاهش قطر نفوذکننده باعث شکستن نفوذکننده در هنگام بارگذاری می‌شود. بنا بر این پیشنهاد می‌شود، در آزمایش نفوذ حداقل اندازه خرده ذرات ۳ میلی‌متر و قطر نفوذکننده ۱ میلی‌متر باشد.
- به‌منظور ارزیابی صحت روابط به‌دست آمده، ۱۳۵ آزمایش بارگذاری بر خرده ذرات مربوط به نمونه‌های S-9 از سازند آسماری، S-10 از سازند تله‌زنگ و S-11 از سازند سروک انجام گردیده و مقاومت فشاری تک‌محوری آن‌ها با استفاده از روابط تجربی پیشنهاد شده در تحقیق حاضر تخمین زده شده و با مقایسه آن‌ها با UCS اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه مشخص شد که با استفاده از روابط تجربی پیشنهاد شده در تحقیق حاضر، امکان تخمین UCS با خطای کم‌تر از ۱۲ درصد وجود دارد.
- امکان تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ آهک میکرایتی با استفاده از آزمایش نفوذ بر روی خرده ذرات ریز وجود داشته، نمونه‌های به‌کار رفته در این تحقیق فاقد هرگونه ناپیوستگی بافتی از قبیل تخلخل زیاد، کارستی شدگی، وجود سیمان و سنگ دانه‌های متنوع هستند. به‌کارگیری روش مذکور در مورد سنگ‌های غیرهمگن از قبیل آهک‌های متخلخل، کنگلومرا و سنگ‌های آذرین درشت دانه نیاز به بررسی بیش‌تر دارد.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از صندوق حمایت از پژوهش‌گران و فناوران کشور (معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری) که در تأمین بخشی از منابع مالی لازم برای انجام این تحقیق همکاری کردند تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

1. Bieniawski Z.T., "Estimating the strength of rock materials", Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 74 (1974). 312-320.
2. Cargill J.S., Shakoor A., "Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength of rock", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Vol.27 (1990) 495-503.
3. Zhang L., "Engineering properties of rocks", Elsevier Geo-Engineering Book Series Vol.4 (2005).
4. Lacharite N., "A study to correlate the shearing, bending and compression properties of rock", Fuels and Min Pract Div, Mines Branch, Can Dept Mines and Tech Surv, Ottawa, IR 60/38FMIN (1960).
5. Mazanti B.B., Sowers G.F., "Laboratory testing of rock strength. In: Proceedings of the International Symposium on Testing Techniques for Rock Mechanics", Seattle, Washington (1965) 207-27.
6. Vutukuri V.S., Lama R.D., Saluja S.S., "Handbook on Mechanical Properties of Rocks", Trans Tech Publications Clausthal, Germany Vol. 1 (1974).
7. Schrier vander J.S., "The block punch index test", Bull Int Assoc Eng. Geol.; Vol. 38 (1988) 121-126.
8. Sulukcu S., Ulusay R., "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 & Mining Sciences Vol. 38 (2001.) 1091-1111.

۹. جعفری ا.، نیکودل م.، احمدی م.، ارزیابی ویژگی‌های مقاومتی سنگ‌ها با استفاده از نتایج آزمایش پانچ بلوکی و پانچ استوانه‌ای، مجله علوم دانشگاه تهران جلد سی و ششم، شماره ۱ (۱۳۸۹).

10. Yilmaz I., "A new testing method for indirect determination of the unconfined compressive strength of rocks", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences Vol. 46 (2009) 1349-1357.

11. Kayabali K., Selcuk L., "Nailpenetration test for determining the uniaxial compressive strength of rock", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences Vol. 47 (2010) 265-271.

12. Santarelli F.J., Marshala A.F., Brignoli M., Rossi E., & Bona N., "Formation Evaluation from logging on cuttings", SPE Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference, Midland, Texas, March 27-29. SPE 36851 (1996).

۱۳. چشمی ا.، احمدی ششده، ا.، تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ آهک میکرایتی با استفاده از آزمایش بارگذاری بر خرده ذرات حفاری، نشریه علمی پژوهشی زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه خوارزمی، جلد ششم، شماره ۱ (۱۳۹۱) ۱۳۵۱-۱۳۷۲.

14. Mehrabi Mazidi S., Haftani M., Bohloli B., Cheshomi A., "Measurement of uniaxial compressive strength of rocks using reconstructed cores from rock cuttings", Journal of Petroleum Science and Engineering (2012).

15. Nes O.M., Horsrud P., Sonstebo E.F., Holt R.M., "Rock physics from small sampels-sometimes your only solution", SCA-58 (2001).

16. Zorlu K., Gokceoglu C., Ocakoglu F., Nefeslioglu H.A., Acikalin S., "Prediction of uniaxial compressive strength of sandstones using

petrography-based models", *Engineering Geology* Vol. 96 (2008) 141-158.

17. Alber M., Kahraman S., "Prediction the Uniaxial Compressive Strength and Elastic Modulus of a fault Breccia from Texture coefficient", *Rock Mechanics and Rock Engineering* Vol. 42 (2009) 117-127.
18. Ringstad C., Lofthus E.B., Sonstebo E.F., Fjær E., Zausa F., and Giin-Fa Fuh., "Prediction of rock parameters from micro-indentation measurements: The effect of sample size", *EUROCK'98*, Trondheim, Norway, July 8-10. SPE 47313 (1998).
19. Zausa F., Civolani L., Brignoli M., Santarelli F.J., "Real timewellbore stability analysis at the rigsite", *SPE/IADC Drilling Conference*, Amsterdam, The Netherlands, March 4-6. SPE 37670 (1997).
20. Uboldi V., Civolani L., Zausa F., "Rock strength measurements on cutting as input data for optimizing drill bit selection", *SPE Annual Conference and Exhibition*, Houston, Texas, October 3-6. SPE 56441 (1999).
21. Mateus J., Saavedra N.F., Calderón Z.H., Mateus D., "Correlation development between indentation parameters and uniaxial compressive strength for Colombian sandstones", *CT&F-Ciencia Tecnología y Futuro*. Vlo. 3 (2007) 125-135.
22. García R.A., Saavedra N.F., Zuly C.C., Mateus D., "Development of experimental correlations between indentation parameters and unconfined

compressive strength (UCS) values in shale samples", CT&F-Ciencia Tecnológica y Futuro, Vol. 3 (2008) 61-81.

۲۳. آقاباتی علی، زمین‌شناسی ایران، انتشاران سازمان زمین‌شناسی، چاپ دوم (۱۳۸۵) ۳۹۵-۳۹۶.

۲۴. درویش‌زاده ع.، زمین‌شناسی ایران، چینه‌شناسی، تکتونیک، دگرگونی و ماگماتیسم، چاپ چهارم، انتشارات امیرکبیر (۱۳۸۹) ۳۲۶-۳۲۷.

25. ISRM Suggested Methods, In: Brown ET, editor. "Rock characterization testing and monitoring" Oxford: Pergamon Press (1981).

26. Bieniawski Z.T., "Engineering classification of jointed rock masses", Trans S Afr Inst Civ. Eng. Vol. 15 (1973) 335-344.

27. Coates D.F., "Classification of rock for rock mechanics", Int J.Rock Mech. Min. Sci. Vol.1 (1964) 421-429.

28. Deere D.U., Miller R.P., "Engineering classification and index properties of intact rock", Air Force Lab Tech Rep AFNLTR Vol. 65 (1966).

29. British Standard Institution, "Code of practice for site investigations" BS 5930 HMSO, London (1981).

30. Broch E.M., Franklin J.A., "The point load strength test", Int.J. Rock Mech. Min. Sci.Vol. 9 (1972) 669-697.

31. Obert L., Duvall W., "Rock Mechanics and The Design Of Structures In Rock", John Wiley & Sons (1967).

۳۲. احمدی ششده ابراهیم، طراحی و ساخت دستگاه بارگذاری بر خرده ذرات مجزا و بررسی پارامترهای مکانیکی سنگ با استفاده از آن. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران (۱۳۹۱).

33. Gill D., E., Corthe'sy R., Leite M., H., "Determining the minimal number of specimens for laboratory testing of rock properties", Engineering Geology Vol. 78 (2005) 29-5.