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

ابراهیم احمدی ششده، اکبر چشمی*؛
دانشگاه تهران، پردیس علوم، دانشکده زمین‌شناسی

تاریخ: دریافت ۹۱/۹/۱۹ پذیرش ۹۲/۱۰/۹

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 تهیهٔ نمونهٔ 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[1] 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 ۰/٦، ۰/۸ و ۱ میلی‌متر روی ۷۲۰ خرده ذره با اندازه‌های ۲، ۳ و ٤ 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، اندازهٔ 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 دهندهٔ روادای روابط تجربی پیشنهادی در تحقیق حاضر است.

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

* **نویسنده مسئول** 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 تهیهٔ 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: دستهٔ اول آزمایش‌هایی است که روی نمونه‌های بزرگ مقیاس[1] (به‌عنوان مثال بلوک‌های سنگی یا مغزه‌های حفاری) انجام می‌شوند. در مورد استفاده از نتایج آزمایش‌هایی نظیر عدد چکش اشمیت[2]، 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[3] [٤، ٥، ٦، ٧، ٨]، آزمایش پانچ استوانه‌ای[4] [۹]، آزمایش فشارندهٔ مغزه (CST)+[5] [۱۰] و آزمایش نفوذ میخ (NPT)[6] [۱۱] اشاره کرد.

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

---

1. Big-Scale Rock Samples
2. Schmitt ammer
3. Block unch test
4. Cylindrical unch 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 به‌اندازهٔ کافی نمایندهٔ سازند و منبعی قابل اطمینان از اطلاعات در مورد رفتار مکانیکی آن‌ها هستند، مقاومت ذرهٔ آزمایش شده می‌تواند تابعی از مقاومت فشاری تک‌محوری مغزهٔ 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 ششده، (۱۳۹۱) [۱۳]، آزمایش بارگذاری بر مغزه‌های بازسازی شده از خرده‌های حفاری[1] [۱٤]، آزمایش ثبت امواج پیوسته در خرده ذرات مجزا[2] [۱۵] و تعیین غیرمستقیم مقاومت فشاری تک‌محوری با استفاده از خصوصیات سنگ‌شناسی [۱٦]، [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 بر قرار کردند. در پژوهش*های* ماتئوس و همکاران

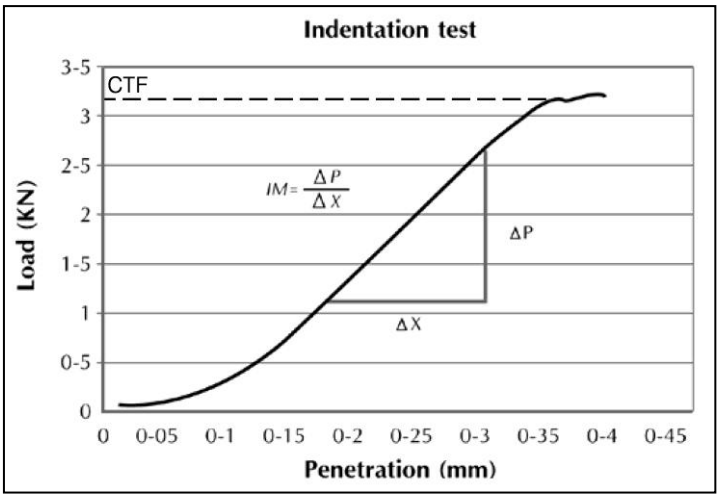
1. Reconstructed Cores 2. Continuous Wave Technique

به‌منظور تعیین غیرمستقیم مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ پارامترهای مقاومتی به‌دست آمده از نمودار نیرو-جابه‌جایی استفاده شده و نتایج به‌دست آمده در قالب روابط تجربی ۱ و ۲ ارائه شده است.

$$UCS = 17.38(IM) \quad , \quad R^2 = 0.81 \qquad (۱)$$

$$UCS = 91.97(CTF) \quad , \quad R^2 = 0.70 \qquad (۲)$$

CTF نیروی انتقال بحرانی[1] (نیروی ثبت شده تا زمان ورود نفوذکننده به نمونه بر حسب نیوتن) و IM مدول نفوذ[2] (شیب نمودار در بخش خطی برحسب نیوتن- میلی‌متر) است که مطابق شکل ۱ از نمودار نیرو جابه‌جایی مربوط به آزمایش نفوذ به‌دست می‌آید.



شکل ۱. نمودار شاخص مربوط به آزمایش نفوذ که در آن نحوهٔ تعیین پارامترهای مقاومتی (CTF و IM) خرده 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 پاجا-کلمبیا[3] توسعه دادند. در این تحقیق به‌منظور برقراری ارتباط بین پارامترهای مقاومتی خرده‌های حفاری و مقاومت فشاری تک‌محوری، ۲۰۰ آزمایش نفوذ روی خرده ذرات سنگی بی‌شکل شیلی با ابعاد تقریبی ۵ میلی‌متر انجام و روابط تجربی۳ و ٤ پیشنهاد شد.

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

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

$$UCS = -0.0083(CTF)^2 + 33.082(CTF) \quad , \quad R^2 = 0.8111 \quad (٤)$$

روش انجام کار

تهیه و آماده‌سازی نمونه‌های سنگی

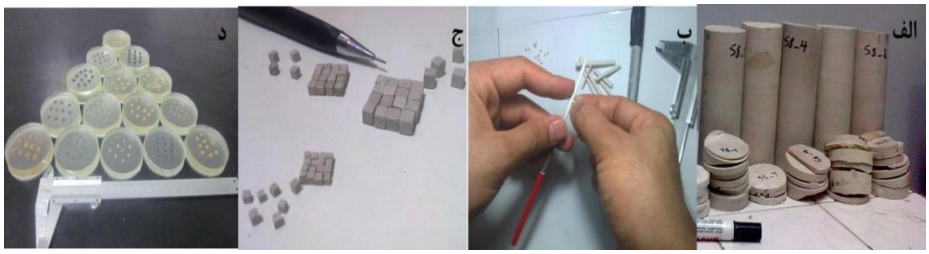
با توجه به اهمیت سازند آسماری در صنعت نفت ایران [۲۳]، [۲٤]، نمونه‌های به‌کار رفته در این تحقیق عمدتاً از سنگ‌های کربناته سازند آسماری انتخاب شده است. بدین‌منظور ۹ بلوک سنگی از رخنمون‌های سازند آسماری و ۲ بلوک سنگی از رخنمون سازندهای تله زنگ و سروک (با ابعاد تقریبی ٤۰×٤۰×۲۰ سانتی‌متر) تهیه و به آزمایشگاه 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[1] [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 رابطهٔ تجربی بین UCS و CTF، بررسی اثر اندازهٔ 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 ٤ میلی‌متری آماده‌سازی شده‌اند. بدین‌منظور ابتدا نمونه‌های مکعب مستطیلی به ابعاد ۲۰×۲×۲، ۳۰×۳×۳ و ٤۰×٤×٤ 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 ٤ 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 توسعهٔ روابط تجربی و نمونه‌های S-9 تا S-11 به‌منظور ارزیابی صحت نتایج تجربی ارائه شده به‌کار رفته‌اند.

مقاومت فشاری تک‌محوری (Mpa)	جرم واحد حجم (g/cm^3)	درصد تخلخل	نوع سنگ	سن زمین‌شناسی	سازند	شناسهٔ نمونه	محل نمونه برداری
۲۷۲/۸۰	۲/٦۰	۳ – ۲	دولومیکرایت	الیگوسن	آسماری	S-1	خرم‌آباد – گل پنبه
۲٦۲/۹۰	۲/۷۲	۱<				S-2	
۱۸۷/۳۵	۲/٦۳	٦ – ۵				S-4	
۲۲۵/۱۳	۲/٦۱	۵ – ٤	آهک میکرایتی	الیگوسن	آسماری	S-3	خرم‌آباد – مشگر
۲۲۸/۱۰	۲/٦٤	۳ – ۲				S-5	
۹۰/٦۰	۲/۵۳	۵ – ٤	آهک مارنی	الیگوسن	آسماری	S-6	سد
۳۵/٤۰	۲/۳۸	۱۲ – ۹	آهک	الیگوسن	آسماری	S-7	سد صیدون
۱۵۰/۷۰	۲/۵۰	۷ – ٦	آهک میکرایتی	الیگوسن	آسماری	S-8	کازرون – دوان
۱٦٦/۳۵	۲/٦۰	٤ – ۳				S-9	
۲٦۰/٤۵	۲/۷۵	۱<	آهک پلیوسن		تله زنگ	S-10	لرستان – چنار
۲۰۰	۲/۷۰	۱ >	آهک	کرتاسه	سروک	S-11	سد



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)
۱٤٥۰	۱/۱۱	۸۷/٥۰	٥٤۸۰	۲۷۸۹۰۰	۷٦۱۰	۳٦٤٥٤۰	۹٦۰	۹۳۷۱۰	۹۷٤۰

آزمایش‌های بارگذاری

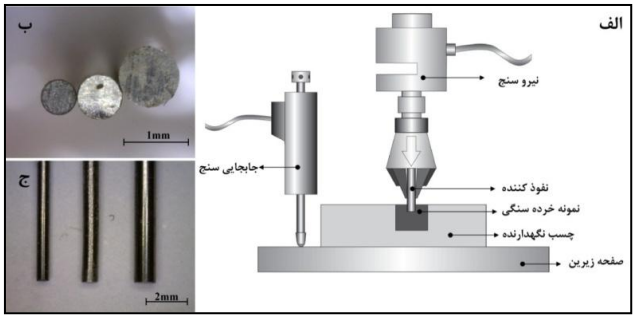
آزمایش فشاری تک‌محوری

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 به‌ترتیب 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 [۲٦] و بنیاوسکی [۲۷] از کم مقاوم تا بسیار مقاوم، کواتس [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 و بیش‌ترین مقادیر USC در تحقیق حاضر معادل ۲۳۵ MPa است که با توجه به توصیهٔ وزارت معدن کانادا در بارهٔ طیف مقاومتی نمونه‌های آزمایش شده به‌منظور هم‌بستگی پارامترهای مقاومتی با UCS، مقداری مناسب است [۳۱].

آزمایش نفوذ

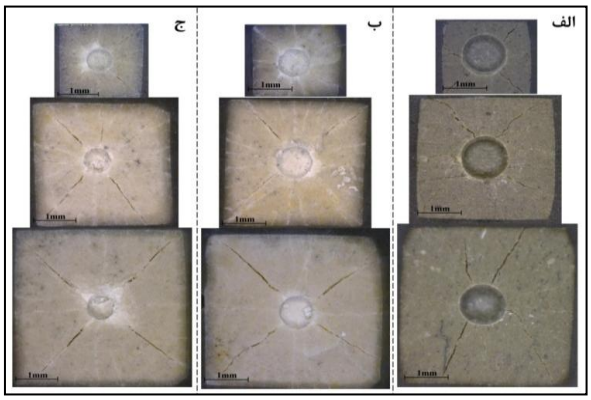
در شکل ۳ الف نحوهٔ اعمال بار و سیستم ثبت تغییرات در آزمایش نفوذ نشان داده شده است. به‌منظور بررسی قطر نفوذکننده در آزمایش نفوذ، نفوذکننده‌هایی با قطر ۰/٦، ۰/۸ و ۱ میلی‌متر از جنس تنگستن کارباید استفاده شده است. در شکل ۳ ب و ج، مقطع عرضی و طولی نفوذکننده‌های به‌کار رفته در تحقیق حاضر نشان داده شده است. با هدف بررسی اثر

ابعاد خرده ذرات نمونه‌های آزمایشگاهی مکعبی با ابعاد ۲، ۳ و ٤ میلی‌متری به‌ترتیب تا ۳۰۰، ۵۰۰ و ۸۰۰ میکرون و با نرخ کرنش ۱ میلی‌متر در ساعت (معادل ۱۸، ۳۰ و ٤۸ دقیقه بارگذاری) آزمایش شده‌اند.



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

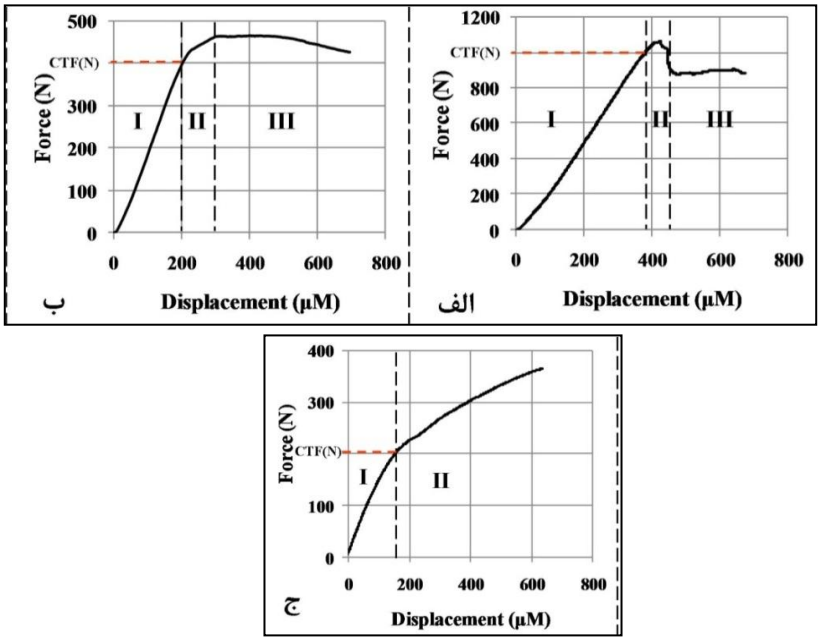
با توجه به پیشنهاد احمدی و همکاران تعداد نمونه‌های آزمایش شده در ابعاد مختلف با استفاده از نفوذکننده‌های مختلف، ۱۰ عدد در نظر گرفته شده است [۳۲]. بنا بر این ۷۲۰ آزمایش بر خرده ذرات مربوط به نمونه‌های S-1 تا S-8 به‌منظور هم‌بستگی پارامتر مقاومتی خرده ذرات (CTF) و مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) انجام شده است. شکل ٤، خرده ذرات آزمایش شده در ابعاد مختلف را پس از آزمایش نفوذ با استفاده از نفوذکننده‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل ٤. ذرات خرده سنگی پس از آزمایش نفوذ. که با استفاده از نفوذکننده‌های الف) ۱ میلی‌متری، ب) ۰/۸ میلی‌متری و ج) ۰/٦ میلی‌متری، تحت نفوذ قرار گرفته‌اند

نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی

شکل ۵ حالت‌های مختلفی از نمودار نیرو– جابه‌جایی مربوط به آزمایش نفوذ در خرده ذرات آهکی مختلف را نشان می‌دهد. نمودارهای مذکور مربوط به سه خرده ذره آهکی ۳ میلی‌متری، با مقاومت‌های مختلف است که از آزمایش نفوذ با نفوذکنندهٔ ۱ میلی‌متری به‌دست می‌آیند.



شکل ۵. نمودارهای نیرو– جابه‌جایی مربوط به آزمایش نفوذ با استفاده از نفوذکننده‌های ۱ میلی‌متری در خرده ذرات سنگی ۳ میلی‌متری با الف) الگوی شکست الاستیک در مورد نمونه‌های با مقادیر UCS بالاتر از ۱۹۰ مگاپاسکال (نمونه‌های S-1 تا S-5 و S-10 و S-11)، ب) الاستوپلاستیک، در مورد نمونه‌های با مقادیر UCS در محدودهٔ 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 ناحیهٔ متمایز در نمودارها قابل تشخیص است. ناحیهٔ I، که به‌صورت خطی صاف در نمودار مشخص شده و منطقهٔ تناسب[1] نامیده می‌شود [۲۲]. در این ناحیه رفتار

1. Proportionality zone

نمونه تحت اعمال بار از نوع الاستیک است. ناحیهٔ II، به‌عنوان ناحیهٔگذار معرفی می‌شود که در آن رفتار نمونه از الاستیک به پلاستیک (یا حالت غیرقابل بازگشت) تغییر یافته است. در این ناحیه افت قابل توجه در بار اعمالی، مشاهده نمی‌شود. نیروی انتقال بحرانی[1]، (CTF) در این ناحیه از نمودار اندازه‌گیری شده است و عبارت است از نیرویی که به‌ازاء آن نمودار نیرو– جابه‌جایی از حالت خطی خارج شده است. این پارامتر بر حسب نیوتن اندازه‌گیری می‌شود و نشان دهندهٔ آغاز ورود فک نفوذکننده به نمونهٔ آزمایشی است. در شکل ۵ نیروی انتقال بحرانی حداکثر نیروی ثبت شده در انتهایی‌ترین بخش ناحیهٔ I و ابتدایی‌ترین بخش ناحیهٔ II است. ناحیهٔ III، به‌عنوان ناحیهٔ شکست شناخته می‌شود. در این ناحیه رفتار خرده ذرات غیرقابل بازگشت است و با توجه به شکستگی‌های رخ داده در نمونه، با ادامهٔ روند بارگذاری، میزان نیروی اعمالی به نمونهٔ پیوسته کاهش می‌یابد. سیر نزولی ناگهانی که در ناحیهٔ III شکل ۵ الف مشاهده می‌شود، به رفتار خرده ذرات مقاوم در لحظهٔ 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 الگوی رفتاری (الگوی رفتاری الاستیک) در لحظهٔ گسیختگی هستند.

در نمودار نیرو– جابه‌جایی 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 ۱٦۰ 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– جابه‌جایی فاقد ناحیهٔ 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– جابه‌جایی مشاهده نمی‌شود. خرده ذرات مربوط به نمونه‌های S-6 و S-7 دارای این الگوی رفتاری (الگوی رفتاری پلاستیک) هستند.

در همهٔ نمودارهای نیرو– جابه‌جایی، نمودار پس از شکست خرده ذره به‌دلیل فشار جانبی چسب نگه‌دارنده به‌صورت ناگهانی افت نکرده، بلکه شیب خط نمودار نیرو–جابه‌جایی به‌سمت

1. Critical Transition Force (CTF)

صفر میل می‌کند. در این حالت نمونه به‌طور کلی گسیخته شده و میزان نیروی باقی‌مانده، به فشار جانبی چسب نگه‌دارنده مربوط است. مقادیر میانگین CTF به‌دست آمده از آزمایش نفوذ بر ۷۲۰ نمونه خرده سنگی با ابعاد مختلف و بازاء 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[1] (P) استفاده می‌شود که مقدار آن همواره از ۱ بیش‌تر است و از رابطهٔ (۵) محاسبه می‌شود:

$$P = \frac{\bar{X} + t_\beta \frac{s}{\sqrt{N-1}}}{\bar{X} - t_\beta \frac{s}{\sqrt{N-1}}} \qquad P \geq 1 \tag{۵}$$

$\bar{X}$ میانگین حسابی داده‌های مورد نظر است. شاخص دقت بازاء $N = \infty$ 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 رابطهٔ ٦ محاسبه می‌شود:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} \left(X_i - \bar{X}\right)^2}{N-1}} \tag{٦}$$

در رابطهٔ ٦، $X\,i$، مقادیر اندازه‌گیری شده از N تعداد نمونهٔ مورد نظر است. گیل و همکاران مقدار $P \leq ۱/۲$ با شاخص اطمینان بیش‌تر از ۹۵٪ را به‌عنوان شاخص دقت پذیرفته شده در فعالیت‌های پژوهشی دقیق معرفی کرده‌اند.

در جدول ٤، شاخص دقت، تعداد نمونه‌های مورد نیاز (N) برای انجام آزمایش علمی معتبر، میانگین انحراف معیار[2]، ضریب تغییرات[3] (CV) مربوط به CTF به‌دست آمده از آزمایش نفوذ بر خرده ذرات سنگی مکعبی شکل در سه اندازهٔ مختلف (۲، ۳ و ٤ میلی‌متر) و با استفادهٔ سه نفوذکننده با قطرهای ۰/٦ 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 ٤ میلی‌متری، با استفاده از نفوذکننده‌های ۰/٦، 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
			۰/٦۰	۰/۸۰	۱	
			میانگین CTF (N)			
S-1	۲۷۲/۸۰	۲	۳٦۸/۰۳	٤۲۹/۹۸	٤۸۹/۹۷	الاستیک
		۳	۵۵۰/۵٦	۷۱۵/۹۵	۹٤۷/۷۷	
		٤	٦۷۸/۳۹	۸۸٤/۱۰	۱۱٤٦/٦۰	
S-2	۲٦۲/۹۰	۲	۳۷۸/٦۲	٦٤٦/۷۹	٤۲۹/۳۷	الاستیک
		۳	۵۳۲/۱۲	٦۹۲/۰٦	٦۹۹/۳۱	
		٤	۵۷۹/۱۵	۷٤٤/۵۸	۱۰۲۲/۳۰	
S-3	۱۸۷/۳۵	۲	۳۰٤/۵۰	٤۱۷/٤۰	٤۱٤/۷۹	الاستیک
		۳	٤۱۸/۰۱	۵۸۰/٦۱	٦۹۰/۷۲	
		٤	۵۰۷/۵٤	۵۷۹/٤۸	۸۸٦/٦۳	
S-4	۲۲۵/۱۳	۲	۳۳۱/۸۷	٤۰۵/۱۹	٤۹۲/۲۹	الاستیک
		۳	٤۰۱/۵۱	۵۷۸/۲۲	۸۰٤/۸٦	
		٤	۵۰۷/۹۸	۷۲۹/۵۰	۱۰٦۹/٤۰	
S-5	۲۲۸/۱۰	۲	۳۵٤/۸٤	۳۹۷/٤۷	٤۸۱/٤۸	الاستیک
		۳	٤۵۸/٤۱	٦۵۹/۷۹	۸٦٦/۷۱	
		٤	٦۲۲/۱۰	۸۰٤/۷٦	۱۲٦۲/۲۰	
S-6	۹۰/٦۰	۲	٦۸	۱۳۱/۰۲	۱۹۱/٦٤	پلاستیک
		۳	۸۷	۱٤۱/٤۹	۲۱۳/۳۱	
		٤	۱۱۰	۱٦۸/۱۸	۲۵٦/۸۸	
S-7	۳۵/٤۰	۲	۱۰۰	۱۵۵/۸۹	۲۳٤/۷۰	پلاستیک
		۳	۱۱۰	۱۲۵/۰۳	۱٦۰	
		٤	۹۲/۵۰	۱٦۲/۹۱	۱۵۵	
S-8	۱۵۰/۷۰	۲	۱۹۲/۳۰	۲۲٦	۲۹٤/۲۰	الاستوپلاستیک
		۳	۲۲٦	۳۲۵	٤۸۲/۲۰	
		٤	۲۵۵	۳۵۲/۵۰	۵۱۰	

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ٤ 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) به‌منظور ارزیابی مقاومت خرده ذرات سنگی کافی بوده است.

جدول ٤. پارامترهای آماری مربوط به مقادیر CTF به‌دست آمده از آزمایش نفوذ

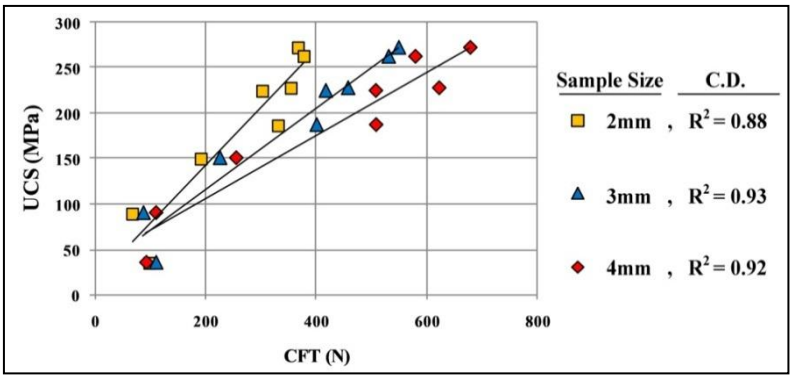
N	شاخص دقت	ضریب تغییرات (%)	انحراف معیار	اندازه خرده ذرات (mm)	قطر نفوذ کننده (mm)
٥	١/١٣	٧/٨٥	٢٧/٢٩	٢	٠/٦٠
٧	١/١٦	٩/٥٣	٤٥/٥١	٣	
٤	١/١٠	٦/١٧	٣٥/٦٦	٤	
٦	١/١٤	٨/٣٤	٣٢/٦١	٢	٠/٨٠
٥	١/١٢	٧/٧١	٣٩/٩٣	٣	
٤	١/١١	٧/١٨	٤٤/٣٨	٤	
٦	١/١٤	٨/٧٤	٣٦/٣٧	٢	١
٦	١/١٤	٨/٦٣	٥٨/٤٩	٣	
٥	١/١٣	٨/٠٨	٧٣/٥٨	٤	

هم‌بستگی بین CTF و UCS

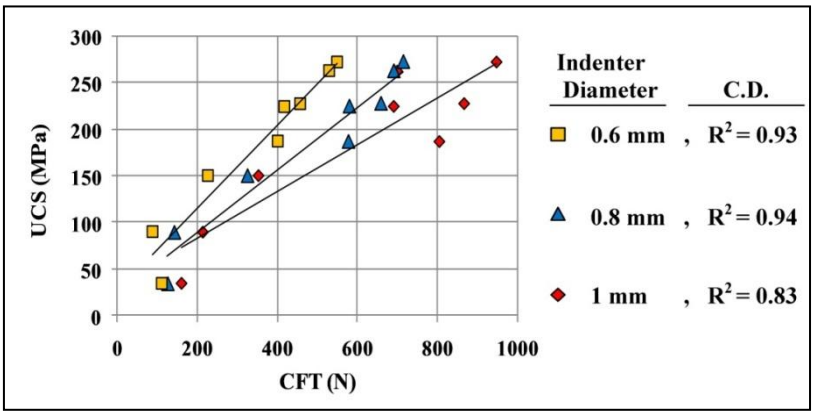
شکل ٦ هم‌بستگی بین مقادیر UCS و CTF خرده ذرات در اندازه‌های ۲، ۳ و ٤ میلی‌متر که با نفوذکنندهٔ ۰/٦ میلی‌متری آزمایش شده‌اند را نشان می‌دهد. با افزایش اندازهٔ خرده ذرات، شیب خطوط برازش داده شده کاهش یافته است. با این حال مقادیر بالای ضرایب تعیین[1] (C.D.) مربوط به هم‌بستگی‌های برقرار شده، نشان‌دهندهٔ ارتباط خوب بین مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ و پارامترهای مقاومتی خرده ذرات (نیروی انتقال بحرانی) مربوط به سنگ مورد نظر است. با توجه به شکل ٦، بیش‌ترین هم‌بستگی مربوط به ذرات ۳ و ٤ میلی‌متری و کم‌ترین هم‌بستگی مربوط به ذرات ۲ میلی‌متری است.

شکل ۷، هم‌بستگی CTF-UCS خرده ذرات ۳ میلی‌متری که با نفوذکننده دارای قطرهای ۰/٦، ۰/۸ و ۱ میلی‌متری آزمایش شده‌اند را نشان می‌دهد. چنان‌که مشاهد می‌شود، با افزایش قطر نفوذکننده شیب خطوط برازش داده کاهش یافته است و بیش‌ترین هم‌بستگی مربوط به نفوذکننده‌های ۰/٦ و ۰/۸ میلی‌متری و کم‌ترین هم‌بستگی مربوط به نفوذکنندهٔ ۱ میلی‌متری است.

1. Confection of Determination



شکل٦. هم‌بستگی CTF-UCS مربوط به خرده‌های سنگی ۲، ۳ و ٤ میلی‌متری که با نفوذکنندهٔ ۰/٦ میلی‌متری آزمایش شده‌اند



شکل ۷. هم‌بستگی CTF-UCS مربوط به خرده‌های سنگی ۳ میلی‌متری که با نفوذکننده‌های ۰/٦، ۰/۸ و ۱ میلی‌متری آزمایش شده‌اند.

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

شکل‌های ٦ و ۷ به‌روشنی نشان می‌دهند که اندازهٔ خرده ذرات و قطر نفوذکننده در هم‌بستگی‌های برقرار شده تاثیرگذار است. با توجه به این‌که در تحقیق حاضر خرده ذرات در سه اندازهٔ مختلف با سه نفوذکننده با قطرهای مختلف آزمایش شده‌اند از این رو، ۹ رابطهٔ 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 اندازهٔ 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 نفوذکنندهٔ ۱ میلی‌متری آزمایش شده‌اند، مربوط است (R^2 = ۰/۷۸). در این مقاله روابط تجربی ارائه شده در جدول ۵ به‌عنوان روابط تجربی اولیه[1] معرفی شده‌اند.

جدول۵. روابط تجربی بین UCS و CTF مربوط به خرده ذرات آزمایش شده در ابعاد مختلف با استفاده از نفوذکننده‌های مختلف

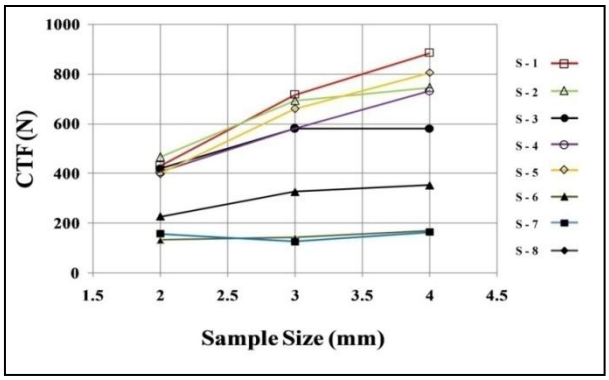
شناسه رابطه	ضریب تعیین (R^2)	رابطه تجربی	اندازه نمونه (mm)	قطر نفوذ کننده (mm)
۷	۰/۸۸	UCS = 0.65 (CTF) + 9.48	۲	۰/۶۰
۸	۰/۹۳	UCS = 0.46 (CTF) + 17.59	۳	
۹	۰/۹۲	UCS = 0.36 (CTF) + 25.80	٤	
۱۰	۰/۸۷	UCS = 0.61 (CTF) - 25.88	۲	۰/۸۰
۱۱	۰/۹٤	UCS = 0.34 (CTF) + 14.1	۳	
۱۲	۰/۸٦	UCS = 0.28 (CTF) + 21.71	٤	
۱۳	۰/۷۸	UCS = 0.63 (CTF) - 58.75	۲	۱
۱٤	۰/۸۵	UCS = 0.26 (CTF) + 20.01	۳	
۱۵	۰/۸٤	UCS = 0.19 (CTF) + 30.16	٤	

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

روابط تجربی ارائه شده در جدول ۵ در مورد خرده ذرات با اندازهٔ مشخص (۲، ۳ و ٤ میلی‌متری) که با نفوذکننده‌های با قطر مشخص (۰/٦۰، ۰/۸۰و ۱ میلی‌متر) آزمایش شده‌اند، کاربرد دارند. به‌منظور ارائه رابطهٔ 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.

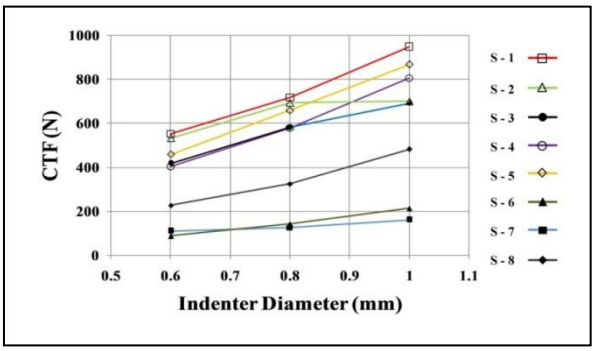
1. Primary

اولین متغیر مستقل تأثیرگذار در هم‌بستگی CTF -UCS اندازهٔ خرده ذرات است. در شکل ۸ میانگین CTF به‌ازای اندازهٔ خرده 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 اندازهٔ خرده ذرات، CTF مربوط به نمونه‌های آزمایش شده، افزایش یافته است.



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

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



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

میانگین CTF به خصوصیات مواد[1] تشکیل‌دهندهٔ خرده ذرات وابسته است و به‌عنوان سومین متغیر مستقل در نظر گرفته شده است. در نهایت مقدار UCS نمونه‌های سنگی به‌عنوان متغیر وابسته که از متغیرهای مستقل یاد شده تأثیرپذیر است، در نظر گرفته شده است. رابطهٔ (۱٦) با ضریب هم‌بستگی ۰/۸۵= (R^2) به‌عنوان رابطهٔ تجربی حاصل از رگرسیون چند متغیری انجام گرفته در نرم‌افزار SPSS است که در این تحقیق با عنوان رابطهٔ تجربی کلی[3] معرفی شده است:

$$R^2=0.85, \quad USC = 0.29(CTF) - 41.28(D) - 186.47(I) + 317.63 \quad (۱٦)$$

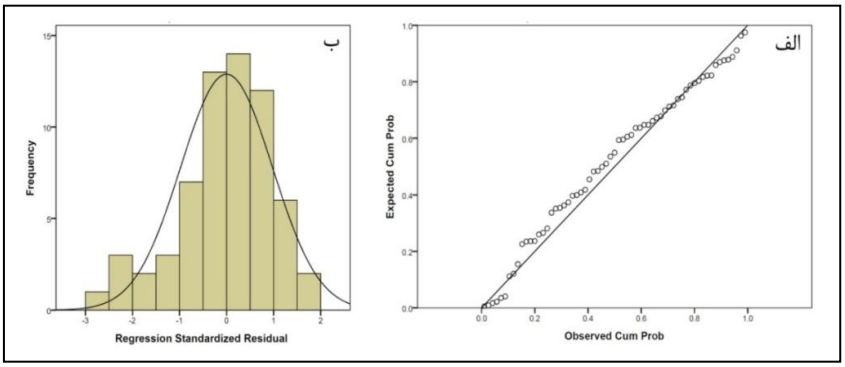
در رابطهٔ مذکور D، اندازهٔ خرده ذرات آزمایش شده و I قطر نفوذکننده به‌کار رفته در آزمایش نفوذ است. با توجه به ضریب هم‌بستگی بالا انتظار می‌رود رابطهٔ فوق در تخمین مقادیر UCS، کاربردی باشد. در شکل ۱۰ الف مقایسهٔ بین مقادیر نرمال شده متغیر وابسته ارائه شده به نرم‌افزارSPSS و تخمین زده با استفاده از رگرسیون 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 به‌هم نزدیک هستند.

۲. ارزیابی صحت روابط تجربی ارائه شده

به‌منظور ارزیابی صحت روابط به‌دست آمده از رگرسیون خطی (روابط ۷ تا ۱۵) به‌عنوان روابط تجربی اولیه و رابطهٔ (۱٦) که با استفاده از گرسیون چند متغیره به‌دست آمده به‌عنوان رابطهٔ 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 ٤ میلی‌متر آماده شدند. با توجه به نتایج به‌دست آمده در جدول ٤، 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 ۰/٦، 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 اندازهٔ خرده ذرات (D)، قطر نفوذکننده (I) و مقدار CTF با استفاده از رابطهٔ تجربی کلی (رابطهٔ ١٦)، UCS هر نمونه تخمین زده شده که مقادیر مربوط به آن در جدول ٦ 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.

مقایسهٔ مقادیر UCS تخمین زده شده و اندازه‌گیری شده در شکل ۱۱ ارائه شده است. به‌منظور دقت کمی تخمین مقادیر UCS از میزان خطای تخمین[1] استفاده شده است. درصد خطای مقادیر UCS تخمین زده نیز با استفاده از رابطهٔ ۱۷ محاسبه و در جدول ٦ 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 به‌هم نزدیک باشند به‌سمت 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.

$$\text{E.e.} = \left(\frac{E_{UCS}}{M_{UCS}} - 1 \right) \times 100 \qquad (۱۷)$$

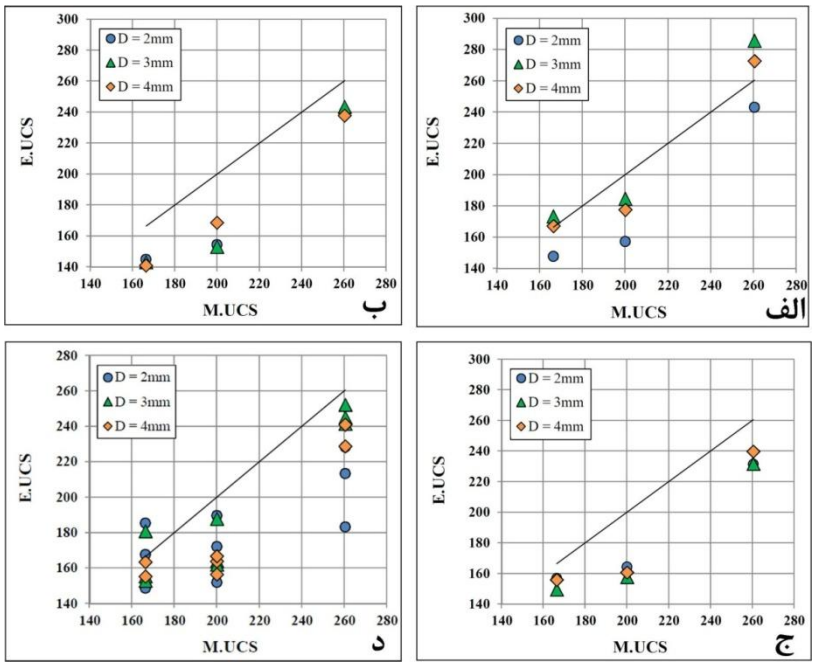
در رابطهٔ مذکور E.e.، E_{UCS} و M_{UCS} به‌ترتیب درصد خطای تخمین، UCS تخمین زده شده و UCS محاسبه شده هستند.

1. Error of Estimation

جدول ٦. مقادیر میانگین UCS اندازه‌گیری شده و تخمین زده با استفاده از روابطه تجربی اولیه (روابط ارائه شده در جدول ٥) و رابطه تجربی کلی (رابطهٔ ١٦) به همراه مقادیر درصد خطای تخمین مربوط

شناسهٔ نمونه	UCS اندازه گیری	قطر نفوذکننده (mm)	اندازهٔ نمونه (mm)	CTF (N)	UCS تخمین زده با استفاده از	مقادیرخطای تخمین روابط	UCS تخمین زده با	مقادیرخطای تخمین رابطه کلی
			٢	٢١٢/٥٠	١٤٧/٦٠	−١١/٢٦	١٨٥/٢٢	١١/٣٤
		٠/٦	٣	٣٣٨/٧١	١٧٣/٣٩	٤/٢٣	١٨٠/٧٩	٨/٦٨
			٤	٣٩٢/٤٧	١٦٧/٠٨	٠/٤٤	١٥٥/٢٠	−٦/٧٠
			٢	٢٧٩/٨٨	١٤٤/٨٤	−١٢/٩٢	١٦٧/٦٠	٠/٧٥
S-9	١٦٦/٣٥	٠/٨	٣	٣٧٩/٠٦	١٤٢/٩٨	−١٤/٠٤	١٥٥/٢٨	−٦/٦٥
			٤	٤٢٥/٦٣	١٤٠/٨٨	−١٥/٣٠	١٣٥/٤٧	−١٨/٥٦
			٢	٣٤٢/١٣	١٥٦/٧٩	−٥/٧٤	١٤٨/٤٩	−١٠/٧٣
		١	٣	٤٩٨/١٢	١٤٩/٥٢	−١٠/١١	١٥٢/٧٥	−٨/١٧
			٤	٦٦١/٣٣	١٥٥/٨١	−٦/٣٣	١٦٣/٢٨	−١/٨٤
			٢	٣٥٩/٥٤	٢٤٣/١٨	−٦/٦٣	٢٢٨/١٦	−١٢/٣٩
		٠/٦	٣	٥٨٢/٧٧	٢٨٥/٦٦	٩/٦٨	٢٥٢/٠٥	−٣/٢٢
			٤	٦٨٥/٩٢	٢٧٢/٧٣	٤/٧١	٢٤٠/٨٩	−٧/٥١
			٢	٤٣٥/٩٣	٢٤٠/٠٣	−٧/٨٣	٢١٣/١٧	−١٨/١٥
S-11	٢٦٠/٤٥	٠/٨	٣	٦٧٤/٤٤	٢٤٣/٤٠	−٦/٥٤	٢٤١/٥٣	−٧/٢٦
			٤	٧٧١/٥٩	٢٣٧/٧٥	−٨/٧١	٢٢٨/٦١	−١٢/٢٢
			٢	٤٦٠/٤٥	٢٣١/٣٣	−١١/١٧	١٨٣/٠٤	−٢٩/٧٢
		١	٣	٨١٣/٦٥	٢٣١/٥٥	−١١/٠٩	٢٤٤/٨٨	−٥/٩٧
			٤	١١٠٣/٠٥	٢٣٩/٧٤	−٧/٩٥	٢٨٨/١٠	−١٠/٦١
			٢	٢٢٧/٠٥	١٥٧/٠٦	−٢١/٤٦	١٨٩/٤٧	−٥/٢٦
		٠/٦	٣	٣٦٢/٨٧	١٨٤/٥١	−٧/٧٤	١٨٧/٨٥	−٦/٠٧
			٤	٤٢١/٥٢	١٧٧/٥٤	−١١/٢٢	١٦٣/٦٨	−١٨/١٦
			٢	٢٩٥/٣٣	١٥٤/٢٧	−٢٢/٨٦	١٧٢/١٢	−١٣/٩٤
S-12	٢٠٠	٠/٨	٣	٤٠٨/٣٠	١٥٢/٩٢	−٢٣/٥٣	١٦٣/٨١	−١٨/٠٩
			٤	٥٢٤/٢٠	١٦٨/٤٨	−١٥/٧٥	١٥٦/٣٧	−٢١/٨١
			٢	٣٥٣/٨٥	١٦٤/١٧	−١٧/٩١	١٥١/٩١	−٢٤/٠٤
		١	٣	٥٢٩/٣٥	١٥٧/٦٤	−٢١/١٧	١٦١/٨٧	−١٩/٠٦
			٤	٦٨٧/٠٤	١٦٠/٦٩	−١٩/٦٥	١٦٦/٦٣	−١٦/٦٨

با توجه به جدول ٦، روابط تجربی اولیه با خطای کم‌تری (به‌طور میانگین ۱۱/۷۱ درصد) نسبت به‌رابطهٔ کلی (به‌طور میانگین ۱۲ درصد) مقادیر UCS خرده ذرات سنگی آزمایش شده را تخمین زده‌اند. در مجموع می‌توان اذعان داشت، مقادیر به‌دست آمده از رابطهٔ 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. مقایسهٔ مقادیر UCS تخمین زده (M.UCS) و اندازه‌گیری شده (E.UCS) با استفاده از روابط تجربی ابتدایی (P) و کلی (G)، الف) نفوذ ۰/٦ میلی‌متری (رابطهٔ ۷ الی ۹)، ب) نفوذکنندهٔ ۰/۸ میلی‌متری (رابطهٔ ۱۰ الی ۱۲)، ج) نفوذکنندهٔ ۱ میلی‌متری (رابطهٔ ۱۳ الی ۱۵) د) رابطهٔ کلی (رابطه ۱٦)

نتیجه‌گیری

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 تک‌محوری روی ۸ نمونه در آزمایشگاه تعداد ۷۲۰ خرده ذره از نمونه‌های آزمایش شده، آماده‌سازی شده است. با توجه به تأثیر شکل و اندازهٔ خرده ذرات بر مقاومت آن‌ها در مقابل نفوذ، همهٔ ذرات مکعبی شکل، تولید شده‌اند. از سوی دیگر به‌منظور ارزیابی اثر اندازهٔ خرده ذرات، ذرات در اندازه‌های ۲، ۳ و ٤ میلی‌متر اصلاح[1] شدند. قطر نفوذکننده در آزمایش نفوذ نیز بر مقاومت اندازه‌گیری شده در این آزمایش تأثیر دارد از این رو، به‌منظور ارزیابی قطر نفوذ کننده، از نفوذکننده‌های با قطرهای ۰/٦، ۰/۸ و ۱ میلی‌متری استفاده شده است.

نیروی انتقال بحرانی (CTF) برای ذرات با اندازه‌های مختلف، بازاء نفوذ کننده‌های با قطر مختلف در آزمایش نفوذ تعیین و این نتایج به‌دست آمده است:

- با افزایش قطر نفوذکننده و ابعاد خرده ذرات آزمایش شده، CTF خرده ذرات افزایش یافته است. تکرارپذیری نتایج به‌دست آمده با افزایش ابعاد خرده ذرات و کاهش قطر نفوذکننده، افزایش یافته است.
- الگوی رفتاری خرده ذرات در آزمایش نفوذ به شکل الاستیک، الاستوپلاتیک 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 رابطهٔ 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 اندازهٔ 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, Ottowa, 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*، مجلهٔ علوم دانشگاه تهران جلد سی و ششم، شماره۱ (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*، نشریهٔ علمی پژوهشی زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه خوارزمی، جلد ششم، شماره ۱ (۱۳۹۱) ۱۳۵۱-۱۳۷۲.

14. Mehrabi Mazidi S., Haftani M., Bohloli B., CheshomiA., "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 Tecnologíay 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 Tecnologíay Futuro, Vol. 3 (2008) 61-81.

۲۳. آقانباتی علی، *زمین‌شناسی ایران*، انتشاران سازمان زمین‌شناسی، چاپ دوم (۱۳۸۵) ۳۹۵-۳۹٦.

۲٤. درویش‌زاده ع.، *زمین‌شناسی ایران، چینه‌شناسی، تکتونیک، دگرگونی و ماگماتیسم*، چاپ چهارم، انتشارات امیرکبیر (۱۳۸۹) ۳۲٦-۳۲۷.

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 نامهٔ 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.