

تخمین مقاومت فشاری تک محوری (UCS) ماسه‌سنگ‌ها با استفاده از آزمایش نفوذ

الهام موسوی*، اکبر چشمی

دانشگاه تهران، دانشکده زمین‌شناسی

Elham.mousavi@ut.ac.ir

چکیده

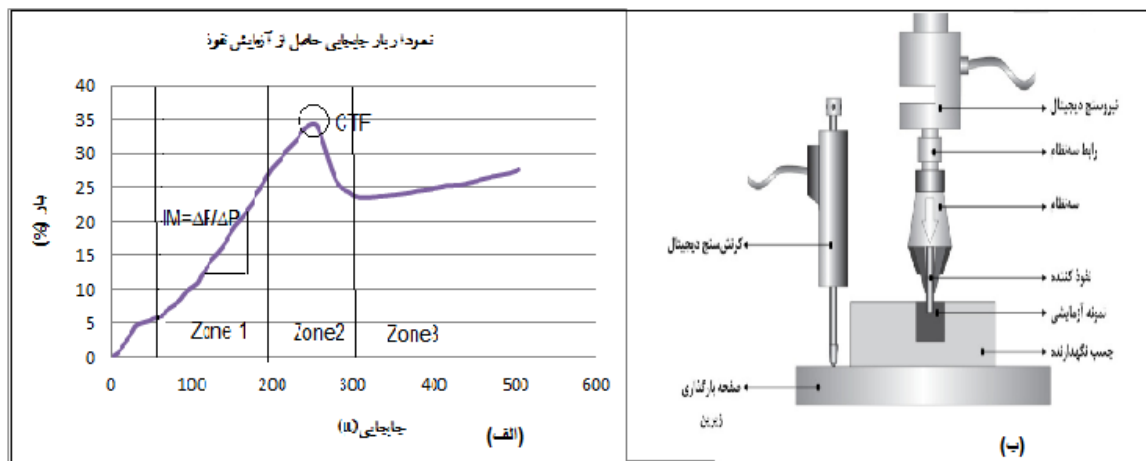
آگاهی از مقاومت تک‌محوری (UCS) سنگ‌های زمین‌های پیش‌رو در پیشبرد بهینه‌ی عملیات حفاری، پایدارسازی دیواره‌ی چاه‌های نفتی و تونل‌سازی تأثیر به‌سزایی دارد. ابداع روشی جدید به منظور تعیین غیرمستقیم مقاومت تک‌محوری سنگ‌ها در محل‌هایی که تهیه نمونه استاندارد با مشکل مواجه است همواره مورد توجه محققین بوده است. تاکنون روش‌های مختلفی برای تخمین غیرمستقیم مقاومت تک‌محوری پیشنهاد شده‌است، که آزمایش نفوذ (Indentation test) یکی از آنهاست. در این آزمایش، نفوذکننده با نرخ کرنش ثابت به درون نمونه نفوذ می‌کند، با ثبت بار اعمالی و کرنش مربوطه، منحنی نیرو-جابجایی ترسیم می‌شود. از منحنی مذکور می‌توان پارامترهای مدول نفوذ (IM) و نیروی انتقالی بحرانی (CTF) را به‌دست آورد، این پارامترها معیارهایی برای تخمین مقاومت تک‌محوری سنگ هستند. در تحقیق حاضر ۱۰ نمونه ماسه‌سنگی از سازندهای مختلف تهیه شده و پس از آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام آزمایش تک‌محوری به روی مغزه‌های استاندارد، خرده‌هایی در اندازه‌های ۳، ۵ و ۸ میلیمتر از آنها آماده شده و در دیسک‌های حاوی رزین تثبیت شده است. سپس تعداد ۳۰۰ آزمایش نفوذ به روی این خرده‌ها انجام گردیده و روابط تجربی بین UCS-CTF برای هر اندازه مشخص با ضریب همبستگی بالاتر از ۰.۷۷ پیشنهاد گردیده است. علاوه بر آن روشی به منظور حذف اثر اندازه ذره و قطر نفوذکننده پیشنهاد گردیده که بر اساس آن رگرسیون خطی با ضریب همبستگی ۰.۸۵ بین UCS-CTF، نتیجه‌گیری شده است. صحت سنجی روش پیشنهادی با مقایسه UCS اندازه‌گیری شده از آزمایش استاندارد و UCS تخمین زده شده از روابط تجربی پیشنهاد شده در این تحقیق نشان‌دهنده شباهت ۸۶ درصدی مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده می‌باشد.

کلمات کلیدی: مقاومت تک محوری، ماسه سنگ، آزمایش نفوذ، خرده سنگ، مدول نفوذ، نیروی انتقال بحرانی

۱_ مقدمه

محققین همواره به دنبال روشی بوده‌اند که بتوانند به کمک آن پارامترهای مکانیکی سنگ را در کمترین زمان با کمترین هزینه تعیین کنند. مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) یکی از پارامترهای مکانیکی سنگ است که در پروژه‌های عمرانی کاربرد وسیعی دارد. مقاومت تک‌محوری سنگ‌ها را می‌توان از روش‌های مستقیم و غیرمستقیم به‌دست آورد. روش استاندارد مستقیم تعیین مقاومت تک‌محوری (ASTM., 1984; ISRM., 1981)، روشی ساده، ولی زمان‌بر و نسبتاً پرهزینه است، علاوه بر این ضرورت تهیه نمونه استاندارد (NX) کاربرد این روش را محدود می‌کند. تهیه نمونه استاندارد از اعماق به هنگام حفاری با مشکلات زیادی همراه است. از سوی دیگر تعیین مقاومت تک‌محوری در چاه‌های نفت در حین حفاری برای حل مشکلاتی مثل: ناپایداری دیواره چاه (Moos et al., 2003)، ارزیابی پتانسیل ماسه‌ای شدن (Santarelli et al., 1980) و کمی‌سازی بزرگای تنش با استفاده از مشاهدات شکست مخزن (Zoback et al., 2003) ضروری می‌باشد. از طرفی تأثیر مقاومت فشاری به هنگام حفاری به منظور جلوگیری از ریزش دیواره بیشتر از پارامترهای آزمون، شیب، زمان پرتوگیری و وزن گل است (Jaramillo, 2004). در تونل‌سازی، به هنگام حفاری با دستگاه TBM جبهه‌ی تونل قابل بررسی نیست، و با پیشروی حفاری ممکن است دستگاه TBM از زمین‌های با مقاومت بالا وارد زمین‌های با مقاومت پایین یا گسلیده شود. برای پیش‌بینی شرایط زمین‌شناسی پیش‌روی TBM، جلوگیری از اختلال در عملکرد دستگاه و خطرات احتمالی که سازه‌های اطراف را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد، آگاهی از شرایط زمین‌شناسی پیش‌روی جبهه‌ی تونل ضروری است. بنابراین توسعه روش‌های تعیین مشخصات مکانیکی سنگ‌ها با استفاده از خرده‌های حاصل از حفاری

در پیشرفت زمانی و اقتصادی پروژه‌های عمرانی تأثیر بسزایی دارد. در سال ۱۹۹۶، AGIP (Trade mark of the Italian Groupe) در روشی ارائه کرد که قادر بود مشخصات مکانیکی سنگ را با استفاده از خرده‌های حاصل از حفاری ارزیابی کند. مطالعات سانتارلی و همکاران (Santarelli et al., 1996) نشان داد مقاومت ذره مورد آزمایش می‌تواند تابعی از مقاومت فشاری تک‌محوری مغزه حفاری از سازند مربوطه باشد. از روش‌های غیرمستقیم تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری می‌توان به آزمایش بارگذاری بر مغزه‌های بازسازی شده از خرده‌های حفاری (Mehrabi et al., 2012)، آزمایش ثبت امواج پیوسته در خرده ذرات مجزا (Nes et al., 1998) و تعیین غیرمستقیم مقاومت فشاری تک‌محوری با استفاده از خصوصیات سنگ شناسی (Shakoor and Bonelli., 1998) اشاره کرد. یکی دیگر از روش‌های غیرمستقیم تخمین مقاومت تک‌محوری که در تحقیق حاضر نیز مورد مطالعه قرار گرفته است، آزمایش نفوذ (Indentation test) می‌باشد. در این روش، مته‌ای با قطر یک میلی‌متر (Mateus et al., 2007) و سرعت ثابت، به داخل خرده‌های تثبیت شده در رزین، نفوذ می‌کند. با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش، منحنی بار-جابجایی ترسیم شده و مدول نفوذ (IM) و نیروی انتقالی بحرانی (CTF) از نمودار به دست می‌آید (Ringstad et al., 1998). شکل ۱-الف نمونه‌ای از منحنی بار-جابجایی و شکل ۱-ب دستگاه ساخته شده در دانشگاه تهران برای انجام آزمایش نفوذ (احمدی ششده و همکاران، ۱۳۸۹) را نشان می‌دهد.



شکل ۱-الف. نمودار بار-جابجایی، ب- قسمت‌های مختلف دستگاه آزمایش نفوذ (احمدی ششده و همکاران، ۱۳۹۱)

ماتئوس و همکاران (Mateus et al., 2007)، روابط ۱ و ۲ را برای تخمین مقاومت تک‌محوری با استفاده از پارامترهای

حاصل آزمایش نفوذ پیشنهاد کردند:

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

$$UCS = 91.07 \times (CTF) \quad , R^2 = 0.70 \quad (2)$$

در تحقیقی مشابه ریکاردو و همکاران (Ricardo et al., 2008) از آزمایش نفوذ برای تعیین مقاومت فشاری شیل‌ها استفاده

کردند. احمدی ششده و همکاران (۱۳۹۱) رابطه‌ای برای تخمین مقاومت تک‌محوری سنگ‌های آهکی با توجه به آزمایش نفوذ پیشنهاد کردند.

در این مقاله، امکان استفاده از آزمایش نفوذ برای تخمین مقاومت تک محوری ماسه‌سنگ‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. آزمایش نفوذ به دلیل سادگی، قابل حمل بودن ابزار و قابلیت انجام بر روی نمونه‌های کوچک حاصل از حفاری، امکان تخمین زود هنگام مقاومت سازند در صحرا را با ضریب اطمینان بالایی فراهم می‌کند (Uboldi et al., 1999).

۲. روش انجام تحقیق

۲-۱. نمونه برداری

برای انجام این تحقیق، بلوک‌های ماسه‌سنگی فاقد هرگونه درز، شکاف و هوازدگی تهیه گردید. علاوه بر آن از تعدادی از مغزه های حفاری از سازندهای زمین شناسی نیز استفاده گردید. مشخصات جغرافیایی، زمین شناسی و برخی خصوصیات فیزیکی نمونه‌های مورد آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی، زمین شناسی و برخی ویژگی‌های فیزیکی و مقاومتی نمونه‌های ماسه‌سنگی

شماره	سازند	موقعیت جغرافیایی	عمق (متر)	چگالی (gr/cm ³)	مدول الاستیسته	ضریب پواسون	درصد تخلخل	UCS(MPa)
B ₁	شمشک	فشم	سطح زمین	۲/۳۴	۱۳/۳۶	۰/۱۸	۱۴/۹۸	۶۱/۲۲
B ₂	لالون	شمال شرق تهران	سطح زمین	۲/۵۵	۱۰/۷۸	۰/۱۷	۱۵/۳۸	۲۲۰/۶۷
B ₃	زایگون	شمال شرق تهران	سطح زمین	۲/۳۴	۱۰/۱۳	۰/۱۷	۱۵/۱۲	۸۱/۳۵
B ₄	شمشک	لرستان	۳۳/۷۶-۳۳/۲۶	۲/۵۵	۱۸/۳۵	۰/۲	۸/۲۳	۵۱/۰۶
B ₅	شمشک	لرستان	۸/۷۰-۸/۱۰	۲/۱۷	۵/۴۸	۰/۱۷	۱۹/۲	۲۹/۴۶
B ₆	شمشک	لرستان	۱۷/۳۳-۱۶/۹۰	۲/۵۹	۱۴/۳۵	۰/۱۹	۱۰/۲	۶۶/۶۴
B ₇	شمشک	لرستان	۳۶/۱۶-۳۵/۴۰	۲/۵۵	۲۲/۳۵	۰/۲۱	۹/۵۹	۳۴/۳۷
B ₈	شمشک	لرستان	۴۱/۶۱-۴۱/۱۷	۲/۴۳	۱۲/۳۶	۰/۱۸	۱۰/۴۴	۱۷۰/۸۷
B ₉	شمشک	لرستان	۴۶/۳۴-۴۵/۴۴	۲/۳۴	۱۴/۳۶	۰/۱۸	۴۴/۱۵	۱۰۸/۴۳

۲-۲. آزمایش تک محوری

از بلوک‌های و مغزه های حفاری تهیه شده طبق استاندارد ASTM D4543، مغزه های NX تهیه و آزمایش تک محوری به روی آنها انجام شد. شکل ۲ مراحل آماده سازی و انجام آزمایش تک محوری را نشان می‌دهد. ویژگی‌های فیزیکی و نتایج آزمایش تک محوری روی نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. مقاومت تک محوری نمونه‌ها بین ۲۸ تا ۲۴۰ مگاپاسکال متغیر است.



شکل ۲- مراحل انجام آزمایش تک محوری: الف- تهیه مغزه از بلوک‌های ماسه سنگی، ب- سایش دو سر مغزه ها، ج- انجام آزمایش تک محوری، د- نمونه‌های شکسته شده بعد از بارگذاری

۲-۳. آزمایش نفوذ

۲-۳-۱. آماده سازی نمونه‌ها برای آزمایش نفوذ

به منظور انجام آزمایش نفوذ بخش‌هایی از بلوک‌های سنگی و مغزه‌های حفاری خرد شده و خرده ذرات مکعبی با ابعاد $3 \times 3 \times 3$ ، $5 \times 5 \times 5$ ، $8 \times 8 \times 8$ ، تولید شده است. به منظور ثابت نمودن نمونه‌های مکعبی در حین انجام آزمایش نفوذ، نمونه‌ها در دیسک‌هایی از رزین و سخت کننده با نام تجاری ML-506 قالب‌گیری شده‌اند. برای جلوگیری از نفوذ چسب به منافذ ماسه‌سنگ‌ها و بروز خطا در اندازه‌گیری مقاومت، سطح نمونه‌های مکعبی قبل از قرارگیری در رزین، ابتدا به موم آغشته شده و سپس با آب اشباع شدند. مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- مراحل آماده‌سازی نمونه آزمایش نفوذ، الف- خرد کردن و تهیه نمونه‌ها در اندازه مشخص، ب- قرارگیری نمونه‌ها در قالب رزین، ج- نمونه آماده انجام آزمایش

۲-۳-۲. آزمایش نفوذ

احمدی شده و همکاران (۱۳۹۱) نشان دادند که نتایج آزمایش نفوذ تکرارپذیر می‌باشد. برای انتخاب تعداد نمونه لازم جهت به دست آوردن نتیجه قابل قبول از روش دنیس و همکاران (Denis E. Gill et al., 2005) استفاده گردید. دنیس معتقد است برای انجام یک پژوهش نیاز به تعیین شاخص دقت (Precision Index) می‌باشد. شاخص دقت از رابطه ۳ به دست می‌آید:

$$P = \frac{\bar{X} + t_{\beta} \frac{s}{\sqrt{N-1}}}{\bar{X} - t_{\beta} \frac{s}{\sqrt{N-1}}}, \quad P \geq 1 \quad (3)$$

\bar{X} میانگین حسابی نمونه‌هاست که از رابطه ۴ به دست می‌آید:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^N \frac{X_i}{N} \quad (4)$$

X_i ارزش مشاهده شده از N تعداد نمونه‌ی مورد نظر ماست و شاخص افت در $N \rightarrow \infty$ ، برابر با یک خواهد شد. t_{β} در رابطه (۳)، پارامتری است که ضریب اطمینان مورد نیاز را تعریف می‌کند و S انحراف از معیاری است که پراکندگی ارزش‌های مشاهده شده N تعداد از نمونه‌های مورد نظر را تعیین می‌کند و از رابطه ۵ محاسبه می‌شود:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{(N-1)}} \quad (5)$$

بر اساس این روش تعداد نمونه‌های لازم برای آزمایش نفوذ به شرح جدول ۳ می‌باشد. به منظور بررسی تأثیر سرعت نفوذ در این آزمایش، ابتدا آزمایش بر روی ۳۰ نمونه با سرعت‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میکرون بر ثانیه انجام گردید، سپس با استفاده از روش پیشنهادی دنیس و همکاران مشخص گردید که نتایج بدست آمده اعتبار لازم جهت فعالیت‌های پژوهشی را دارا می‌باشند (جدول ۲). معتبرترین شاخص دقت مربوط به سرعت ۱۰ میکرون بر ثانیه می‌باشد. بارگذاری‌های انجام شده با سرعت ۳۰ میکرون

بر ثانیه دارای کمترین تکرارپذیری می باشند. بنابراین برای سرعت بخشیدن به انجام آزمایش ها و رسیدن به تکرارپذیری مناسب سرعت میانگین ۲۰ میکرون بر ثانیه برای بارگذاری استفاده شده است.

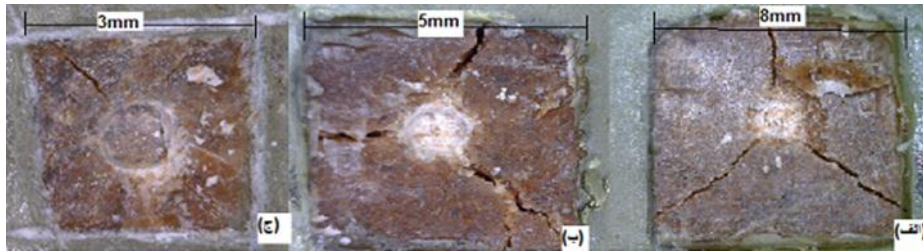
جدول ۲- داده های آماری به دست آمده از نتایج آزمایش با سرعت بارگذاری مختلف، N*: تعداد نمونه های کافی

شاخص دقت (PI)	N*	ضریب تغییرات	انحراف معیار	میانگین CTF(N)	سرعت بارگذاری (میکرون بر ثانیه)
۱/۱۶	۶	۸/۶	۳/۴	۳۹/۶۹	۱۰
۱/۲۰	۷	۹/۴	۳/۶	۳۸/۳۴	۲۰
۱/۲۴	۱۰	۱۱/۰۵	۳/۹	۳۵/۲۵	۳۰

در تحقیق حاضر ۳۰۰ آزمایش نفوذ به روی ۹ نمونه ماسه سنگی انجام شده است به منظور حذف تأثیر شکل خرده ذرات نمونه های خرده سنگی، مکعبی شکل تهیه شده اند. نتایج به دست آمده از آزمایش نفوذ در جدول ۳ ارائه شده است. شکل ۶ تصویر نمونه ها بعد از آزمایش نفوذ را نشان می دهد.

جدول ۳- نتایج حاصل از آزمایش نفوذ بر روی خرده ذرات، CV: انحراف معیار، PI: شاخص دقت، N*: تعداد نمونه های کافی

مغزه استاندارد (NX)	اندازه نمونه: ۸ میلی متر				اندازه نمونه: ۵ میلی متر				اندازه نمونه: ۳ میلی متر				شماره
	N*	PI	CV	CTF(N)	N*	PI	CV	CTF(N)	N*	PI	CV	CTF(N)	
UCS(MPa)													
61.22	5	1.13	8.15	628.06	17	1.31	16.88	353.70	27	1.5	30.2	491.56	B ₁
220.67	10	1.20	12.2	1706.8	13	1.24	14.33	876.48	22	1.2	16.4	956.72	B ₂
81.35	21	1.29	18.4	640.3	12	1.22	13.19	303.87	42	1.7	34.7	448.34	B ₃
51.061	18	1.28	16.7	255.09	15	1.42	25.03	131.29	58	2.0	42.2	76.55	B ₄
29.56	27	1.38	19.9	193.90	22	1.50	24.85	125.63	30	1.8	39.3	71.04	B ₅
66.64	7	1.16	9.54	318.64	19	1.36	21.66	250.87	23	1.5	27.2	127.6	B ₆
34.37	15	1.42	18.2	251.21	25	1.57	12.39	127.34	25	1.5	25.3	110.14	B ₇
170	11	1.21	13.0	945.05	2	1.05	3.220	490.18	18	1.4	23.8	311.99	B ₈
108.43	14	1.26	14.1	834.13	2	1.05	3.429	460.36	23	1.5	27.0	235.38	B ₉

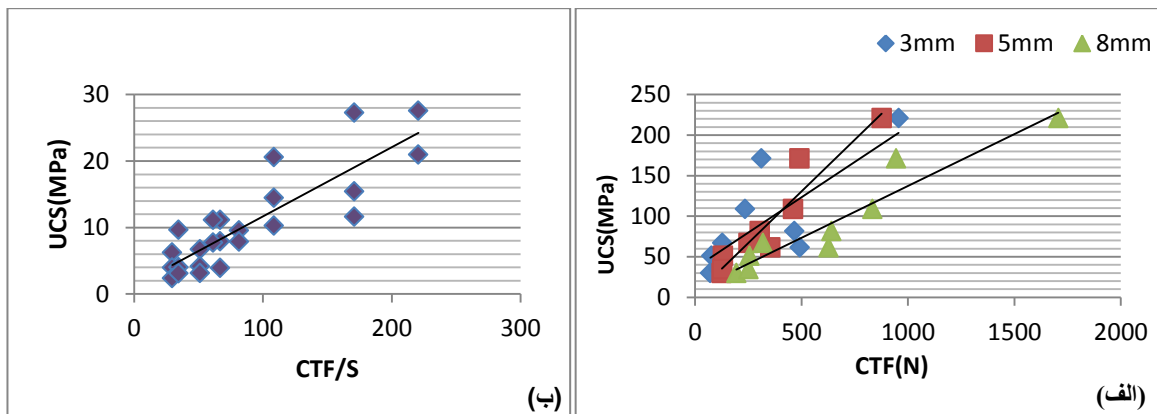


شکل ۶- نمونه بعد از انجام آزمایش نفوذ. الف- نمونه ۸ میلیمتری، ب- نمونه ۵ میلیمتری، ج- نمونه ۳ میلیمتری

۳- تجزیه و تحلیل نتایج

در شکل ۷- الف، نمودار همبستگی بین UCS-CTF، در سه اندازه ۳، ۵ و ۸ میلیمتر نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود بین UCS-CTF رابطه‌ی خطی برقرار است. روابط به دست آمده به شرح زیر است:

$UCS=0.1278 \times CTF_{8mm} + 9.6018$	$R=0.952$	(۳)	برای نمونه ۸ میلیمتری
$UCS=0.2545 \times CTF_{5mm} + 3.3464$	$R=0.95$	(۴)	برای نمونه ۵ میلیمتری
$UCS=0.1736 \times CTF_{3mm} + 36/668$	$R=0.772$	(۵)	برای نمونه ۳ میلیمتری



شکل ۷- نمودار همبستگی بین نتایج، الف- نمودار همبستگی UCS-CTF، ب- نمودار همبستگی UCS- CTF/S

ضریب همبستگی حاصل از انطباق بین UCS- CTF، در خرده‌های با اندازه ۳، ۵ و ۸ میلی‌متر به ترتیب ۰/۷۷، ۰/۹۵ و ۰/۹۵۲ می‌باشد. بیش‌ترین و کمترین ضریب همبستگی به ترتیب در خرده‌های با اندازه ۸ میلی‌متر و ۳ میلی‌متر می‌باشد که نشان می‌دهد با افزایش اندازه ذرات ضریب همبستگی افزایش می‌باشد.

روابط فوق در مورد خرده‌های با اندازه ۳، ۵ و ۸ میلی‌متر و نفوذ کننده با قطر ۱ میلی‌متر کاربرد دارد، به منظور حذف اثر اندازه ذرات، مراحل زیر انجام شده است:

- تعریف پارامتر بدون بعد سطح (S) که از رابطه S_s/S_i به دست می‌آید. در این رابطه S_s سطح نمونه و S_i سطح نفوذکننده است.
- تأثیر دادن پارامتر بدون بعد سطح در نیروی انتقال بحرانی (CTF)، بدین منظور نیروی انتقال بحرانی بر پارامتر بدون بعد سطح تقسیم شده است (CTF/S).

- ارائه رگرسیون خطی بین UCS - CTF/S (شکل ۷-ب) و پیشنهاد رابطه ۶:

$$UCS = 7.0577 \times D + 14.329 \quad R = 0.85 \quad (6)$$

ضریب همبستگی رابطه اخیر که مستقل از اندازه خرده و اندازه نفوذ کننده است، ۰/۸۵ می‌باشد. این رابطه امکان تخمین UCS را مستقل از اندازه خرده فراهم می‌آورد. لازم به توضیح است که اعتبار رابطه مذکور در محدوده اندازه دانه‌هایی است که آزمایش شده است.

۴- اعتبارسنجی روابط تجربی

به منظور اعتبارسنجی روابط تجربی پیشنهاد شده در تحقیق حاضر، دو نمونه ماسه‌سنگی از سازند شمشک انتخاب گردید و بعد از آماده‌سازی نمونه در سه اندازه مختلف (۳،۵،۸)، نیروی انتقال بحرانی (CTF) برای هر نمونه تعیین شد. مقادیر UCS تخمین زده شده از روابط تجربی ۳،۴،۵ و ۶ در جدول ۴ ارائه شده است. در این جدول مقادیر UCS اندازه‌گیری شده از آزمایش آزمایشگاهی مستقیم روی نمونه استاندارد نیز ارائه شده است. مقایسه UCS تخمین زده شده با استفاده از روابط ۳،۴ و ۵ با UCS اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که UCS تخمین زده شده با UCS اندازه‌گیری، به طور میانگین مشابهت ۹۳ درصدی دارد. همچنین UCS تخمین زده شده با استفاده از رابطه ۸، به طور میانگین مشابهت ۸۶ درصدی دارد. نتایج دقت بالای روش آزمایش نفوذ برای تخمین مقاومت تک‌محوری ماسه‌سنگ‌ها را تأیید می‌کند.

جدول ۴- مقاومت تک‌محوری اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده به کمک روابط پیشنهادی

نام نمونه	اندازه نمونه (mm)	UCS اندازه‌گیری (MPa)	CTF(N)	UCS تخمین زده شده (MPa) از روابط ۳، ۴ و ۵	درصد مشابهت با UCS اندازه‌گیری شده	UCS تخمین زده شده از رابطه ۸ (MPa)	درصد مشابهت با UCS اندازه‌گیری شده
A	۳	۴۹/۸۵	۸۵/۶۲	۵۱/۵۳	٪۹۶	۶۷/۳۵	٪۷۴
		۶۲/۵۳	۱۵۹/۳۸	۶۴/۳۳	٪۹۷	۵۳/۹۲	٪۸۶
A	۵	۴۹/۸۵	۱۶۵/۲۷	۴۶/۳۵	٪۹۲	۵۰/۹۵	٪۹۷
		۶۲/۵۳	۲۴۸/۳۸	۶۷/۷۸	٪۹۲	۶۹/۳۷	٪۹۰
A	۸	۴۹/۸۵	۳۷۸/۰۷	۵۷/۲۸	٪۸۷	۴۷/۰۵	٪۹۴
		۶۲/۵۳	۳۸۵/۲	۵۸/۸۳	٪۹۴	۴۷/۶۷	٪۷۶

۵- نتیجه‌گیری

- با توجه به آزمایش‌های انجام شده، تحلیل داده‌ها و مقایسه آن‌ها با یکدیگر، نتایج زیر به دست آمد:
- با افزایش سرعت بارگذاری، تکرارپذیری نتایج آزمایش نفوذ کاهش محسوسی نشان می‌دهد.
- مناسب‌ترین سرعت بارگذاری، سرعت ۲۰ میکرون بر ثانیه می‌باشد، که دارای تکرارپذیری مناسب و زمان کمتری نیاز دارد.
- با افزایش اندازه ذرات، ضریب همبستگی بین UCS_CTF، افزایش می‌یابد.

- ضریب همبستگی حاصل از انطباق بین نتایج آزمایش نفوذ به روی خرده‌های با اندازه ۳، ۵ و ۸ میلی‌متر به ترتیب ۰/۷۷، ۰/۹۵ و ۰/۹۵۲ به دست آمد. مشابهت مقاومت تک محوری پیش‌بینی شده و مقامت تک محوری اندازه‌گیری شده، در نمونه‌های با اندازه مشخص (۳،۵،۸)، ۹۳ درصد به دست آمد.
- به منظور حذف اثر اندازه خرده‌ها، از متغیر بدون بعد، که از تقسیم سطح نمونه بر سطح نفوذکننده به دست می‌آید، استفاده شد. CTF به دست آمده از آزمایش بر متغیر بدون بعد تقسیم و انطباق با UCS اندازه‌گیری شده برقرار شد که ضریب همبستگی ۰/۸۵ به دست آمد.
- با توجه به میزان انطباق بالای روابط ارائه شده، به منظور صرفه‌جویی در زمان و هزینه در مکان‌هایی که تهیه مغزه استاندارد با مشکل مواجه است، می‌توان از روش آزمایش نفوذ به روی خرده‌های ماسه‌سنگی برای تخمین مقاومت فشاری تک محوری ماسه‌سنگ‌ها استفاده کرد.

منابع

- احمدی ششده، ا. (۱۳۹۰). "طراحی و ساخت دستگاه بارگذاری بر خرده ذرات مجزا و بررسی پارامترهای مکانیکی سنگ با استفاده از آن"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، به راهنمایی اساتید، دکتر اکبر چشمی و دکتر عباس قلندرزاده.
- مهرابی مزیدی، ص. (۱۳۸۹)، "تعیین مقاومت فشاری تک محوری برخی از سنگ‌های آهکی با استفاده از خرده‌های سنگی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، به راهنمایی اساتید، دکتر بهمن بهلولی و دکتر اکبر چشمی.
- American Society for Testing and Materials (ASTM, 1984). Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens. Soil and rock, Building Stones: Annual Book of ASTM Standards 4.08. Philadelphia, Pennsylvania.
- Bell, F.G., 1978. The physical and mechanical properties of the Fell sandstone, Northumberland, England. Engineering Geology Vol. 12, pp. ۲۹-۱۰.
- Bell, F.G., Lindsay, P., 1999. The petrographic and geomechanical properties of some sandstones. Engineering Geology Vol. 53, pp. 57-81.
- Denis E. Gill, Robert Corthe'sy, Maria Helena Leite, 2005. Determining the minimal number of specimens for laboratory testing of rock properties. Engineering Geology Vol. 78, pp. 29-51.
- ISRM Suggested Methods. In: , 1981. Brown ET, editor. Rock characterisation testing and monitoring. Oxford: Pergamon Press.
- Jaramillo, R.A., 2004. Estudio geomecánico estadístico de la estabilidad durante la perforación de pozos en el Piedemonte Lanero, campo Recetor. Tesis profesional Fac. Minas., Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. (in Colombian)
- Jefferson Mateus, Nestor-Fernando Saavedra, Zuly Calderón n-Carrillo, Darwin Mateus, (2007). Correlation development between indentation parameters and uniaxial compressive strength for colombian sandstones. CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro - Vol Nú m. 3.
- Mateus, J., Saavedra, N. F., Calderón n, Z. H., & Mateus, D., 2007. Correlation development between indentation parameters and uniaxial compressive strength for Colombian sandstones. CT&F-Ciencia Tecnología y Futuro Vol. 3 (3), pp. 125-135.
- Nes, O.-M., Horsrud, P., Sonstebo, E.F., Holt, R.M., 2001. Rock physics from small samples- sometimes your only solution. SCA -58.
- Protodyakonov, M.M., 1969. Method of determining the strength of rock under uniaxial compression. Mech. prop. of rocks, Acad. Sci USSR, Trans. Israel Prog. Sci. Trans., pp. 1-8.
- Ringstad, C., Lofthus, E.B., Sonstebo, E.F., Fjær, E., Zausa, F., & Giin-Fa Fuh., 1998. Prediction of rock parameters from micro-indentation measurements: The effect of sample size. EUROCK '98, Trondheim, Norway, July 8-10. SPE 47313.
- Santarelli, F.J., Marshala, A.F., Brignoli, M., Rossi, E., & Bona N., 1996. Formation Evaluation from logging on cuttings. SPE Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference, Midland, Texas, March 27-29. SPE 36851.
- Shakoor, A., Bonelli, R.E., 1991. Relationship between petrographic characteristics, engineering index properties, and mechanical properties of selected sandstones. Bulletin of the International Association of Engineering Geology Vol. 28, pp. 55-71.
- Uboldi, V., Civolani, L., & Zausa, F., 1999. Rock strength measurements on cutting as input data for optimizing drill bit selection. SPE Annual Conference and Exhibition, Houston, Texas, October 3-6. SPE, ENI SpA 56441.
- Vutukuri, V.S., Lama, R.D., Saluja, S.S., 1974. Handbook on Mechanical Properties of Rocks. Trans Tech Publications Clausthal, Germany Vol. 1, p. 280.
- Yegulalp, T.M., Wane, M.T., 1968. Application of extreme values statistics to test data. Trans. Soc. Min. Eng. Vol. 241, pp. 372-376.
- Zausa, F., Civolani, L., Brignoli, M., & Santarelli, F.J., 1997. Real time wellbore stability analysis at the rig site. SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, The Netherlands, March 4-6. SPE 37670.
- Zoback, M.D., Barton, C.A., Brudy, M., Castillo, D.A., Finkbeiner, T., Grollmund, B.R., Moos, D.B., Peska, P., Ward, C.D., Wiprut, D.J., 2003. Determination of stress orientation and magnitude in deep wells. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 40, 1049-1076.