

تأثیر تغییرات قطر سنبه پانچ استوانه‌ای در تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری برخی از سنگ‌های رسوبی سازند قم

مجتبی حیدری^{۱*}؛ حسن محسنی^۱؛ سید حسین جلالی^۲

۱- عضو هیئت‌علمی گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بوعلی سینا همدان

۲- دکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا همدان

پذیرش:

دریافت: **

چکیده

مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ یکی از مهم‌ترین پارامترها در طراحی سازه‌های سنگی می‌باشد. آزمایش پانچ، از جمله آزمایش‌های شاخص است که توانایی تخمین غیرمستقیم مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ‌ها را دارا می‌باشد. این آزمایش ساده، ارزان و سریع بوده و به آماده‌سازی خاص نیاز نداشته و با نمونه‌های با ابعاد کوچک‌تر قابل انجام است. آزمایش‌های پانچ به دو شکل بلوکی و استوانه‌ای انجام می‌شود. در پژوهش حاضر کارایی آزمایش پانچ استوانه‌ای در تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری شش نوع سنگ رسوبی از سازند قم، اعم از گرینستون، وکستون-مادستون، باندستون، کالک‌لیتایت، سنگ گچ و مارن سیلتی، در جنوب شهر قم، بررسی شد. همچنین تأثیر قطر سنبه پانچ استوانه‌ای، بر تغییرات میزان شاخص پانچ استوانه‌ای با استفاده از چهار سنبه با قطرهای مختلف (۱۰، ۱۳، ۱۶ و ۱۹ میلی‌متر) مطالعه شد. یافته‌ها نشان داد که آزمون‌های انجام‌شده با سنبه با قطر ۱۰ میلی‌متر با بیشترین ضریب تعیین ($R^2=0.62$)، مناسب‌ترین نتیجه را برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری تمامی سنگ‌ها، فراهم می‌سازد.

واژگان کلیدی

پانچ استوانه‌ای، قطر سنبه، آزمایش‌های شاخص، مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)، سازند قم

۱- مقدمه

آزمایش پانچ به دلیل سهولت در تهیه نمونه، کوچک بودن ابعاد نمونه موردنیاز (که امکان تهیه آن از مغزه‌های ناقص یا کوتاه نیز وجود دارد) و همچنین به دلیل دقت نسبتاً خوبی که در تخمین غیرمستقیم مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ‌ها داراست، در تحقیقات جدید جایگاه مناسبی پیدا کرده است. آزمایش‌های پانچ به دو شکل بلوکی و استوانه‌ای انجام می‌شود. در هردو روش از نمونه‌های دیسکی شکل استفاده می‌شود. در پانچ بلوکی، شکست سنگ در امتداد دو خط موازی رخ می‌دهد ولی در پانچ استوانه‌ای، بارگذاری با استفاده از سنبه‌ای استوانه

در سنگ‌هایی که امکان تهیه نمونه‌های با ابعاد استاندارد وجود ندارد و یا آماده‌سازی آن‌ها مستلزم هزینه و وقت زیادی است، استفاده از برخی از آزمون‌های شاخص برای ارزیابی مقاومت فشاری تک‌محوری (*Uniaxial Compressive Strength*) سنگ‌ها میسر نیست. بسیاری مواقع امکان تهیه مغزه‌های سنگی به سبب سستی، خردشدگی و تورق وجود ندارد. در این حالت انجام آزمون‌های غیرمستقیم بر روی نمونه‌های کوچکی که نیاز به آماده‌سازی ندارد، توصیه شده است [۱].

نمودند. کاراکول و همکاران [۱۰] به ارزیابی ناهمسانگردی مقاومتی ناشی از جهت‌یابی سطوح ضعف با استفاده از شاخص پانچ بلوکی و مقاومت فشاری تک‌محوری پرداختند.

میشرا و بازو [۱۱] طی تحقیقی با عنوان "استفاده از پانچ بلوکی برای تخمین مقاومت فشاری و کششی سنگ‌ها" اعلام کردند که آزمایش پانچ بلوکی نیز مانند آزمایش بار نقطه‌ای توانایی تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری (*UCS*) را داراست. آن‌ها نشان دادند که تخمین مقاومت کششی به‌وسیله پانچ بلوکی در مقایسه با بار نقطه‌ای مفیدتر است. میشرا و بازو [۱۱] به ارزیابی مقایسه‌ای کارایی آزمون‌های شاخص گوناگون و روش‌های تحلیل متفاوت (رگرسیون و سیستم فازی) در تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری سه نوع سنگ شیست، گرانیت و ماسه‌سنگ پرداختند. آن‌ها نشان دادند که آزمایش‌های پانچ بلوکی و بار نقطه‌ای برای گرانیت‌ها، بهترین نتایج را به دست می‌دهد.

میشرا و همکاران [۱۲] با بهره گرفتن از نتایج آزمایش پانچ و با استفاده از روش‌های سیستم فازی، شبکه عصبی و *ANFIS* مدل‌هایی را برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری بلوکی ارائه دادند و با استفاده از ابزارهای آماری کارایی این آزمایش را برای تخمین غیرمستقیم مقاومت فشاری تک‌محوری به اثبات رساندند.

اولوسای و همکاران (۲۰۰۱) [۱۳] استفاده از روش پانچ بلوکی را به‌عنوان یک آزمایش استاندارد به انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (*International Society for Rock Mechanics*) پیشنهاد کردند که از سوی *ISRM* به‌عنوان روش استاندارد و پیشنهادی این انجمن در سال ۲۰۰۶ معرفی گردید. با این‌وجود تاکنون برای آزمایش پانچ استوانه‌ای هیچ استاندارد و روش پیشنهادی رسمی ارائه نشده است. افزون بر آن، در معدود مطالعات انجام‌شده با استفاده از پانچ استوانه‌ای هیچ اشاره‌ای به تأثیر قطر سنبه بر نتایج و کارایی این آزمایش نشده است.

اهداف این تحقیق، ارزیابی تأثیر قطرهای مختلف سنبه بر مقادیر شاخص پانچ استوانه‌ای (*cylindrical punch index*)، میزان انطباق مقادیر شاخص پانچ استوانه‌ای با قطر سنبه‌ها و قابلیت پانچ استوانه‌ای برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ‌ها می‌باشد.

در آزمون پانچ، استفاده از قطر سنبه ۱۰ میلی‌متر مرسوم بوده

ای می‌باشد که منجر به گسیختگی دایره‌ای سنگ به‌اندازه قطر سنبه می‌شود. شرایر [۲] با استفاده از نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بر روی نمونه‌هایی به ضخامت ۱۰ و قطر ۴۰ میلی‌متر که از تعداد ۹ گونه سنگ مختلف (برش، کالک آرنایت، کلسی لوتایت، دونیت، گنیس، سنگ‌آهک، مرمر، گل‌سنگ و ماسه‌سنگ) تهیه‌کرده بود، رابطه‌ای بین مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی برزیلی و *BPI* (*block punch index*) ارائه نمود [۳]. یک مطالعه آزمایشی برای تحقیق بر روی تأثیر اندازه نمونه بر روی *BPI* توسط اولوسای و گوکچه‌اوغلو در سال ۱۹۹۷ [۴] آغاز گردید و تا سال ۱۹۹۹ ادامه یافت. در این تحقیقات ۱۹۰۰ آزمایش پانچ بلوکی بر روی ۲۵ نوع مختلف سنگ انجام شد. نمونه‌های تهیه‌شده دارای ضخامت‌هایی بین ۵ تا ۱۵ میلی‌متر بوده و از لحاظ قطری هم از نمونه‌های مغزه با قطر *BX* (۴۲ میلی‌متر) و *NX* (قطر ۵۴) که به‌طور معمول در اکثر مطالعات ژئوتکنیکی استفاده می‌شود، استحصال‌شده بودند. نتایج آزمایشات نشان داد که اصلاح تأثیر اندازه در آزمایش *BPI* ضروری و امری غیرقابل‌چشم‌پوشی است و قطر ۱۰ و ضخامت ۵۰ میلی‌متر را می‌توان به‌طور نسبی به‌عنوان ابعاد معیار و مناسب برای نمونه‌ها در نظر گرفت. سولوکوچو و اولوسای [۳] روابط جدیدی برای اصلاح عدد *BPI* براساس ابعاد نمونه و همچنین تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری از نتایج اصلاح‌شده آزمایش پانچ بلوکی *BPIc* ارائه دادند. خانلری و همکاران [۵] نیز، آنیزوتروپی مقاومتی سنگ‌های دگرگونی استان همدان را با استفاده از شاخص پانچ استوانه‌ای مطالعه نمودند. در این تحقیق از قطر سنبه ۱۰ میلی‌متر استفاده شده است.

نیکودل و باغبانیان [۶] با استفاده از دستگاه پانچ به بررسی پارامترهای مقاومتی سنگ‌های ناهمسانگرد پرداختند. احمدی [۷] با استفاده از دستگاه ساخته‌شده برای پانچ نمونه‌های با قطر ۵۴ میلی‌متر و انجام آزمایش پانچ بلوکی بر روی سنگ‌های آهکی سازنده‌های لار و دلیچای؛ ضریب‌های تبدیل شاخص پانچ بلوکی به مقاومت فشاری تک‌محوری را برای این سنگ‌ها به دست آورد. جعفری و همکاران [۸] برای اولین بار آزمایش پانچ استوانه‌ای را بکار برده و نتایج آن را با نتایج پانچ بلوکی بر روی ۶۳ نوع سنگ برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری مقایسه کردند. حسینی و همکاران [۹] اقدام به ارزیابی کارایی پانچ بلوکی برای برآورد مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ‌های مارنی

پس از وارد شدن بخش درپوش بالایی در بدنه اصلی، بین انتهای بخش استوانه‌ای درپوش و کف محفظه، به اندازه ۱۵ میلی‌متر فضا خالی به منظور قرارگیری نمونه باقی می‌ماند. از آنجاکه معمولاً ضخامت اکثر نمونه‌های کمتر از این مقدار است، صفحه‌ای فولادی (پولک فولادی) با ضخامت ۶ میلی‌متر ساخته شد تا فضای خالی مانده شده را پر کرده و نمونه را در جای خود ثابت نگه دارد. قابل ذکر است که بدنه اصلی، درپوش بالایی و پولک‌های فولادی از فولاد استاندارد VCN 200 با سختی ۴۸-۵۰ راکول، ساخته شده‌اند.



شکل ۳: قسمت‌های مختلف دستگاه پانچ استوانه‌ای: نمای بدنه و درپوش از بالا (الف)، سنبه پانچ کننده (ب)، پیچ‌های محکم کننده دو بخش دستگاه (ج) و پولک فولادی سوراخ‌دار (د)

برای انجام آزمایش پانچ استوانه‌ای با قطرهای پانچ کننده متفاوت، اقدام به ساخت چهار عدد بخش درپوش با ابعاد کاملاً مشابه گردید. تنها تفاوت این چهار درپوش قطر منفذ میانی آن‌ها می‌باشد که معادل ۱۰، ۱۳، ۱۶ و ۱۹ میلی‌متر می‌باشند. به منظور صرفه‌جویی در هزینه و زمان، بدنه استوانه‌ای اصلی با قطر منفذ میانی ۱۹ میلی‌متر ساخته شد. برای اینکه بتوان از این بدنه برای انجام آزمایش پانچ با سایر قطرها نیز سود جست، پولک‌های فولادی سخت با قطر سوراخ‌های ۱۰، ۱۳، ۱۶ و ۱۹ میلی‌متر ساخته شد. با قرارگیری پولک فولادی با قطر سوراخ مشخص درون محفظه داخلی بدنه اصلی، دستگاه برای انجام آزمایش با قطر مورد نظر آماده می‌شود. شکل ۴ درپوش‌ها، پولک‌های فولادی و سنبه‌ها با قطرهای خاص را نمایش می‌دهد.

۲-۲- مشخصات دستگاه پانچ استوانه‌ای

پانچ استوانه‌ای از لحاظ نحوه عملکرد شباهت‌هایی با دستگاه ساخته شده توسط مزنتی و سورز (شکل ۲) دارد [۸]. این دستگاه برای شبیه‌سازی تأثیر بارهای متمرکز بر پی‌های سنگی قرار گرفته بر روی لایه‌های سست‌تر، ساخته شده و به گونه‌ای طراحی شده که می‌تواند در اکثر دستگاه‌های بارگذاری قائم جایگذاری شده و مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق برای اعمال بار قائم از دستگاه بارگذاری آزمایش مقاومت فشاری تک محوری (ساخت شرکت ELE) استفاده شده است. مقدار بار وارده به وسیله نیروسنج دیجیتال داخلی دستگاه قابل قرائت است.



شکل ۴: تصویر ابزار آزمایش پانچ استوانه‌ای

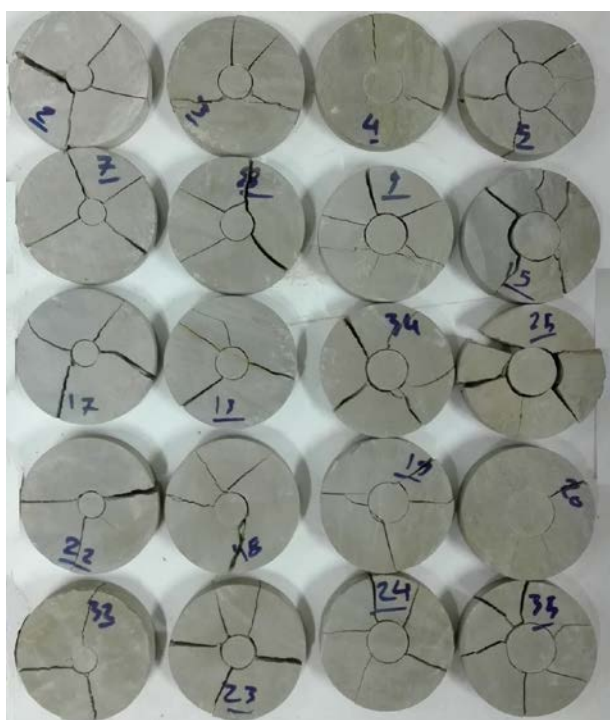
این ابزار محفظه‌ای را برای نگهداری نمونه دیسکی شکل درون خود دارد و توسط پیستون استوانه‌ای شکلی (سنبه) که قابلیت بارگذاری قائم بر روی نمونه را داراست، با اعمال بار، سطح شکست دایره‌ای در نمونه سنگ ایجاد می‌شود. بخش گسیخته شده هم بر اثر فشار استوانه بالایی به شکل قرصی به داخل منفذ تعبیه شده در ته محفظه رانده می‌شود.

همان‌گونه که در شکل‌های ۲ و ۳ دیده می‌شود، دستگاه دارای بخش‌های بدنه اصلی، درپوش بالایی و استوانه بارگذاری می‌باشد. بدنه اصلی استوانه‌ای شکل و دارای محفظه داخلی به قطر ۸۰ میلی‌متر می‌باشد که در بخش میانی به منفذی ختم می‌شود که استوانه اعمال بار می‌تواند با فاصله کمتر از ۰/۲ میلی‌متر در دو سمت، درون آن جابجا شود. درپوش هم دارای منفذ مشابهی است و یک بخش استوانه‌ای به قطر ۷/۷ میلی‌متر دارد که درون محفظه داخلی بدنه اصلی قرار می‌گیرد.

بارگذاری

پس از انجام آزمایش پانچ استوانه‌ای نمونه‌ها به چند قسمت تقسیم می‌شوند که مهم‌ترین قسمت آن بخش قرص مانند میانی است که معمولاً شکل کامل و سالم داشته و قسمت‌های اطراف آن به ابعاد و تعداد مختلف متحمل شکستگی‌های شعاعی می‌شوند (شکل ۶).

در حین آزمایش با توجه به افت‌های متوالی دربار وارده بیش از ۱ کیلونیوتن و همچنین صدای شکستگی شنیده‌شده قبل از شکست اصلی در سنگ، می‌توان وقوع شکست‌های پیش از شکست اصلی را تشخیص داد.



شکل ۶: تصاویری از نمونه‌های شکسته شده توسط دستگاه پانچ استوانه‌ای با قطرهای ۱۹، ۱۶، ۱۳ و ۱۰ (به ترتیب از راست به چپ)

آزمایش در شرایط زیر قابل قبول است:

- افت بار در خلال آزمایش، کمتر از ۱ کیلونیوتن باشد.
- قسمت میانی نمونه شکسته شده قرص مانند و سالم باشد (شکل ۶).
- مقدار بار قرائت‌شده در موارد مشکوک به خطا، در محدوده مطلوب سایر قرائت‌ها باشد.
- برای محاسبه شاخص پانچ استوانه‌ای (CPI) برحسب مگاپاسکال از رابطه ۱ استفاده شده است [۸]:

$$CPI = \frac{F \times 10^{-3}}{A} \quad (1)$$



شکل ۴: درپوش‌ها، سنبه‌ها با قطرهای ۱۰، ۱۳، ۱۶ و ۱۹ میلی‌متر (از راست به چپ) و پولک‌های فولادی

۲-۳- روش انجام آزمایش‌ها

در این تحقیق ۳۵ بلوک سنگی از شش نوع سنگ مختلف از سنگ‌های رسوبی اعم از رسوبی شیمیایی، بیوشیمیایی، تخریبی و تبخیری مشتمل بر سنگ‌های آهکی (با بافت گرینستون، وکستون-مادستون، باندستون)، کالکلیتایت، مارن سیلتی و سنگ گچ آماده شد. این بلوک‌های سنگی از رخنمون‌های سازند قم واقع در جنوب شهر قم تهیه گردید و آزمایش شاخص پانچ استوانه‌ای (Cylindrical Punch) (CPI Index) بر روی مغزه‌های تهیه‌شده از این بلوک‌ها انجام گردید. برای هرکدام از قطرهای سنبه‌ی پانچ، ۳۰۰ آزمایش انجام شد. در مجموع برای کل قطرها تعداد ۱۲۰۰ نمونه مورد آزمایش قرار گرفت. نمونه‌ها مطابق روش پیشنهادی ISRM [۱۴] برای آزمایش پانچ بلوکی، آماده‌سازی شدند. پس از قرار دادن پولک فولادی و نمونه در درون دستگاه، درپوش بسته‌شده، سپس در محل بارگذاری قرار می‌گیرد (شکل ۵). همانند آزمایش پانچ بلوکی و بار نقطه‌ای، بارگذاری به نحوی اعمال می‌گردد که نمونه‌ها در فاصله زمانی بین ۱۰ تا ۶۰ ثانیه شکسته شوند.



شکل ۵: نحوه قرارگیری دستگاه پانچ استوانه‌ای در دستگاه

جدول ۱: ویژگی‌های آماری شاخص پنج استوانه‌ای (CPI) برای سنبه با قطرهای مختلف بر حسب مگاپاسکال (MPa)

انحراف معیار	بیشینه	کمینه	آزمایش	نوع سنگ
۸/۸۰	۴۷/۵۵	۸/۶۵	CPI 10	گرینستون
۱۲/۸۹	۶۵/۷۲	۸/۸۷	CPI 13	
۱۶/۳۹	۷۱/۵۶	۹/۸۳	CPI 16	
۹/۷۱	۴۴/۸۹	۷/۲۷	CPI 19	
۱۲/۵۵	۵۲/۹۹	۵/۹۷	CPI 10	مادستون - وکستون
۱۱/۸۸	۵۰/۳۹	۶/۷۵	CPI 13	
۱۲/۳۲	۵۷/۴۱	۷/۱۳	CPI 16	
۱۱/۹۳	۵۲/۹۲	۶/۱۳	CPI 19	
۱۲/۲۲	۶۹/۷۲	۱۱/۵۳	CPI 10	باندستون
۹/۴۲	۵۰/۴۳	۹/۰۶	CPI 13	
۱۱/۱۴	۵۱/۷۰	۱۲/۷۷	CPI 16	
۱۱/۴۰	۵۷/۷۶	۵/۵۶	CPI 19	
۱۰/۱۱	۴۸/۶۷	۵/۸۹	CPI 10	کالک لیتایت
۷/۸۵	۳۱/۹۴	۶/۷۱	CPI 13	
۸/۱۱	۳۸/۶۰	۹/۲۲	CPI 16	
۸/۸۷	۴۱/۲۴	۷/۱۴	CPI 19	
۷/۵۱	۳۵/۴۲	۶/۱۵	CPI 10	مارن سیلتی
۵/۴۴	۲۹/۸۴	۷/۲۵	CPI 13	
۸/۶۷	۳۶/۵۰	۶/۳۲	CPI 16	
۶/۶۵	۲۵/۵۵	۶/۰۷	CPI 19	
۳/۳۹	۲۱/۴۶	۹/۵۶	CPI 10	سنگ - گچ
۳/۳۳	۱۹/۵۰	۸/۴۷	CPI 13	
۳/۷۶	۲۲/۱۵	۱۱/۱۲	CPI 16	
۳/۳۵	۱۸/۰۴	۶/۸۲	CPI 19	
۹/۳۶	۴۸/۶۷	۵/۸۹	CPI 10	کل سنگ‌ها
۱۱/۲۵	۶۵/۷۱	۶/۷۱	CPI 13	
۱۲/۰۸	۷۱/۵۶	۶/۳۲	CPI 16	
۹/۹۶	۵۷/۷۶	۵/۵۶	CPI 19	

CPI 19: شاخص پنج استوانه‌ای با قطر سنبه ۱۹ میلی‌متری،

CPI 16: شاخص پنج استوانه‌ای با قطر سنبه ۱۶ میلی‌متری،

CPI 13: شاخص پنج استوانه‌ای با قطر سنبه ۱۳ میلی‌متری،

CPI 10: شاخص پنج استوانه‌ای با قطر سنبه ۱۰ میلی‌متری

برای کل سنگ‌ها، با انحراف معیار ۹/۳۶، پنج استوانه‌ای با قطر سنبه ۱۰ میلی‌متر کمترین پراکندگی داده‌ها را از خود نشان می‌دهد.

در شکل ۷ مقادیر میانگین شاخص پنج استوانه‌ای به‌دست‌آمده برای سنبه با قطرهای مختلف در انواع سنگ‌ها به نمایش درآمده است.

که در آن F مقدار نیروی لازم برای شکست نمونه بر حسب کیلونیوتن و A سطح شکست واقع شده در نمونه سنگ بر حسب مترمربع می‌باشد که مقدار آن از رابطه ۲ محاسبه می‌گردد.

$$A = 2\pi r t \times 10^{-6} \quad (2)$$

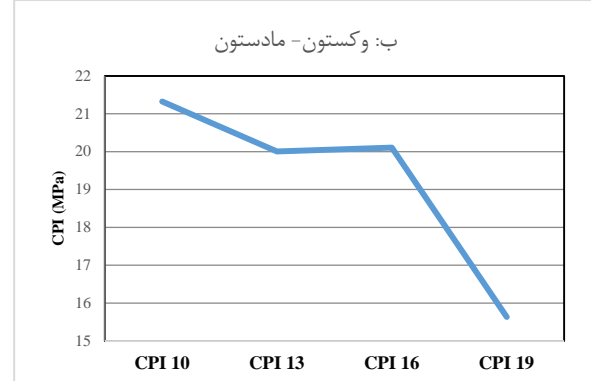
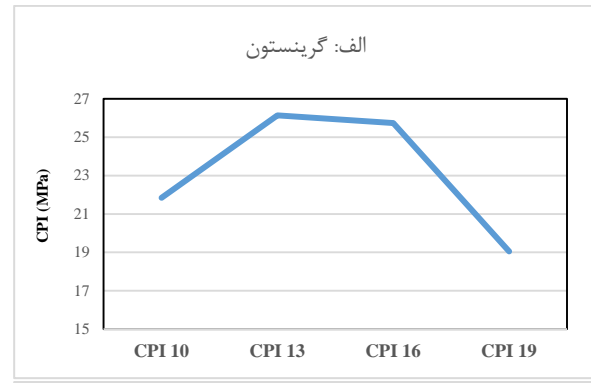
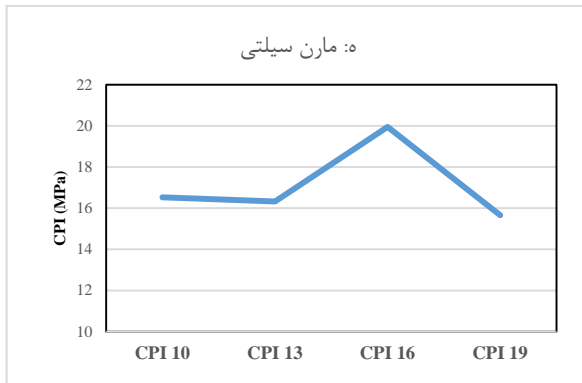
که در آن r شعاع استوانه بارگذاری (سنبه) بر حسب میلی‌متر و t ضخامت نمونه بر حسب میلی‌متر می‌باشد.

سطح برش خورده موردنظر در این آزمایش همان سطح دایره ای خارجی قرص شکسته شده می‌باشد. سازوکار شکست در این آزمایش با شکستگی در آزمایش پانچ بلوکی شبیه به هم باشند. به عبارت دیگر عامل اصلی شکستگی در سنگ در هر دو آزمایش، برش ایجاد شده در سطوح شکست می‌باشد.

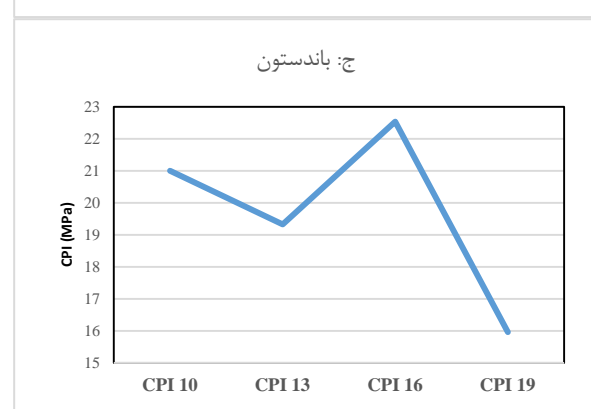
۳- بحث و نتایج

داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌های پانچ با استفاده از نرم‌افزار SPSS تحلیل شده‌اند. در جدول ۱، ویژگی‌های آماری داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش پنج استوانه‌ای (CPI) برای قطرهای مختلف سنبه نشان داده شده است. ذکر این نکته لازم است که از بین ۱۲۰۰ آزمایش انجام شده با قطرهای سنبه مختلف در ۳۷ آزمایش قسمت میانی نمونه‌ها دارای خردشدگی بوده و نتیجه آن‌ها از محاسبات کنار گذاشته شد. برای پی بردن به نرمال بودن توزیع متغیرها از آزمون ناپارامتریک کلموگراف - اسمیرنوف که به آزمون‌های نیکویی برازش معروف است، استفاده شده است.

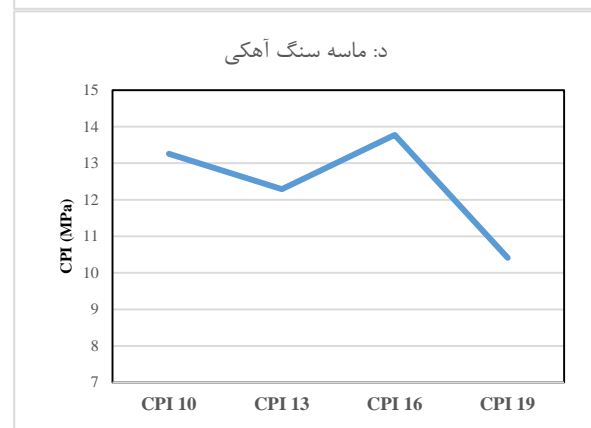
نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۱ نشان می‌دهد که در سنگ گرینستون داده‌های به‌دست‌آمده از پنج استوانه‌ای با قطر سنبه ۱۰ میلی‌متر و پنج استوانه‌ای با قطر سنبه ۱۹ میلی‌متر به ترتیب دارای کمترین مقدار انحراف معیار می‌باشند. پانچ استوانه‌ای با قطر سنبه ۱۳ میلی‌متر و پنج استوانه‌ای با قطر سنبه ۱۹ میلی‌متر به ترتیب دارای کمترین مقدار انحراف معیار در سنگ‌های وکستون - مادستون، مارن سیلتی و سنگ گچ بوده‌اند. در باندستون و کالک‌لیتایت نیز کمترین مقدار انحراف معیار در داده‌های پنج استوانه‌ای با قطر سنبه ۱۳ میلی‌متر و سپس پنج استوانه‌ای با قطر سنبه ۱۶ میلی‌متر به‌دست‌آمده است. در مجموع داده‌های پنج استوانه‌ای با قطر سنبه ۱۳ میلی‌متر در ۵ نوع سنگ و داده‌های پنج استوانه‌ای با قطر سنبه ۱۰ میلی‌متر در یک نوع سنگ کمترین مقدار انحراف معیار را نشان می‌دهند.



ادامه شکل ۷: مقادیر میانگین شاخص پانچ استوانه‌ای به دست آمده برای سنبه با قطرهای مختلف الف) گرینستون، ب) وکستون - مادستون ج) باندستون د) کالکلیتایت ه) مارن سیلتی و) سنگ گچ



همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است مقادیر میانگین شاخص پانچ استوانه‌ای به دست آمده برای قطرهای مختلف سنبه با همدیگر متفاوت می‌باشند. در این میان مقادیر میانگین شاخص پانچ استوانه‌ای برای قطر سنبه ۱۹ میلی‌متر (CPI 19) در تمامی انواع سنگ‌های مورد مطالعه به میزان قابل توجهی کم تر از بقیه شاخص‌های قطرهای مختلف سنبه است.



بیشترین مقادیر شاخص پانچ استوانه‌ای در سنگ‌های گرینستون، وکستون - مادستون، باندستون، کالکلیتایت، مارن سیلتی و سنگ گچ به ترتیب مربوط به قطرهای سنبه ۱۰، ۱۳، ۱۶، ۱۶، ۱۶ و ۱۰ می‌باشد. در جدول ۲ مقادیر ضریب تعیین بین مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری و پانچ استوانه‌ای با قطرهای مختلف ارائه شده است.

در شکل ۸ ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوری و شاخص پانچ استوانه‌ای (CPI) با قطرهای سنبه ۱۰، ۱۳، ۱۶ و ۱۹ میلی‌متر در گرینستون نشان داده شده است.

شکل ۷: مقادیر میانگین شاخص پانچ استوانه‌ای به دست آمده برای سنبه با قطرهای مختلف الف) گرینستون، ب) وکستون - مادستون ج) باندستون د) کالکلیتایت ه) مارن سیلتی و) سنگ گچ

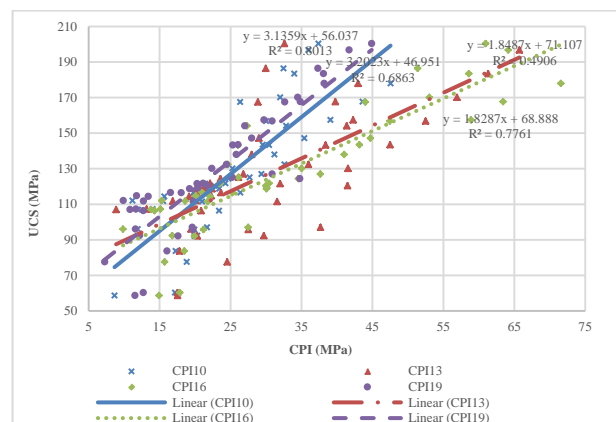
جدول ۲- مقادیر ضریب تعیین مقادیر مقاومت فشاری تک محوری و پانچ استوانه‌ای با قطرهای مختلف

RMSE	MAE	B	VAF	R ²	رابطه	آزمایش	نوع سنگ
۲۹/۶۴	۰/۲۵	۰/۱۰	۰/۶۹	۰/۶۹	UCS = 3.2023CPI 10 + 46.951	CPI 10	گرینستون
۳۵/۹۰	۰/۲۸	۰/۱۴	۰/۵۹	۰/۵۹	UCS = 1.831CPI 13 + 68.573	CPI 13	
۲۳/۶۰	۰/۲۲	۰/۰۵	۰/۷۸	۰/۷۸	UCS = 1.8287CPI 16 + 68.888	CPI 16	
۲۲/۲۴	۰/۲۳	۰/۰۰	۰/۸۰	۰/۸۰	UCS = 3.1359CPI 19 + 56.037	CPI 19	
۲۷/۹۷	۰/۱۸	۰/۱۹	۰/۵۱	۰/۵۱	UCS = 0.91CPI 10 + 70.259	CPI 10	وکستون - مادستون
۱۶/۸۴	۰/۱۸	۰/۰۸	۰/۶۶	۰/۶۶	UCS = 1.8439CPI 13 + 56.374	CPI 13	
۳۴/۹۷	۰/۲۵	۰/۲۶	۰/۲۱	۰/۲۱	UCS = 0.6677CPI 16 + 78.936	CPI 16	
۲۲/۶۲	۰/۲۲	۰/۱۳	۰/۵۳	۰/۵۳	UCS = 2.5401CPI 19 + 56.502	CPI 19	
۱۳/۳۰	۰/۳۱	۰/۰۵	۰/۵۶	۰/۵۶	UCS = 3.4064CPI 10 + 27.154	CPI 10	باندستون
۳۴/۹۳	۰/۳۰	۰/۲۴	۰/۵۶	۰/۵۶	UCS = 3.595CPI 13 + 20.998	CPI 13	
۱۵/۱۷	۰/۲۳	۰/۰۶	۰/۷۰	۰/۷۰	UCS = 2.3989CPI 16 + 39.784	CPI 16	
۱/۸۹	۰/۲۹	۰/۰۰	۰/۵۱	۰/۵۱	UCS = 3.0816CPI 19 + 38.844	CPI 19	
۴/۵۲	۰/۱۹	۰/۰۱	۰/۳۷	۰/۳۷	UCS = 0.5303CPI 10 + 45.606	CPI 10	ماسه سنگ آهکی
۵/۰۶	۰/۱۵	۰/۰۱	۰/۶۲	۰/۶۲	UCS = 1.0855CPI 13 + 40.193	CPI 13	
۵/۵۱	۰/۱۳	۰/۰۱	۰/۶۱	۰/۶۱	UCS = 0.9981CPI 16 + 40.195	CPI 16	
۱/۲۴	۰/۱۳	۰/۰۰	۰/۷۰	۰/۷۰	UCS = 0.8331CPI 19 + 39.345	CPI 19	
۱۳/۳۸	۰/۴۶	۱/۰۰	۰/۸۹	۰/۸۹	UCS = 3.7739CPI 10 - 2.064	CPI 10	مارن سیلتی
۳۸/۴۱	۰/۸۶	۳/۱۸	۰/۴۱	۰/۴۱	UCS = 2.7753CPI 13 + 11.365	CPI 13	
۲۴/۷۰	۰/۸۲	۲/۰۵	۰/۵۱	۰/۵۱	UCS = 3.1473CPI 16 - 1.9851	CPI 16	
۳۶/۲۵	۰/۹۷	۳/۰۱	۰/۲۲	۰/۲۲	UCS = 2.3664CPI 19 + 16.502	CPI 19	
۶/۷۳	۰/۰۹	۰/۰۴	۰/۶۴	۰/۶۴	UCS = 1.3041CPI 10 + 16.628	CPI 10	سنگ گچ
۷/۱۲	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۱۴	۰/۱۴	UCS = 0.6973CPI 13 + 27.944	CPI 13	
۰/۱۳	۰/۰۴	۰/۰۰	۰/۹۴	۰/۹۴	UCS = 1.8382CPI 16 + 7.611	CPI 16	
۴/۸۰	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۳۹	۰/۳۹	UCS = 0.9921CPI 19 + 18.204	CPI 19	
۷۹/۲۶	۲۰/۱۶۴	۱/۱۸	۰/۶۱	۰/۶۲	UCS = 4.0206CPI 10 + 4.0142	CPI 10	کل سنگ‌ها
۹۹/۰۴	۲۷۲/۶۲	۱/۵۴	۰/۳۳	۰/۳۳	UCS = 0.6973CPI 13 + 27.944	CPI 13	
۸۴/۰۸	۲۲۰/۰۶	۱/۳۹	۰/۴۹	۰/۴۹	UCS = 1.8382CPI 16 + 7.611	CPI 16	
۱۰۹/۴۱	۲۹۷/۶۰	۱/۶۸	۰/۲۵	۰/۲۵	UCS = 0.9921CPI 19 + 18.204	CPI 19	

UCS: مقاومت فشاری تک محوری، CPI 19: شاخص پانچ استوانه‌ای با قطر سنه ۱۹ میلی متری، CPI 16: شاخص پانچ استوانه‌ای با قطر سنه ۱۶ میلی متری، CPI 13: شاخص پانچ استوانه‌ای با قطر سنه ۱۳ میلی متری، CPI 10: شاخص پانچ استوانه‌ای با قطر سنه ۱۰ میلی متری

از ضرایب رگرسیون بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر برآورد شده و درصد‌های خطای محاسبه شده، نمی‌توان به‌عنوان شاخص خوبی برای بررسی کارایی مدل‌های به‌دست‌آمده استفاده نمود. شاخص‌های عملکرد (VAF) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای محاسبه کارایی مدل‌های پیش‌بینی کننده، بسیار مفید هستند که توسط محققان مختلف از جمله *Gokceoglu (2002), Alvarez Grima & Babuska (1999), Finol et al.(2001)* مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۷].

برای ارزیابی کارایی هر معادله رگرسیون، ضریب تعیین (R^2)، شاخص عملکرد (VAF) (رابطه ۳)، انحراف معیار لگاریتمی (β)

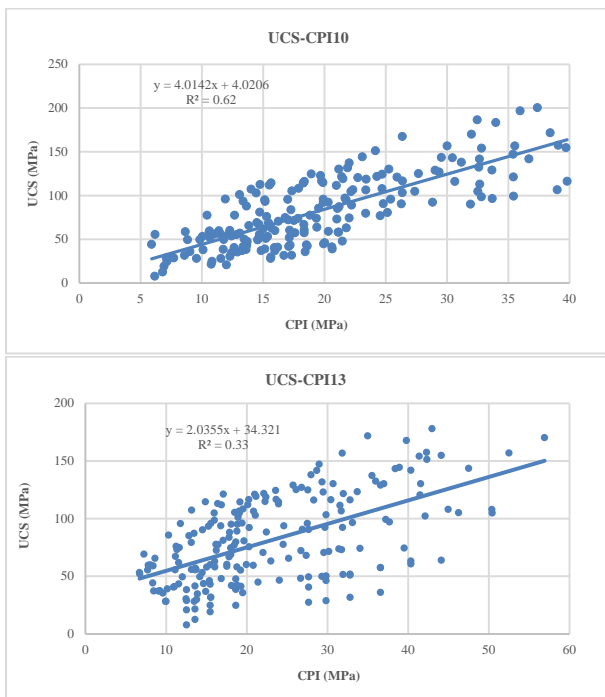


شکل ۸- رابطه بین مقاومت فشاری تک محوری و شاخص پانچ استوانه‌ای با قطرهای سنه ۱۰، ۱۳، ۱۶ و ۱۹ میلی متر در گرینستون

پانچ استوانه‌ای با قطر سنبه ۱۰ میلی‌متر با ضریب تعیین ۰/۸۹ با اختلاف قابل توجه نسبت به سایر آزمایش‌ها بیشترین کارایی را در تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری در سنگ مارن سیلتی از خود نشان می‌دهد.

در سنگ گچ نیز پانچ استوانه‌ای با قطر سنبه ۱۶ میلی‌متر با ضریب تعیین ۰/۹۴ با اختلاف زیاد از بقیه آزمایش‌ها انطباق بیشتری با نتایج مقاومت فشاری تک‌محوری دارد. پانچ استوانه‌ای با قطر سنبه ۱۰ میلی‌متر با ضریب تعیین ۰/۶۴ در رتبه‌ی بعدی است.

نتایج بررسی ضرایب تعیین در کل سنگ‌ها (جدول ۲) نشان می‌دهد که از میان قطرهای مختلف سنبه، پانچ استوانه‌ای قطر سنبه ۱۰ میلی‌متر ضریب تعیین ۰/۶۲ و نیز ضرایب آماری بهتر، نسبت به بقیه قطرهای سنبه مورد بررسی دارای کارایی بیشتری هستند. نمودارهای مربوطه در شکل ۹ ارائه شده است. برای بررسی میزان همبستگی نتایج، اقدام به ترسیم نمودار در محدوده‌های مقاومتی مختلف گردید. در مقاومت فشاری بیشتر از ۱۰۰ مگاپاسکال، همان‌طور که در شکل ۱۰ نمایش داده شده است، پانچ استوانه‌ای با قطر ۱۶ و ۱۹ میلی‌متر با ضریب تعیین ۰/۶۷ دارای بیشترین کارایی برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری می‌باشند.



شکل ۹- رابطه بین مقاومت فشاری تک‌محوری و شاخص پانچ استوانه‌ای (CPI) با قطرهای سنبه ۱۰، ۱۳، ۱۶ و ۱۹ میلی‌متر در کل سنگ‌ها

(رابطه ۴)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE) (رابطه ۵) و جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE$) (رابطه ۶) محاسبه شده است. انحراف معیار لگاریتمی (β) و جذر متوسط مربع خطاها ($RMSE$) برای تخمین اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی شده به وسیله مدل و مقادیر واقعی مشاهده شده استفاده شده است. خطای مطلق متوسط (MAE) کمیتی است که نشان می‌دهد که پیش‌بینی‌ها تا چه حد به خروجی نهایی نزدیک است.

$$VAF = \left(1 - \left(\frac{\text{var}(A_{imeas} - A_{ipred})}{\text{var}(A_{imeas})} \right) \right) \quad (3)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left[\ln \left(\frac{A_{imeas}}{A_{ipred}} \right) \right]^2} \quad (4)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |A_{imeas} - A_{ipred}| \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_{imeas} - A_{ipred})^2} \quad (6)$$

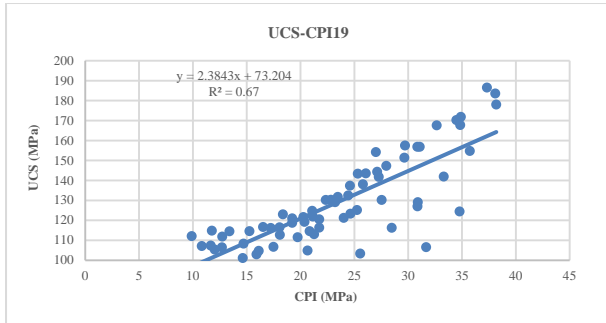
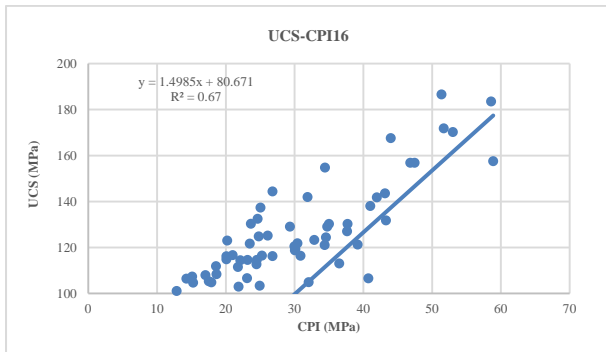
در این روابط A_{imeas} i مین جز محاسبه شده و A_{ipred} i مین جز پیش‌بینی شده و n تعداد داده‌ها است. جدول ۲ ضریب تعیین و معیارهای آماری محاسبه شده، بین نتایج حاصل از رگرسیون‌ها را نشان می‌دهد.

این معیارها برای ارزیابی کارایی مدل‌های ارائه شده محاسبه شده اند. اگر VAF ، ۱۰۰ و $RMSE$ صفر شود، مدل بسیار عالی خواهد بود [۱۸].

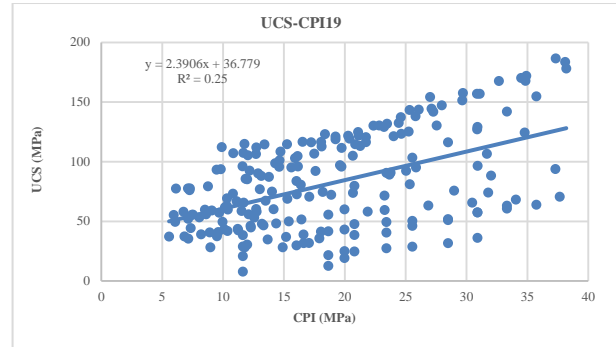
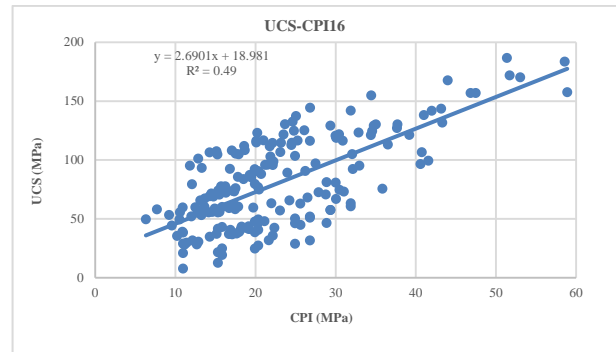
برای ارزیابی اثر قطر سنبه‌ها ابتدا نتایج آنالیز رگرسیونی در انواع مختلف سنگ‌ها به‌طور جداگانه بررسی شد و سپس این نتایج برای داده‌های تمام سنگ‌ها مطالعه شد. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که برای گرینستون، بیشترین ضریب تعیین، برای سنبه‌های با قطرهای ۱۹، ۱۶ به ترتیب برابر با ۰/۸۰، ۰/۷۸ به‌دست آمده است. پانچ استوانه‌ای با قطر ۱۳ با ضریب تعیین ۰/۶۶ و سپس پانچ استوانه‌ای با قطر ۱۹ با ضریب تعیین ۰/۵۳ به ترتیب بیشترین کارایی را برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری در سنگ وکستون - مادستون دارند.

در باندستون پانچ استوانه‌ای با قطر ۱۶ با ضریب تعیین ۰/۷ و سپس پانچ استوانه‌ای با قطر ۱۳ و ۱۶ با ضریب تعیین یکسان ۰/۵۶ به ترتیب کارایی بهتری دارند.

در کالک‌لیتایت نیز همانند گرینستون بزرگ‌ترین ضریب تعیین مربوط به پانچ استوانه‌ای با قطر سنبه ۱۹ (۰/۷) و بعداز آن پانچ استوانه‌ای با قطر سنبه ۱۳ (۰/۶۲) و سپس پانچ استوانه‌ای با قطر سنبه ۱۶ (۰/۶۱) می‌باشند.



شکل ۱۰- رابطه بین مقاومت فشاری تک‌محوری و پانچ استوانه‌ای با قطر سنبه ۱۶ و ۱۹ میلی‌متر در مقاومت فشاری تک‌محوری بیشتر از ۱۰۰ مگاپاسکال



شکل ۹- رابطه بین مقاومت فشاری تک‌محوری و شاخص پانچ استوانه‌ای (CPI) با قطرهای سنبه ۱۰، ۱۳، ۱۶ و ۱۹ میلی‌متر در کل سنگ‌ها

۴- نتیجه‌گیری

از بین قطرهای مختلف سنبه مورد استفاده در این مطالعه سنبه با قطر ۱۰ میلی‌متر، بیشترین ضریب تعیین را دارد و در نتیجه بهترین کارایی را برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری برای کل سنگ‌ها دارا می‌باشد. علاوه بر این، ضرایب آماری محاسبه‌شده نیز کارایی بهتر قطر سنبه ۱۰ میلی‌متر را برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری تأیید می‌نماید.

نتایج مطالعه نشان می‌دهد که شاخص پانچ استوانه‌ای به‌دست‌آمده به موازی بودن سطوح جانبی نمونه‌های آماده‌سازی شده حساسیت کمتری نشان می‌دهد، زیرا شکل بخش پانچ کننده دستگاه آزمایش پانچ استوانه‌ای دایره‌ای است و مساحت قسمت پانچ شده کمتر می‌باشد، لذا تعداد آزمایش‌های غیرقابل قبول در این آزمایش در مقایسه با آزمایش پانچ بلوکی به مراتب کمتر است.

با این که از آزمایش پانچ استوانه‌ای در مطالعات مکانیک سنگ کمتر استفاده می‌شود، اما نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که این آزمایش شاخص قابلیت تخمین غیرمستقیم، سریع، کم‌هزینه و با دقت مناسب مقاومت فشاری تک‌محوری را دارا می‌باشد. استفاده از قطرهای مختلف سنبه برای پانچ در یک سنگ خاص منجر به حصول مقادیر متفاوتی برای شاخص پانچ استوانه‌ای می‌گردد. به بیان دیگر اندازه قطر سنبه بر شاخص پانچ استوانه‌ای تأثیر دارد.

ارزیابی نتایج حاصل از این مطالعه برای نمونه‌های سنگ به‌صورت مجزا نشان داد که از قطرهای مختلف سنبه مورد استفاده در این پژوهش، قطرهای ۱۹ و ۱۶ میلی‌متر هرکدام در دو نوع سنگ و قطرهای ۱۳ و ۱۰ میلی‌متر هرکدام در یک نوع سنگ، دارای بیشترین ضریب تعیین برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری می‌باشند.

همچنین در ارزیابی نتایج برای تمامی سنگ‌ها، مقادیر انحراف معیار محاسبه‌شده برای داده‌های قطر سنبه ۱۰ میلی‌متر، پراکندگی کمتر داده‌های به‌دست‌آمده با این قطر سنبه را نشان می‌دهد.

۵- مراجع

- [11] Mishra, D., & Basu, A. (2012). Use of the block punch test to predict the compressive and tensile strengths of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 51, 119–127.
- [12] Mishra, D., Srigan, M., Basu, A., & Rokade, P. (2015). Soft computing methods for estimating the uniaxial compressive strength of intact rock from index tests. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 80, 418–424.
- [13] Ulusay, R., Gokceoglu, C., & Sulukcu, S. (2001). Draft ISRM suggested method for determining block punch strength index (BPI). *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 38, 1113–1119.
- [14] ISRM. (2007). The complete ISRM suggested methods for rock characterization testing and monitoring: 1974–2006. In: Ulusay Hudson (eds) Suggested methods prepared by the commission on testing methods International Society for Rock Mechanics. Ankara Turkey: ISRM Turkish National Group.
- [15] Dunham, R. (1962). Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In W. Ham, *Classification of Carbonate Rocks* (pp. 108-121). Tulsa: American Association of Petroleum Geologist Memories.
- [۱۶] زمانی، پ.، & حسینی، ح. (۱۳۷۸). نقشه زمین‌شناسی قم ۱:۱۰۰۰۰۰. تهران: سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- [۱۷] کیانپور، م.، سیاری، م.، & ارومیه‌ای، ع. (۱۳۹۱). برآورد مقاومت تراکمی تک‌محوری و مدول تغییر شکل‌پذیری شیل‌های سازند شمشک با استفاده از الگوریتم منطق فازی. *فصلنامه علوم زمین، سال بیست و یکم* (۸۳)، ۱۰۳–۱۱۰.
- [18] Erzin, Y., & Cetin, T. (2012). The use of neural networks for the prediction of the critical factor of safety of an artificial slope subjected to earthquake forces. *Scientia Iranica*, 19(2), 188–194.
- [1] Mishra, D., & Basu, A. (2013). Estimation of uniaxial compressive strength of rock materials by index tests using regression analysis and fuzzy inference system. *Eng Geol*, 60, 54–68.
- [2] Shrier van der, J. (1988). The block punch index test. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 38(1), 121-126.
- [3] Sulukcu, S., & Ulusay, R. (2001). Evaluation of the block punch index test with particular reference to the size effect, failure mechanism and its effectiveness in predicting rock strength. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.*, 38, 1091–1111.
- [4] Ulusay, R., & Gokceoglu, C. (1997). The modified block punch index test. *Can. Geotech. J.*, 34, 991-1001.
- [5] Khanlari, G.R., Heidari, M., Sepahigero, A.A., & Fereidooni, D. (2014). Quantification of strength anisotropy of metamorphic rocks of the Hamedan province, Iran, as determined from cylindrical punch, point load and Brazilian tests. *Engineering Geology*, 80–90.
- [۶] نیکودل، م.، & باغبانیان، ع. (۱۳۸۰). کاربرد دستگاه پانچ برای تعیین خصوصیات مقاومتی سنگهای ناهمسانگرد. *مجموعه مقالات اولین کنفرانس مکانیک سنگ ایران* (ص. ۱۳۷–۱۴۱). تهران: دانشگاه تربیت مدرس.
- [۷] احمدی، م. (۱۳۸۳). بررسی تعیین مقاومت تک‌محوری سنگ آهک با استفاده از دستگاه پانچ. *مجموعه مقالات دومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران* (ص. ۴۲۹–۴۳۹). تهران: دانشگاه تربیت مدرس.
- [۸] جعفری، ا.، نیکودل، م.، & احمدی، م. (۱۳۸۹). ارزیابی ویژگی‌های مقاومتی سنگها با استفاده از نتایج آزمایش پانچ بلوکی و پانچ استوانه‌ای. *مجله علوم دانشگاه تهران*، ۳۶، ۱۶۹–۱۸۳.
- [۹] حسینی، م.، علی پنهانی، ب.، & سنماری، س. (۱۳۹۱). تخمین خصوصیات مهندسی سنگ مارن با استفاده از آزمایش پانچ. *زمین شناسی کاربردی، سال ۸* (۴)، ۳۰۹–۳۲۲.
- [10] Karakul, H., Ulusay, R., & Isik, N. (2010). Empirical models and numerical analysis for assessing strength anisotropy based on block punch index and uniaxial compression tests. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 47, 657–665.