



Imam Khomeini International University
Vol. 8, No. 2, Summer 2023



نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

Research Paper

Using the Core Strangle Test for Determining Uniaxial Compressive Strength of Intact Rock by an Indirect Method

Gholamnejad J.^{1*}, Rastegar M.²

1- Associate Professor, Dept. of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran
2- M.Sc., Dept. of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

Received: 19 Apr. 2022

Accepted: 11 Jul. 2022

Abstract: Uniaxial Compressive Strength (UCS) of rock material is one of the most important and effective parameters in geotechnical and mining projects. Direct evaluation of UCS is expensive and time-consuming, therefore indirect tests such as point load, Schmidt hammer and sound wave velocity tests have been developed, among which the point load test is very commonly used, simple and economic. However, this method has limitations such as the effect of loading direction, the application of load to a small part of the rock and the high dependency of the results on the dimensions of the sample. In 2009, the Core Strangle Test (CST) was developed, which has the advantage of applying load through a circle perpendicular to the core axis. In this paper, the results of designing and manufacturing a CST machine, which has been performed for the first time in Iran, are described in order to estimate the UCS of rocks with high accuracy and low cost. The design and construction of the machine were done in the rock mechanics laboratory of Yazd University. In order to calibrate the machine, 70 standard rock and concrete samples with lengths of 20, 10 and 5 cm and a diameter of 54 mm were prepared. In addition to CST, point load and direct UCS tests were performed on these 70 specimens. Then, the relationship between UCS obtained by direct, CST and point load methods was investigated. Calculations showed that the relationship between UCS and machine oil pressure at the moment of failure in the CST method is a linear relationship with a correlation coefficient of 0.78 and the relationship between UCS and point load index is also linear with a correlation coefficient of 0.63.

Keywords: Rock mechanics, Uniaxial compressive strength, Point load test, Core, Core strangle test.

How to cite this article

Gholamnejad, J., and Rastegar, M. (2023). "Using the Core Strangle Test for determining uniaxial compressive strength of intact rock by an indirect method". Journal of Mineral Resources Engineering, 8(2): 99-111.

DOI: [10.30479/JMRE.2022.17136.1585](https://doi.org/10.30479/JMRE.2022.17136.1585)

*Corresponding Author Email: j.gholamnejad@yazd.ac.ir

COPYRIGHTS



©2023 by the authors. Published by Imam Khomeini International University.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

INTRODUCTION

The strength of intact rocks is the most important parameter in rock mechanics studies. The existing methods for determining UCS are divided into two categories: direct and indirect methods. In direct methods, cylindrical samples having a height to diameter ratio of 2.5–3.0 and a diameter of preferably 45 mm are needed. The ends of the samples must be flat to 0.02 mm. In many cases, core specimens with these dimensions cannot be obtained due to the rock mass properties. For this reason, many indirect testing methods, such as point load, Schmidt hammer, sonic velocity, shore test, etc., have been proposed. In most indirect tests, the force is applied by the device in a very small area of the rock sample, which leads to errors in the estimation of UCS. In order to overcome this shortcoming, the Core Strangle Test (CST) method and apparatus has been developed by Yilmaz in 2009 [1]. In this test, the rock is loaded through as a circle line instead of a point consequently, the effect of the heterogeneity and/or anisotropy is decreased. In this article, the results of the design, construction and calibration of the CST device are explained using rock samples from different parts of Iran as well as concrete samples. In addition, the accuracy of the method in measuring the UCS of rock and concrete is investigated by this method.

METHODS

The CST testing machine consists of four main parts [1] (Figure 1):

- Hydraulic unit: the pressure required to load the specimen produces by a gear pump
- Load measuring gauge
- Load transfer unit
- Loading unit

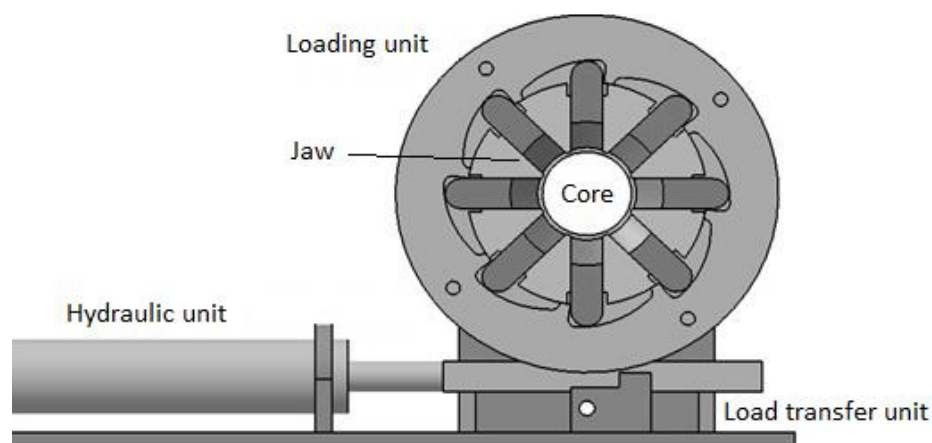


Figure 1. A view of the main components of the CST device

A rock sample in the form of an NX core having a length of 25 mm or more is placed inside the testing machine between the jaws. As the load increases, the jaws move towards the sample and the load is applied through a circle perpendicular to the core axis. When the specimen is broken into two parts, the load (PF) is recorded. There is a strong relationship between breakage load and UCS [1,2].

FINDINGS AND ARGUMENT

In this section, in order to calibrate the device and also compare the results of this method with the point load test, 70 NX samples including rock and concrete samples were prepared. Direct uniaxial compressive strength, point load and CST were performed on all samples. The relationship between the pressure at the moment of failure (PF) in terms of the bar and the UCS of the specimens in terms of MPa is shown in Figure 2.

This relationship is given as follows:

$$UCS = 0.92 \times PF - 54 \quad (R^2 = 0.78) \quad (1)$$

Also, in order to compare the results CST with the point load test, the relationship between UCS and point load index was also investigated, the results of which are shown in Figure 3.

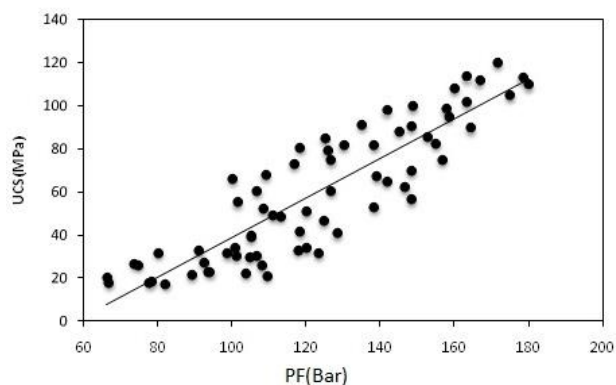


Figure 2. The relationship between the pressure at the moment of failure (PF) and the UCS

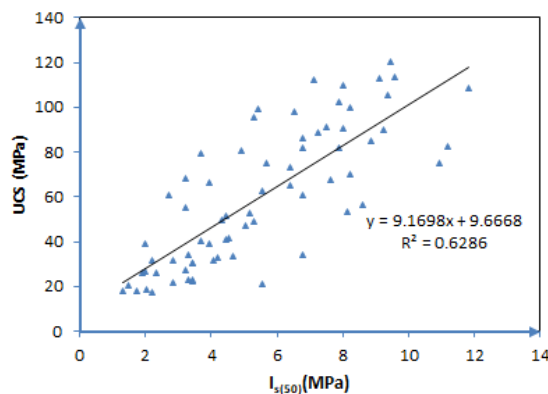


Figure 3. The relationship between UCS and point load index

The comparison of the results shows that the correlation between the results in the CST test is higher than the correlation in the point load test.

CONCLUSIONS

In this article, the details of the CST were explained as an indirect method for determining the UCS of rock material. In this test, the load is applied radially and vertically along the core and on its circumference. By increasing the load, the sample is broken into two parts and using the pressure value at the moment of failure, it is possible to obtain the uniaxial compressive strength of the rock material with a high correlation coefficient. The comparison of the results obtained from this test with the point loading test indicated that the correlation coefficient in this test is higher than the point loading test. Conducting this test on cores with lengths of 20, 10 and 5 cm showed that the effect of the length of the samples on the test results is very small and negligible. Also, the conditions at the beginning and end of the samples have no effect on the results of this test. In addition, this test can be performed on cores with different diameters and not necessarily 54 mm, in which case it is necessary to apply the diameter correction factor.

REFERENCES

- [1] Yilmaz, I. (2009). "A new testing method for indirect determination of the unconfined compressive strength of rocks". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 46: 1349-1357.
- [2] Yilmaz, I., and Yucel, Ö. (2014). "Use of the core strangle test for determining strength anisotropy of rocks". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 66: 57-63.



استفاده از آزمون فشردگی شعاعی مغزه برای تعیین مقاومت فشاری تک محوره سنگ بکر به روش غیر مستقیم

جواد غلام نژاد^{۱*}، مرتضی رستگار^۲

۱- دانشیار، گروه استخراج معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد

۲- کارشناسی ارشد، گروه استخراج معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۰

دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۳۰

چکیده

مقاومت فشاری تک محوره ماده سنگ یکی از پارامترهای مهم و تاثیرگذار در پروژه‌های ژئوتکنیکی و معدنکاری است. با توجه به زمان‌بر بودن و پرهزینه بودن آزمایش مقاومت فشاری مستقیم، آزمایش‌های غیرمستقیمی مانند بارگذاری نقطه‌ای، چکش اشمیت و سرعت امواج صوتی ابداع شده که در این میان آزمایش بارگذاری نقطه‌ای خیلی پرکاربرد، ساده و اقتصادی است، اما این روش نیز محدودیت‌هایی مانند تاثیر جهت بارگذاری در نتیجه اعمال بار به بخش کوچکی از سنگ و وابستگی زیاد نتایج به ابعاد نمونه دارد. در سال ۲۰۰۹ میلادی آزمایش فشردگی شعاعی مغزه (CST) ابداع شد که مزیت این آزمایش، اعمال بار به صورت شعاعی به مغزه روی دایره‌ای عمود بر محور آن است. در این مقاله نتایج طراحی و ساخت دستگاه آزمایش فشردگی شعاعی که در ایران برای اولین بار انجام شده، تشریح شده است تا بتوان با آن مقاومت فشاری تک محوری سنگ‌ها را با دقت بالا و هزینه کمتر تخمین زد. طراحی و ساخت دستگاه در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه یزد انجام شد. برای کالیبراسیون دستگاه، ۷۰ نمونه استاندارد سنگی و بتنی به طول‌های ۲۰، ۱۰ و ۵ سانتیمتر و قطر ۵۴٫۷ میلی‌متر آماده‌سازی شد. علاوه بر CST، آزمایش بارگذاری نقطه‌ای و مقاومت فشاری تک محوری بر روی این ۷۰ نمونه انجام و سپس ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوره به دست آمده از روش مستقیم با روش CST و همچنین بار نقطه‌ای بررسی شد. محاسبات نشان داد که ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوره و فشار روغن در لحظه شکست در روش CST یک ارتباط خطی با ضریب همبستگی ۰٫۷۸ و ارتباط خطی بین مقاومت فشاری تک محوره و شاخص بار نقطه‌ای با ضریب همبستگی ۰٫۶۳ است. ضمناً نتایج به دست آمده در روش CST حساسیتی به سطوح دو انتهای نمونه و طول نمونه ندارد.

کلمات کلیدی

مکانیک سنگ، مقاومت فشاری تک محوره، آزمایش بار نقطه‌ای، مغزه، آزمایش فشردگی شعاعی.

استناد به این مقاله

غلام نژاد، ج.، رستگار، م.؛ ۱۴۰۲؛ "استفاده از آزمون فشردگی شعاعی مغزه برای تعیین مقاومت فشاری تک محوره سنگ بکر به روش غیر مستقیم". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره هشتم، شماره ۲، ص ۹۹-۱۱۱.

DOI: 10.30479/JMRE.2022.17136.1585



۱- مقدمه

مهندسی استفاده شده است. وارد شدن بار به صورت نقطه‌ای به نمونه سنگ و همچنین ناهمگنی و ناهمسانگردی نمونه‌های سنگی دلیل اصلی پایین بودن دقت این آزمایش است. از طرف دیگر ضریب تبدیل شاخص بار نقطه‌ای به مقاومت فشاری تک محوره به نوع سنگ بستگی داشته به طوری که لوک و گریفیث پیشنهاد کردند که در تعیین مقاومت فشاری تک محوره با استفاده از نتایج این آزمایش باید تجربه و قضاوت مهندسی دخیل شود [۳]. به عنوان مثال در منابع و مراجع مختلف مقدار این ضریب تبدیل برای سنگ‌های رسوبی بین ۸ تا ۳۰ ذکر شده است [۴]. در نتیجه اگر بتوان آزمایشی ابداع کرد که بار وارده به نمونه به سطح بیشتری از سنگ وارد شود می‌توان تاثیر ناهمگنی و ناهمسانگردی را به حداقل رساند. در سال ۲۰۰۹ در ترکیه آزمایشی توسط ییلماز تحت عنوان CST^۱ ابداع شده که هدف از طراحی آن، برطرف کردن مشکلات آزمایش مقاومت بار نقطه‌ای بوده است [۵]. سپس ییلماز و یوسل از همین دستگاه برای تعیین مقاومت سنگ‌های ناهمسانگرد استفاده کردند [۶].

در این روش، برای به حداقل رساندن اثر ناهمگنی و ناهمسانگردی بر روی نتیجه آزمایش، بارگذاری بر روی مغزه سنگی به جای نقطه بر روی خطی منطبق بر محیط مغزه و عمود بر امتداد آن انجام می‌گیرد. نتایج تحقیقات ییلماز نشان داد که تخمین مقاومت فشاری تک محوره با استفاده از CST نسبت به آزمایش بار نقطه‌ای دقت بیشتری دارد. در این مقاله نتایج طراحی، ساخت و کالیبراسیون دستگاه CST با استفاده از نمونه سنگ‌های نقاط مختلف ایران و همچنین نمونه‌های بتنی تهیه شده، تشریح می‌شود. ضمناً دقت روش در اندازه‌گیری مقاومت فشاری تک محوری ماده سنگ و بتن به وسیله این روش بررسی می‌شود.

۲- روش CST در تعیین مقاومت فشاری تک محوره

۲-۱- اصول روش CST

همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد یکی از مشکلات آزمایش بار نقطه‌ای وارد شدن بار به وسیله دستگاه به بخش کوچکی از سنگ است. برای حل این مشکل در این آزمایش، بار به صورت شعاعی و خطی بر روی دایره‌ای که عمود بر محور مغزه‌ای با طول بزرگتر از ۲۵ میلی‌متر است، وارد می‌شود (شکل ۱). لازم به ذکر است که قطر نمونه ممکن است ۵۴ میلی‌متر، بیشتر یا کمتر باشد. بار شعاعی بر روی نمونه به تدریج افزایش یافته تا

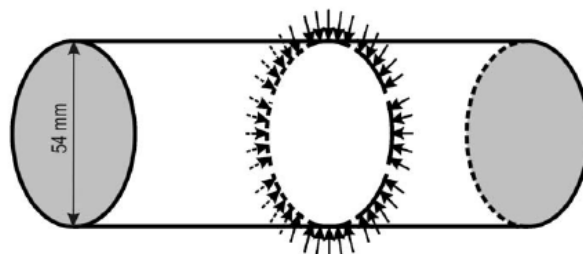
سرعت در پیشرفت احداث سازه‌های سنگی از جمله تونل‌ها، سدها، پل‌ها، نیروگاه‌های زیرزمینی و نظایر آن باعث شده که طراحان این سازه‌ها به فکر ابداع روش‌های سریع تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی توده سنگ باشند. مقاومت فشاری تک محوره ماده سنگ (UCS) را می‌توان به عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای مکانیک سنگی و از جمله مهم‌ترین و موثرترین ورودی اولیه برای طبقه‌بندی و تعیین خواص توده سنگ در تحلیل‌های مکانیک سنگی به شمار آورد. روش‌های اندازه‌گیری مقاومت فشاری تک محوری را می‌توان به دو دسته روش‌های مستقیم و غیرمستقیم (یا روش‌های شاخص) تقسیم‌بندی کرد. مسلماً دقت اندازه‌گیری این پارامتر با استفاده از روش مستقیم، بیشتر از آزمایش‌های شاخص است، اما مشکلات مربوط به انجام آزمایش مستقیم گاه استفاده از این روش را محدود می‌سازد که از آن جمله عبارتند از [۲، ۱]:

- وقت‌گیر بودن آزمایش مستقیم و نیاز به دقت بالا در تهیه نمونه‌های استاندارد با قطر ۵۴ میلی‌متر و نسبت طول به قطر بین ۲٫۵ تا ۳ و تسطیح دو انتهای آن با دقت ۰٫۰۲ میلی‌متر. تهیه این نمونه‌ها در برخی سنگ‌های ضعیف، هوازده و درزه و ترک‌دار بسیار مشکل و در بعضی موارد غیرممکن است.

- هزینه‌بر بودن و نیاز به دستگاه‌های دقیق و گران‌قیمت
- نیاز به محیط آزمایشگاهی و شرایط کنترل شده حین آزمایش

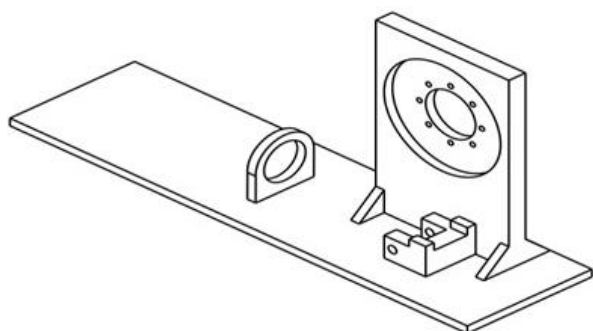
با توجه به مشکلات انجام آزمایش مستقیم، استفاده از روش‌های شاخص برای تخمین مقاومت فشاری تک محوره سنگ، روزبه‌روز در حال افزایش است. تا به حال چندین آزمایش شاخص مانند آزمایش مقاومت بار نقطه‌ای، آزمایش پانچ بلوک‌های سنگی، آزمایش چکش اشمیت و استفاده از سرعت امواج صوتی بدین منظور طراحی شده است که از میان این روش‌ها، روش مقاومت بار نقطه‌ای در میان مهندسی ژئوتکنیک به ویژه در مواردی که مقاومت فشاری ماده سنگ بزرگتر از ۱۵ مگاپاسکال باشد، کاربرد زیادی دارد [۱]. هرچند استفاده از این آزمایش شاخص، مزایای زیادی از جمله سرعت در تخمین مقاومت، پایین بودن هزینه‌ها و سادگی آزمایش را به دنبال دارد [۲]، اما دقت تخمین پارامترهای مقاومتی با استفاده از این آزمایش بالا نیست، به طوری که از این آزمایش صرفاً برای طبقه‌بندی ماده سنگ و نه طراحی یا تجزیه و تحلیل

نمونه به دو قسمت تقسیم شود.



شکل ۱: نحوه وارد شدن بار خطی شعاعی به مغزه در روش CST [۵]

برگیرنده دستگاه است. وظیفه اصلی قسمت شاسی دستگاه، نگهداری قطعات و بخش‌های اصلی دستگاه از جمله پمپ، جک، کَلگی و مخزن روغن دستگاه است. برای سهولت در باز و بسته کردن قطعات، کلیه قطعات یاد شده با استفاده از اتصال پیچ و مهره بر روی شاسی نصب می‌شوند. در شکل ۳ نمای کلی از نقشه طراحی شده شاسی دستگاه آورده شده است. نقش اساسی قاب فولادی در برگیرنده دستگاه، نگهداری و محافظت از بخش‌های حساس دستگاه مانند موتور و پمپ، کلیدها و کنتاکتور هادی برق و همچنین شیلنگ‌های انتقال روغن در برابر ضربه و گرد و غبار است. نقش دیگر این بخش، تشکیل تر کردن دستگاه و همچنین مکانی برای نصب اجزای جانبی آن است (شکل ۴).



شکل ۳: شاسی طراحی شده برای نصب قطعات دستگاه CST

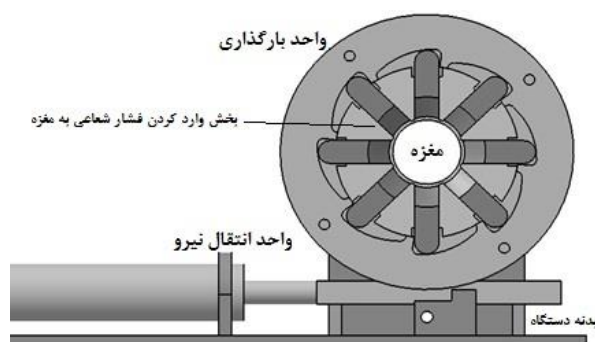


شکل ۴: دستگاه ساخته شده نهایی قرار گرفته در قاب فولادی

از تقسیم بار وارده به مغزه در لحظه شکست به محیط مغزه شاخص فشردگی شعاعی مغزه (CSI) به دست می‌آید. این شاخص ارتباط خطی با ضریب همبستگی بالا با مقاومت فشاری تک محوره دارد.

۲-۲- اجزای دستگاه

اگر چه دستگاه CST قبلاً در ترکیه ساخته شده است، اما به دلیل عدم وجود مقیاس در شکل‌های منتشر شده از آن و ناشناخته بودن جنس مواد مورد استفاده، کلیه طراحی‌ها مجدداً و با دقت بالای مهندسی انجام گرفته است. این دستگاه از چهار بخش بدنه، بخش اعمال فشار هیدرولیکی، بخش انتقال فشار خطی به نمونه و در نهایت قسمت برق دستگاه تشکیل شده است (شکل ۲). در ادامه بخش‌های مختلف دستگاه به تفصیل تشریح می‌شود.



شکل ۲: نمایی از اجزای اصلی دستگاه CST

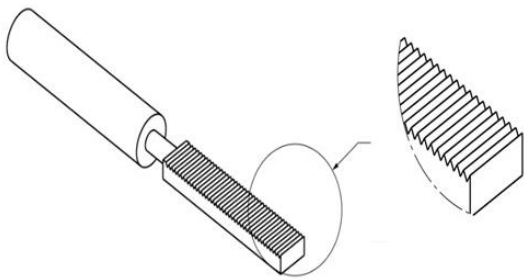
۲-۲-۲- بخش اعمال فشار هیدرولیکی

این بخش شامل چهار جزء پمپ هیدرولیکی، جک هیدرولیکی، چرخ و شانه و فشارسنج هیدرولیکی است.

۲-۲-۱- بدنه دستگاه

بدنه دستگاه شامل دو بخش شاسی و قاب فولادی در

با دقت زیاد و به صورت کاملاً یکنواخت حرکت خطی را به حرکت دورانی تبدیل می‌کند. در این دستگاه پس از طراحی شانه و ساخت آن، با استفاده از اتصال پیچی، شانه یاد شده در انتهای میله پیستون نصب شده و پس از درگیر شدن با چرخ‌دنده‌های طراحی شده بر محیط خارجی کلگی، باعث حرکت دورانی آن می‌شود. در شکل ۵ نمایی از شانه طراحی شده متصل به جک آورده شده است.



شکل ۵: شانه طراحی شده برای انتقال نیروی جک به کلگی دستگاه

برای ثبت فشار اعمال شده به وسیله پمپ از یک فشارسنج هیدرولیکی معمولی استفاده شده است. جریان روغن پر فشار حاصل از پمپ هیدرولیکی به وسیله شیلنگ‌های فشار قوی به سیلندر جک هیدرولیکی وارد می‌شود. در مسیر این شیلنگ‌ها با استفاده از یک سه راهی، مقداری از جریان وارد فشارسنج هیدرولیکی شده و فشار روغن اعمالی بدین ترتیب اندازه‌گیری می‌شود. ظرفیت فشارسنج مورد استفاده در این دستگاه، ۲۵۰ بار یا ۲۵ مگاپاسکال است.

۲-۲-۳- انتقال فشار خطی به نمونه‌ها

این بخش از دستگاه که بخش اصلی طراحی شده است، نقش ایجاد مکانیزم شکست نمونه سنگی یا بتنی به وسیله تیغه‌های طراحی شده را بر عهده دارد. برای ایجاد این مکانیزم، همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود، ابتدا دنده شانه‌ای به وسیله جک به سمت عقب کشیده می‌شود. در اثر حرکت چرخ و شانه، دندانه‌های ایجاد شده بر روی سطح بیرونی کلگی دستگاه، موجب چرخش کلگی می‌شوند. در اثر حرکت دورانی کلگی دستگاه، تیغه‌های طراحی شده برای اعمال فشار به نمونه شروع به حرکت خطی و نزدیک شدن به نمونه می‌کنند و در نهایت با اعمال فشار به نمونه باعث شکست آن می‌شوند.

برای ایجاد نیروی هیدرولیکی اولیه در دستگاه از یک پمپ دنده‌ای^۳ استفاده شد. پمپ‌های دنده‌ای میزان خروجی کمی داشته که با دقت بالا قابل کنترل است.

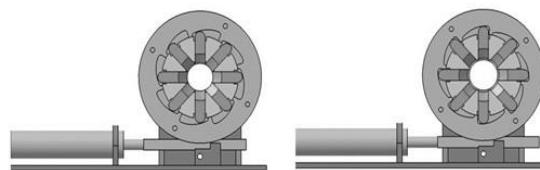
همچنین با افزایش فشار روغن، میزان خروجی پمپ کاهش نمی‌یابد [۷]. این موارد باعث می‌شود که فشار روغن و در نتیجه سرعت دوران کلگی دستگاه و به تبع آن سرعت حرکت خطی تیغه‌ها در طول آزمایش کاملاً یکنواخت شود. برای اطمینان بیشتر از یکنواختی سرعت حرکت پیشروی جک طی آزمایش، در مسیر جریان هیدرولیکی سیستم، یک شیر کنترل جریان قرار گرفت. همچنین برای اطمینان از بالا نرفتن بیش از حد فشار سیال در مسیر حرکت روغن، یک شیر فشارشکن نیز در مسیر تعبیه شد. استفاده از شیر فشارشکن این امکان را به کاربر می‌دهد که میزان فشار وارد شده به نمونه‌ها را به صورت دستی کنترل کند و با این وجود، قرائت میزان فشار اعمالی به وسیله فشارسنج آسان‌تر می‌شود [۵].

برای تولید نیروی محرکه لازم برای گرداندن چرخ‌دنده‌های پمپ یاد شده از یک موتور الکتریکی تک فاز با توان دو اسب بخار استفاده شده است. جک هیدرولیکی در واقع یک تحریک‌کننده هیدرولیکی است که نیروی حاصل از فشار سیال هیدرولیک را به نیروی محوری تبدیل می‌کند. این نیرو به دو صورت فشاری و یا کششی به وسیله جک به محل مورد نظر اعمال می‌شود.

محفظه سیلندر و میله پیستون جک‌ها از فولاد آلیاژی با استحکام بالا و با دقت زیاد به وسیله فرآیند ماشین‌کاری تولید می‌شود [۸]. جک مورد استفاده در این دستگاه از نوع جک دو طرفه استاندارد است. برای ایجاد حرکت می‌توان از دو حالت کششی و یا فشاری استفاده کرد. در حالت فشاری میله پیستون به سمت جلو فشرده می‌شود، اما در حالت کششی میله پیستون با جریان سیال به سمت عقب کشیده می‌شود. مزیت جریان فشاری، بالاتر بردن نیروی قابل اعمال است، زیرا سطح مقطع اعمال فشار بیشتر است، اما در صورت استفاده از حالت کششی امکان کم‌انرژی محور یا میله پیستون در اثر نیروی فشاری و ایجاد خطای حاصل از کم‌انرژی از بین می‌رود. با توجه به اهمیت بالای کاهش خطاها در طراحی این مکانیزم از روش کششی در اعمال فشار به جک حین انجام آزمایش و برای جبران نیروی کاهش‌یافته از یک جک با سطح مقطع بزرگ‌تر استفاده شد.

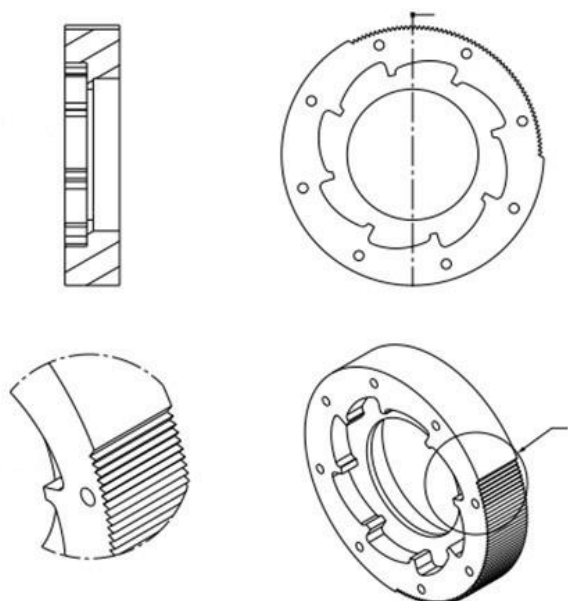
برای انتقال حرکت پیستون به کلگی و ایجاد دوران کلگی از یک مکانیزم چرخ و شانه استفاده شد. مکانیزم چرخ و شانه

طراحی مسیر بیضی گون با دقت بالایی انجام و سپس به وسیله ماشین ابزار مخصوص با دقت یک صدم میلی متر ایجاد شده است. در صورتی که هر یک از شش مسیر طراحی شده برای حرکت تیغه‌ها بر روی کنگی نسبت به یکدیگر و یا نسبت به مرکز اختلافی داشته باشد، موجب حرکت غیرهمزمان تیغه‌ها شده که نتیجه آن اعمال نیرو به صورت غیرهمگن به نمونه و ایجاد خطا در انجام آزمایش می‌شود.



شکل ۶: نمایی کلی از حالت باز و بسته شدن کامل تیغه‌ها

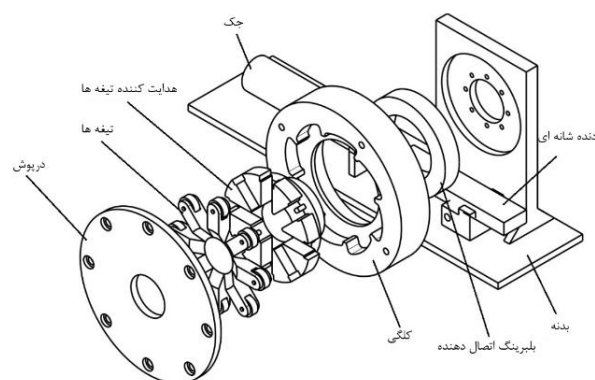
مسیر ایجاد شده بر روی کنگی دستگاه برای ایجاد حرکت تیغه‌ها در راستای شعاع، بخشی از یک بیضی است که اختلاف شعاع در آن ۶ میلی متر است. این اختلاف شعاع باعث می‌شود که تیغه‌ها در اثر دوران کنگی به آرامی و با حرکتی یکنواخت به نمونه نزدیک شده و بار به صورت تدریجی به مغزه اعمال شود. شکل ۷ نمای کلی از بخش شاسی و انتقال فشار خطی بر روی نمونه را نشان می‌دهد.



شکل ۸: نمای کلی و دید از روبه‌روی کنگی دستگاه

بخش هدایت‌کننده تیغه‌ها نقش تکیه‌گاهی برای هشت تیغه طراحی شده و همچنین راهنمای مسیر و هدایت‌کننده تیغه‌ها را بر عهده دارد. دقت در طراحی این بخش بسیار بالا بوده، به گونه‌ای که اگر مسیر حرکت تیغه‌ها، عرضی مناسب نداشته باشد، یا باعث لقی تیغه‌ها شده که در پی آن ایجاد نیروی تکیه‌گاهی و شکستن تیغه‌ها را به دنبال دارد و یا باعث حرکت سخت تیغه‌ها شده که خود ایجاد نوعی خطا در اندازه‌گیری نیروی اعمالی است. در شکل ۹ نمایی از بخش هدایت‌کننده تیغه‌ها نشان داده شده است. این بخش از دستگاه در طول انجام آزمایش ثابت بوده و پس از فرو رفتن بخشی از آن در داخل بلبرینگ، با استفاده از هشت پیچ مناسب، به شاسی دستگاه وصل می‌شود.

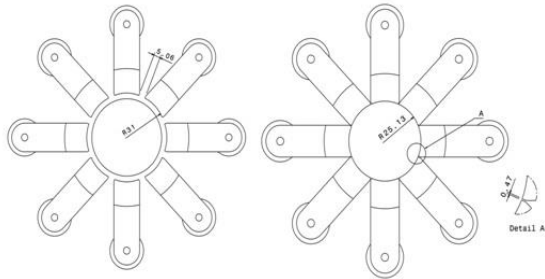
طراحی و ساخت تیغه‌های فولادی دستگاه، مهم‌ترین بخش ساخت آن محسوب می‌شود. انتخاب جنس تیغه‌ها،



شکل ۷: بخش شاسی و انتقال فشار خطی بر روی نمونه‌ها

در دستگاه طراحی شده برای بهبود حرکت دورانی کنگی از بلبرینگ بین شاسی دستگاه و کنگی استفاده شده است. کنگی دستگاه برای ایجاد مکانیزمی برای حرکت یکنواخت و آرام هشت تیغه طراحی شده بر روی نمونه‌های مورد آزمایش است. برای طراحی این بخش، از ماریپیچ ارشمیدس مورد استفاده در سه نظام‌های مهندسی الهام گرفته شده است. همان‌طور که در ابتدای این بخش بیان شد، مسیر ایجاد شده بر روی کنگی دستگاه برای ایجاد حرکت تیغه‌ها در راستای شعاع در واقع بخشی از یک بیضی است که اختلاف شعاع در آن ۶ میلی متر است. در شکل ۸ نمایی از کنگی طراحی شده آورده شده است. حرکت نرم و یکنواخت تیغه‌ها اهمیت زیادی در صحت و دقت نتایج حاصل از CST دارد و به همین دلیل

بلبرینگ طراحی شده در ته هر تیغه برای اعمال نیروی عمود بر تیغه‌ها در اثر تماس تیغه‌ها با دیواره مارپیچ ارشمیدس و همچنین نرمی و روانی حرکت رو به جلو تیغه‌ها است. در شکل ۱۱ نمایی از حالت کاملا باز و همچنین کامل بسته هر هشت تیغه آورده شده است.



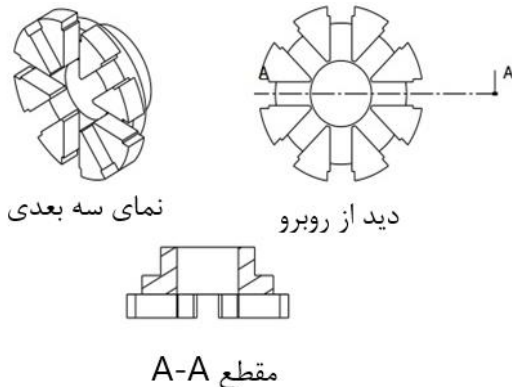
شکل ۱۱: نمایی از دو حالت کاملا باز و همچنین کامل بسته هر هشت تیغه دستگاه

این دستگاه برای انجام آزمایش بر روی نمونه‌های با قطر ۵۴ میلی‌متر طراحی شده است و حداکثر قطر ایجاد شده در اثر باز شدن تیغه‌ها ۶۲ میلی‌متر و حداقل قطر ایجاد شده حین بسته شدن تیغه‌ها ۵۰ میلی‌متر است.

پس از قرار دادن بخش خارجی بلبرینگ‌ها در کلگی، وارد کردن قطعه راهنما در کلگی و جا زدن بر روی بخش داخلی بلبرینگ و همچنین قرار دادن تک‌تک تیغه‌ها بر روی قطعه راهنما، با استفاده از درپوشی دیسکی شکل به کمک هشت پیچ مناسب، درب کلگی بسته می‌شود. یکی از وظایف درپوش، محدود کردن حرکت تیغه‌ها و جلوگیری از بیرون آمدن تیغه‌ها است. پس از بستن درپوش فولادی، کلگی دستگاه آماده نصب بر روی شاسی دستگاه است. در شکل ۱۲ نمایی کلی از قرار گرفتن کلگی بر روی شاسی دستگاه آورده شده است. دستگاه طوری طراحی شده که نمونه به صورت افقی وارد آن شود. با وارد کردن نمونه به صورت افقی در دستگاه، پس از شکست نمونه، خرده‌سنگ‌های حاصل از شکست از بین درزهای تیغه‌ها وارد دستگاه شده و مشکلات زیادی را برای قطعات دستگاه ایجاد می‌کند.

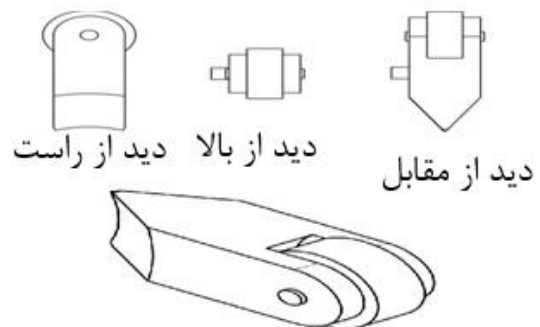
تدبیر اندیشیده شده برای این مساله، افقی کردن کل دستگاه بوده و با انجام این عمل، خرده‌سنگ‌های حاصل از شکست نمونه که به صورت عمودی وارد دستگاه می‌شود به زیر دستگاه و در محفظه طراحی شده می‌ریزد.

طراحی، ماشین‌کاری و ساخت آن‌ها و همچنین عملیات حرارتی و آبکاری پس از آماده شدن تیغه، هر کدام به نوبه خود مشکلات زیادی را در پی داشته است. برای این دستگاه، هشت تیغه فولادی از جنس فولاد خاص در نظر گرفته شده که شکل نهایی تیغه‌ها به صورت گوه‌ای بوده و انحنای لبه آن‌ها برای بارگذاری بر روی نمونه با قطر استاندارد ۵۴ میلی‌متر طراحی شده است.



شکل ۹: نماهای مختلف از بخش هدایت‌کننده تیغه‌ها در دستگاه

در طراحی تیغه‌ها حرکت یکنواخت و هم زمان ۸ تیغه و اعمال فشار یکسان اهمیت بالایی داشته و باید به دقت انجام شود. از سویی دیگر حین درگیری تیغه‌ها با نمونه باید درگیری به صورت خطی باشد. برای ایجاد درگیری خطی بین سطح نمونه و لبه فشار تیغه، سطح لبه به صورت شعاعی و با شعاعی کمی بیشتر از شعاع نمونه (۳۰ میلی‌متر) ایجاد شد. در شکل ۱۰ نمایی از یک تیغه طراحی شده کامل آورده شده است.



شکل ۱۰: نماهایی متفاوت از تیغه طراحی شده برای شکست نمونه‌ها

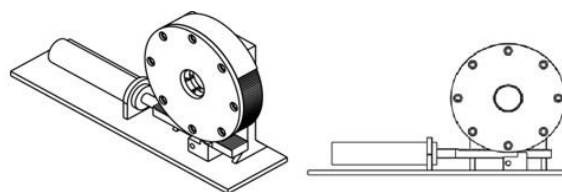
تیغه‌ها می‌شود.

۲-۳- انتخاب جنس قطعات و اجزا

برای ساخت بدنه دستگاه که شامل شاسی و قاب در برگیرنده دستگاه است از فولاد ساختمانی استفاده شده است. دلیل استفاده از این فولاد این است که نیروهای اعمالی به این قطعات بزرگ نبوده و نقش اکثر این قطعات نگهداشتن اجزای دستگاه است. برای ساخت کلگی و بخش هدایت‌کننده تیغه‌ها از فولاد کربنی استفاده شد. عملیات حرارتی بر روی کلیه قطعات ساخته شده از فولاد کربنی، پس از ماشین‌کاری و ساخت انجام شد تا استحکام و مقاومت سایشی آن افزایش یابد. دلیل انجام عملیات حرارتی، در معرض سایش بودن قطعات یاد شده است. برای ساخت تیغه‌ها از فولاد ابزار سرد کار استفاده شد و به دلیل آنکه لبه تیغه تحت فشار و سایش بالایی قرار دارد از فولاد کروم‌دار ساخته شده تا حداکثر خواص ضدسایشی حاصل شود. پس از ساخت تیغه‌ها، فرآیند سخت‌کاری برای افزایش استحکام و سختی انجام شد.

۳- استفاده از روش CST در تعیین مقاومت فشاری تک محوره

در این بخش برای کالیبراسیون دستگاه و همچنین مقایسه نتایج این روش با آزمایش بار نقطه‌ای، ۷۰ نمونه شامل نمونه‌های سنگی و بتنی تهیه شد. ۵۵ نمونه سنگی از انواع مختلف سنگ‌های رسوبی (۱۹ نمونه شامل ۷ نمونه سنگ آهک، ۶ نمونه ماسه‌سنگ و ۶ نمونه کنگلومرای درشت دانه)، آذرین (۲۱ نمونه شامل ۷ نمونه گرانیت، ۷ نمونه دیوریت و ۷ نمونه آندزیت) و دگرگونی (۱۵ نمونه شامل ۸ نمونه مرمیت و ۷ نمونه شیست) با قطر NX و طول بین ۱۸ تا ۲۰ سانتی‌متر تهیه شدند. با توجه به امکانات آزمایشگاهی در دسترس از هر نوع سنگ ۴ تا ۵ نمونه تهیه شد. در کالیبراسیون دستگاه CST، از ۱۵ نمونه بتنی به عنوان نمونه‌های تقریباً همگن و همسانگرد استفاده شده است. در تهیه ۱۵ نمونه بتنی سعی شده است تا محدوده وسیعی از مقاومت تراکم تک محوری پوشش داده شود. بدین منظور در هنگام تهیه ملات بتن با تغییر طرح اختلاط و نسبت آب به سیمان نمونه‌ها، مقادیر وسیعی از مقاومت تراکم تک محوری به دست آمده است [۹]. جدول ۱ مشخصات بتن به کار رفته در ساخت نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲: شکل نهایی قرار گرفتن کلگی و سیستم اعمال فشار بر روی شاسی

۲-۲-۴- برق دستگاه

این بخش شامل کلیدهای قطع و وصل، کنتاکتورها و میکروسوییچ‌های کنترل حرکت است. فشار روغن ایجاد شده به وسیله پمپ هیدرولیک دستگاه به وسیله موتور الکتریکی به وجود می‌آید. بدین ترتیب، کنترل جریان روغن با استفاده از موتور الکتریکی و شیرهای برقی موجود در مسیر روغن انجام می‌گیرد. با تعویض دور موتور الکتریکی، جهت جریان وارد شده به جک نیز عوض شده و بدین ترتیب حرکت جک کنترل می‌شود. در این دستگاه در ابتدا از یک کلید فشاری قطع و وصل کلی جریان استفاده شده که با قطع کردن آن، کل جریان برق وارد به دستگاه قطع می‌شود، سپس از دو کلید صفر و یک برای حرکت جک و اعمال فشار به کلگی دستگاه استفاده می‌شود. تغییر جریان در پشت کلیدهای قطع و وصل، با استفاده از کنتاکتورهای جریان انجام می‌گیرد.

جریان برق قابل استفاده برای دستگاه ساخته شده، برق شهری تک فاز با ولتاژ متوسط ۲۰۰ تا ۲۲۰ ولت است. کلیه کلیدها و لوازم برقی مورد استفاده در این دستگاه نیز لوازم صنعتی است. در دستگاه طراحی شده، پس از بارگذاری روی کلگی، با تماس تیغه‌ها و نمونه، فشار وارد بر نمونه به تدریج افزایش می‌یابد. پس از شکست لحظه‌ای سنگ، تیغه‌های آزاد شده با سرعت و نیروی زیاد به سمت بسته شدن نهایی و حداقل قطر ممکن حرکت می‌کنند و در پی این اتفاق، برخورد بلبرینگ تیغه‌ها با دیواره مارپیچ ارشمیدس، باعث شکست تیغه‌ها می‌شود. از طرف دیگر این اتفاق ممکن است در پی باز کردن بیش از حد تیغه‌ها نیز انجام بگیرد. در این دستگاه برای حل مشکلات یاد شده از دو میکروسوییچ بازویی قطع و وصل جریان استفاده شده است. عملکرد کلیدهای یاد شده به گونه‌ای است که لحظه‌ای قبل از بسته و همچنین باز شدن کامل تیغه‌ها، میله نصب شده بر روی کلگی دستگاه، بازویی میکروسوییچ‌ها را فشار داده و باعث قطع جریان برق و حرکت

جدول ۱: طرح اختلاط بتن برای ساخت نمونه‌ها

نسبت آب به سیمان	سیمان Kg/m ³	آب Kg/m ³	شن Kg/m ³	ماسه Kg/m ³
۰٫۴	۳۰۰	۱۲۰	۷۰۰	۱۲۰۰
۰٫۵	۴۰۰	۲۰۰	۷۲۰	۱۰۸۰
۰٫۶	۳۰۸	۱۸۵	۱۲۳۲	۶۱۶

۳ الی ۵ آزمایش انجام شد که نحوه شکست یک نمونه از آن در شکل ۱۴ آورده شده است. برای انجام آزمایش، مغزه‌های استوانه‌ای بین تیغه‌های دستگاه قرار داده شده و بارگذاری شعاعی روی نمونه انجام می‌گیرد.



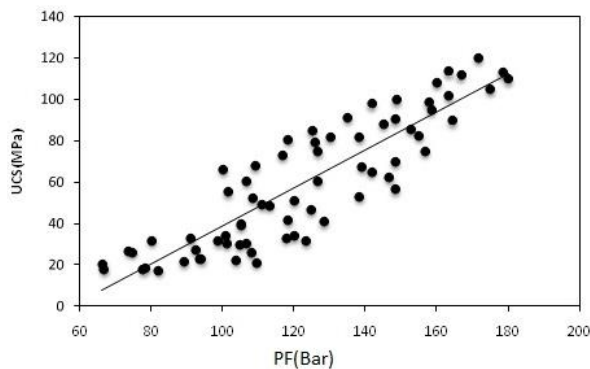
شکل ۱۴: نمایی از شکست ایجاد شده در اثر ۳ مرحله CST روی یک نمونه مغزه

همچنین برای دستیابی به مقادیر بالاتری از مقاومت نسبت به مقاومت بتن معمولی در برخی از نمونه‌ها از ماسه‌های سیلیسی با ابعاد متفاوت استفاده شده است. لازم به ذکر است که در ساخت نمونه‌ها از روان‌کننده‌ای استفاده نشده است. برای ساخت نمونه‌های استوانه‌ای با قطر استاندارد NX و طول تقریبی ۲۰ سانتی‌متر از قالب‌های فولادی استفاده شده است که از مزایای اصلی قالب‌های تهیه شده، یکی دقت کافی در تهیه نمونه‌های با قطر استاندارد و دیگری سهولت در خارج کردن نمونه‌ها از قالب به دلیل طراحی خاص قالب‌ها است. نمونه‌ها پس از خارج شدن از قالب بلافاصله به مدت یک ماه در آب غوطه‌ور شده تا به مقاومت نهایی خود برسند. شکل ۱۳ نمونه‌های تهیه شده را نشان می‌دهد.

پس از تماس تیغه‌های دستگاه با نمونه، نیروی شعاعی وارد بر نمونه به تدریج افزایش می‌یابد تا جایی که نمونه تحت فشار به دو قسمت بشکند. در این مقاله به جای شاخص CSI از فشار لحظه شکست بر حسب بار (PF) که با مشاهده گیج عقربه‌ای فشارسنج مشخص می‌شود، استفاده شد، زیرا قطر همه نمونه‌ها یکسان است. این فشار در طول آزمایش ثبت می‌شود. ارتباط بین فشار در لحظه شکست و مقاومت فشاری تک محوره ماده سنگ در شکل ۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۳: نمایی از نمونه‌های استوانه‌ای برای انجام آزمایش



شکل ۱۵: ارتباط PF و مقاومت فشاری تک محوره ماده سنگ

در مرحله بعد پس از آماده‌سازی نمونه‌ها برای انجام آزمایش‌ها طبق استاندارد ISRM بر روی همه نمونه‌ها آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوره مستقیم، بارگذاری نقطه‌ای و CST انجام شد. برای انجام آزمایش بارگذاری نقطه‌ای نمونه‌هایی به طول تقریبی ۶۵ میلی‌متر تهیه شد. برای آزمایش CST نیز بر روی هر نمونه مغزه ۲۰ سانتی‌متری

ارتباط بین UCS (مگاپاسکال) و PF (بار) برای نمونه‌هایی با قطر ۵۴ میلی‌متر در رابطه ۱ آورده شده است:

$$UCS = 0.92 \times PF - 54 \quad (R^2 = 0.78) \quad (1)$$

حدوداً ۵ سانتی‌متری باقیمانده از شکست نیز هر کدام که قابل آزمایش باشند، آزمایش نهایی انجام گرفته است. برای بررسی تاثیر طول نمونه بر روی نتایج، ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوره و PF روی نمونه‌هایی با طول ۲۰، ۱۰ و ۵ سانتی‌متر به طور جداگانه بررسی شد. نتایج نشان داد که معادله حاصله برای طول‌های مختلف شبیه به یکدیگر هستند، پس می‌توان نتیجه گرفت که برخلاف آزمایش مقاومت فشاری تک محوره، طول نمونه در این آزمایش تاثیری در نتیجه نهایی ندارد. دو انتهای نمونه‌هایی با طول ۲۰ سانتی‌متر صاف و دو انتهای نمونه‌هایی با طول ۱۰ و ۵ سانتی‌متر ناصاف بود. این نکته نشان می‌دهد که بر عکس آزمایش مقاومت فشاری مستقیم، شرایط دو انتهای نمونه تاثیری در نتایج CST ندارد.

البته لازم به ذکر است که رابطه ۱ برای مغزه‌هایی با قطر ۵۴ میلی‌متر معتبر است و در صورتی که از مغزه با قطرهای دیگری استفاده شود باید با استفاده از ضریب تصحیح قطر، فرمول اصلاح شود.

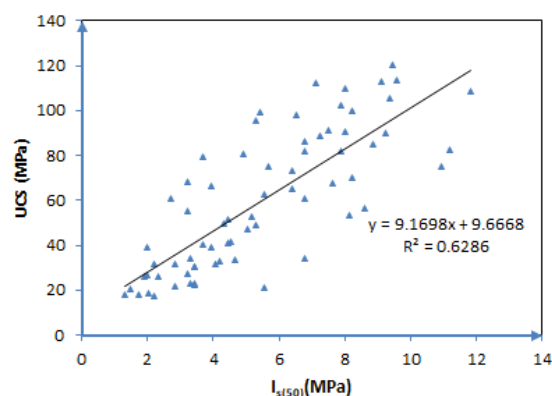
۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله جزییات آزمایش فشردگی شعاعی به عنوان روشی غیرمستقیم برای تعیین مقاومت فشاری تک محوره ماده سنگ تشریح شد. در این آزمایش بار به صورت شعاعی و عمود بر امتداد مغزه و بر روی محیط آن وارد می‌شود. با افزایش بار، نمونه به دو قسمت شکسته شده و با استفاده از مقدار فشار در لحظه شکست می‌توان با ضریب همبستگی بالایی مقاومت فشاری تک محوره ماده سنگ را به دست آورد. مقایسه نتایج به دست آمده از این آزمایش با آزمایش بارگذاری نقطه‌ای حاکی از آن بود که ضریب همبستگی در این آزمایش بیشتر از آزمایش بارگذاری نقطه‌ای است. انجام این آزمایش بر روی مغزه‌هایی با طول‌های ۲۰، ۱۰ و ۵ سانتی‌متر نشان داد که تاثیر طول نمونه‌های مورد استفاده در نتایج آزمایش بسیار اندک و قابل چشم‌پوشی است. همچنین شرایط ابتدا و انتهای نمونه‌ها، تاثیری در نتایج حاصل از این آزمایش ندارد. علاوه بر آن می‌توان این آزمایش را بر روی مغزه با قطرهای متفاوت و نه الزاماً ۵۴ میلی‌متر نیز انجام داد که در این حالت نیاز به اعمال ضریب تصحیح قطر است.

۵- مراجع

[۱] فهیمی فر، ا.، سروش، ح.؛ ۱۳۸۰؛ "آزمایش‌های مکانیک سنگ، مبانی نظری و استانداردها". جلد اول، انتشارات آزمایشگاه فنی و

همچنین برای مقایسه نتایج این آزمایش با آزمایش بارگذاری نقطه‌ای ارتباط بین UCS و شاخص بار نقطه‌ای نیز بررسی شد که نتایج آن در شکل ۱۶ نشان داده شده است.



شکل ۱۶: ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوره ماده سنگ با شاخص بار نقطه‌ای

ارتباط بین UCS و شاخص بار نقطه‌ای (مگاپاسکال) در رابطه ۲ نشان داده شده است:

$$UCS = 9.1698 \times Is(50) + 9.6668 \quad (2)$$

$$(R^2 = 0.6286)$$

که در آن [۱۰]:

$$Is(50) = \left(\frac{De}{50}\right)^{0.45} \times \frac{P}{De^2} \quad (3)$$

P: بار در لحظه گسیختگی (N)

De: قطر معادل مغزه (mm) است.

مقایسه روابط ۱ و ۲ نشان می‌دهد که همبستگی بین نتایج در آزمایش CST بیشتر از همبستگی در آزمایش بار نقطه‌ای است.

نتایجی که در بخش‌های قبل در خصوص CST مطرح شد، حاصل داده‌های میانگین‌گیری شده چندین آزمایش بارگذاری است که از نمونه‌هایی با طول‌های متفاوت به دست آمده است. در این مطالعه روند کار بدین گونه بوده است که برای انجام آزمایش بارگذاری گلوگاهی، ابتدا نمونه‌های با طول تقریبی ۲۰ سانتی‌متر را مورد آزمایش قرار داده، سپس بر روی دو قطعه نمونه حاصل از شکست که حدوداً ۱۰ سانتی‌متر هستند نیز دو بار آزمایش انجام شده و در نهایت از قطعه‌های

- test for determining strength anisotropy of rocks*". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 66: 57-63.
- [7] رستگار، م؛ ۱۳۹۲؛ "طراحی، ساخت و کالیبراسیون دستگاه CSI بمنظور تعیین مقاومت فشاری تک محوره سنگها". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد.
- [8] تاجر محمد. ح؛ ۱۳۹۲؛ "مبانی هیدرولیک صنعتی". شرکت چاپ و نشر کتاب های درسی ایران.
- [9] کی نیا، ا. م؛ ۱۳۸۵؛ "آنالیز سازه های بتن آرمه". انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، چاپ شانزدهم.
- [10] Thuro, K., and Plinninger, R. J. (2001). "Scale effects in rock strength properties. Part 2: Point load test and point load strength index". ISRM Regional Symposium EUROCK, June 3-7, Finland, 175-180.
- مکانیک خاک وزارت راه و ترابری، چاپ اول، ۷۱۹ صفحه.
- [2] International Society for Rock Mechanics, Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests. (1979). "Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 16: 135-140.
- [3] Look, B., and Griffiths, S. (2018). "An Engineering Assessment of the Strength and Deformation Properties of Brisbane Rocks". Australian Geomechanics Journal, 36(3): 17-30.
- [4] Rusnak, J., and Mark, C. (2000). "Using the Point Load Test to determine the Uniaxial Compressive Strength of Coal Measure Rock". Proceeding of the 19th International Conference on Ground Control in Mining, Lakeview Resort and Conference Center, Morgantown, WV, USA, August 8-10, 362-371.
- [5] Yilmaz I. (2009). "A new testing method for indirect determination of the unconfined compressive strength of rocks". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 46: 1349-1357.
- [6] Yilmaz I., and Yucel Ö. (2014). "Use of the core strangle

¹ Core Strangle Test

² Core Strangle Index

³ Gear Pump