

Using Micro-Drilling as A Minimally Invasive Method in Examining the Condition of Historical Buildings

Sajjad Kalantari^{*1}, Alireza Baghbanan²

1. Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Islamic Azad University, Branch of Maragheh Iran.

2. Professor, Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology. Isfahan. Iran.

Abstract

To estimate the strength parameters of materials such as concrete and rock, the micro-drilling technique can be used to quantitatively and qualitatively check the comparative strength of historical monuments and to qualitatively evaluate various building materials in depth and in situ. This technique can be used as a relatively minimally invasive, non-destructive, fast and reliable method in the field of restoration and treatment of historical monuments. In this method, by drilling in millimeter dimensions of the building surface and simultaneously measuring various drilling parameters such as thrust force, torque, penetration rate and bit rotation speed, it is possible to assess the deep condition of historical monuments in terms of the amount of erosion and weathering caused by various climatic and environmental factors. There is also an examination of the quality of treatment before and after treatment. However, various studies as drilling resistance in other countries, it has not been used in our country yet. Now that the construction of this type of equipment has become more capable in the country, we can also benefit from this system in the field of restoration and treatment of historical monuments. Simultaneous measurement of several drilling parameters and use of its data can provide additional relative advantages, including controlling the effect of bit wear in this technique. Therefore, we have provided this possibility by constructing and developing a device with this capability. Using this technique to measure drilling resistance is affected by bit wear. In this paper, we will introduce this technique, present a method for estimating reliable and comparable drilling resistance, and assess the principles of using the method in this regard.

Keywords: Historical Monuments, Micro-Drilling, Drilling Resistance, Bit Wear.



**Knowledge of
Conservation and
Restoration**

Vol.7, Issue.3,
Serial_No.21, 2024

<https://kcr.richt.ir>

Pages: 1 to 16

Corresponding Author

Sajjad Kalantari

Assistant Professor,
Department of Mining
Engineering, Islamic Azad
University, Branch of
Maragheh. Iran.

Email

s.kalantari58@iau.ac.ir

Introduction

Determining and investigating strength parameters (such as compressive strength, tensile strength, bending strength, etc.) for various materials, such as rock, using standard methods, in addition to being costly and time-consuming, requires the preparation of real samples in standard sizes of the desired materials, which in some cases, such as historical monuments, is impossible due to the destruction process. The use of non-destructive and small-scale methods plays an important role in this, as they can evaluate the strength status of materials on site. One of these methods is the micro-drilling method, which can provide the possibility of estimating the strength parameters for the desired materials at the site of a historical monument by drilling in millimeter dimensions of the building surface without the need to prepare large samples or extensive destruction. Determining the relative and absolute strength parameters of rock using drilling data is possible. Determining the relative strength of materials using this method requires the preparation of base samples and conducting tests by eliminating the effect of bit wear, and is mostly based on experimental methods. The determination of the absolute strength of materials by this method is based on the presentation of analytical models, and on this basis, various analytical models have been presented in scientific literature. In experimental methods, which are mostly on a small scale, the amount of thrust force under drilling conditions with a constant rotation speed and penetration rate is measured and referred to as the drilling resistance. The drilling resistance has

a good correlation with the uniaxial compressive strength, so that basic graphs are prepared for this purpose in the laboratory and are used as a basis for examining and measuring the strength of the materials. This method is used in the fields of testing the condition of materials in historical monuments, their restoration and treatment, and also testing the relative strength of other materials such as mortar, brick, concrete, etc. This method estimates the strength parameters of the rock, such as the friction angle, adhesion, and uniaxial compressive strength from accessible rock surfaces and provides the possibility of testing stone buildings in depth in terms of weathering. This work has recently been provided by Kalantari et al. by presenting an analytical model and construction a device with such capabilities. One of the main challenges of this method is the wear bit during drilling. The drilling data obtained are affected by this challenge, which makes unrealistic results. To solve this issue, this article will try to discuss how to use that device in the field of testing historical monuments, which is one of its capabilities, and a method for eliminating bit wear, which was presented by Delgado, will be developed and presented for abrasive rocks. In addition, in this article, we will introduce this technique in Iran for the field of restoration of historical monuments because, according to our research, so far this technique has not been used in our country in this field.

Materials and Methods

Using micro drilling system to assess the deep

erosion status of the historical building is the base of this paper. For this purpose, different building materials need to be tested using this technique. In this case, the standards required for using this technique will improve and provide more for its use.

Results and Discussion

Micro-drilling has been proven to be a reliable tool for conducting quasi-non-destructive and minimally invasive in-situ tests on natural stones and various building materials and can be used as a minimally invasive method in investigating the depth condition of historical monuments. The repeatability of the test and the possibility of controlling the effect of bit wear are possible. The aim of this article is to introduce the drilling tool and its application technique in Iran, and considering the existence of numerous historical monuments in Iran, the development of the use of this tool in the field of restoration of historical monuments can be very effective.

Authors' Contributions: The first author was responsible for conceptualization, methodology, and data collection, while the second author handled formal analysis and final editing.

Conflict of Interest: None.

Support: This research was supported by Isfahan University of Technology, both financially and institutionally.

Data Availability: The raw data of this study are available to the authors and can be accessed upon request through correspondence.

استفاده از میکرو حفاری به عنوان یک روش کم تهاجم در بررسی وضعیت بناهای تاریخی

سجاد کلانتری^{۱*}، علیرضا باغبانان^۲

۱. استادیار گروه مهندسی معدن دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه. ایران.

۲. استاد تمام گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان. ایران.



فصل نامه دانش حفاظت و مرمت

سال هفتم، شماره ۳

شماره پیاپی ۲۱، پاییز ۱۴۰۳

<https://kcr.richt.ir>

صفحات: ۱ تا ۱۶

نویسنده مسئول

سجاد کلانتری

استادیار گروه مهندسی معدن دانشگاه

آزاد اسلامی واحد مراغه. ایران.

رایانامه

s.kalantari58@iau.ac.ir

چکیده

استفاده از روش میکرو حفاری علاوه بر برآورد پارامترهای مقاومتی مصالحی همچون بتن و سنگ، می تواند جهت بررسی کمی و کیفی مقاومت نسبی بناهای تاریخی و ارزیابی کیفی مصالح ساختمانی مختلف به صورت عمقی و برجا بکار گرفته شود. این روش می تواند به عنوان یک روش تقریباً کم تهاجم، غیر مخرب، سریع و مطمئن در حوزه مرمت و بازسازی بناهای تاریخی استفاده شود. در این روش با حفاری در ابعاد میلی متری از سطح بنا و اندازه گیری همزمان پارامترهای مختلف حفاری همچون نیروی بار پشت مته، گشتاور، نرخ نفوذ و سرعت چرخش مته امکان بررسی وضعیت عمقی بناهای تاریخی از نظر میزان فرسایش و هوازدگی ناشی از عوامل متعدد آب و هوایی و محیطی فراهم می شود. همچنین بررسی کیفیت ترمیم قبل و بعد از ترمیم نیز وجود دارد. به رغم پژوهش های مختلف در این روش با عنوان مقاومت حفاری، در کشور ما هنوز استفاده نشده است. اکنون که ساخت این نوع تجهیزات با قابلیت بیشتر در کشور فراهم شده است. اندازه گیری همزمان چند پارامتر حفاری و استفاده از داده های آن می تواند مزیت های نسبی بیشتری از جمله کنترل تأثیر سایش مته در این روش فراهم کند. از این رو ما با ساخت و توسعه دستگاهی با این قابلیت این امکان را فراهم کردیم. استفاده از این روش برای اندازه گیری مقاومت حفاری متأثر از سایش مته است که در این مقاله سعی می شود ضمن معرفی این روش، روشی جهت برآورد مقاومت حفاری قابل اعتماد و قابل مقایسه ارائه شود و اصول استفاده از این روش در این راستا مورد بررسی قرار گیرد.

واژگان کلیدی: بناهای تاریخی، میکرو حفاری، مقاومت حفاری، سایش مته.

مقدمه

تعیین و بررسی پارامترهای مقاومتی (همچون مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی و غیره) برای مصالح مختلف از جمله سنگ با استفاده از روش‌های استاندارد علاوه بر هزینه بر بودن و زمان بر بودن نیازمند تهیه نمونه‌های واقعی در اندازه‌های استاندارد از مصالح مورد نظر است که در برخی موارد مانند بناهای تاریخی تهیه این نمونه‌ها به دلیل فرآیند تخریب، غیرممکن است. استفاده از روش‌های غیر مخرب و کوچک مقیاس در این میان نقش مهمی دارند که می‌توانند وضعیت مقاومتی مصالح را در محل مورد ارزیابی قرار دهند. یکی از این روش‌ها، روش میکرو حفاری است که بدون نیاز به تهیه نمونه‌های بزرگ و یا تخریب بزرگ می‌تواند در محل بنای تاریخی به صورت حفاری در ابعاد میلی‌متری از سطح بنا امکان برآورد پارامترهای مقاومتی را برای مصالح مورد نظر فراهم کند. تعیین پارامترهای مقاومتی سنگ با استفاده از داده‌های حفاری به دو صورت نسبی و مطلق فراهم است. تعیین مقاومت نسبی مصالح با استفاده از این روش نیازمند تهیه نمونه‌های مینا و انجام آزمایش با حذف تأثیر سایش مته است و بیشتر بر پایه روش‌های تجربی است. تعیین مقاومت مطلق مصالح با این روش مبتنی بر ارائه مدل‌های تحلیلی است و بر این اساس مدل‌های تحلیلی مختلفی در متون علمی ارائه شده است. در روش‌های تجربی که بیشتر در مقیاس کوچک باشند، مقدار نیروی پشت مته لازم تحت شرایط حفاری با سرعت چرخش و نرخ نفوذ ثابت اندازه‌گیری و تحت عنوان مقاومت حفاری مطرح است. این مقاومت حفاری همبستگی خوبی با مقاومت فشاری تک محور دارد، به طوری که نمودارهای مینایی با این هدف در آزمایشگاه تهیه می‌شود و به عنوان مینایی جهت بررسی و اندازه‌گیری مقاومت سنگ استفاده می‌شود (Pamplona et al, 2008; Delgado et al, 2004; Valentini et al, 2007). از این روش در حوزه‌های بررسی وضعیت مصالح بناهای تاریخی، مرمت و بازسازی آن‌ها (Tiano et al, 2004) و همچنین بررسی مقاومت نسبی مصالح دیگری همچون ملات، آجر (Del Monte et

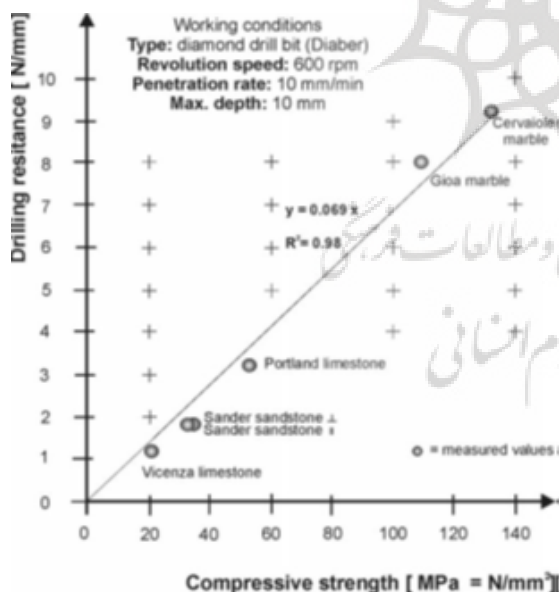
al, 2008; Costa et al, 2012)، بتن (Felicetti, 2006) و غیره استفاده می‌شود. در روش‌های تحلیلی که بیشتر در مقیاس بزرگ می‌باشند، مدل‌های مختلفی توسط افراد متعدد ارائه شده است که عموماً مبتنی بر تعادل نیروها و یا مبتنی بر تعادل انرژی می‌باشند. مدل‌هایی که بر اساس تعادل انرژی ارائه شده است (Karasawa et al, 2002; Ohno et al, 2004; Bingham, 1964; Wolcott et al, 1993; Hoberock et al, 1996; Burgess et al, 1985; Pessier et al, 1992; Warren, 1987; Li et al, 2012) برگرفته از مدل انرژی ویژه حفاری تیل (Teale, 1965) می‌باشند. در این مدل‌ها حداقل مقدار انرژی لازم برای حفاری واحد حجم سنگ به عنوان یک شاخص برای هر سنگ مطرح بوده و در شرایط فشار اتمسفر برابر مقاومت فشاری تک محوره سنگ است. مدل‌های مبتنی بر تعادل نیروها بر اساس تعادل نیروها در فرآیند حفاری سنگ توسط ابزار حفاری می‌باشند (Detournay et al, 1992; Gerbaud et al, 2006; Chiaia et al, 2013; Wojtanowicz et al, 1993; Nakajima et al, 1979; Hareland, 2010; Kalantari et al, 2019; Kalantari et al, 2018) و بیشتر با هدف بررسی کارایی حفاری بوده و برخی از آن‌ها روش‌هایی برای برآورد مقاومت فشاری تک محوره سنگ ارائه می‌کنند (Richard, 2000; Schei et al, 2012). استفاده از مکانیسم حفاری چرخشی در مقیاس کوچک با یک ماشین حفاری دستی توسط مته‌های اسکانه‌ای T شکل قابلیت مشابهی فراهم می‌کند. لازمه این کار اعمال شرایط واقعی فرآیند برش در حفاری با این مته‌ها است. این روش برخلاف آزمایش خراش که فقط بر روی نمونه‌های سنگی قابل انجام است، علاوه بر نمونه‌های سنگی در محل پروژه‌ها و از سطوح سنگی قابل دسترس همچون دامن ترانشه‌ها، دیواره و سینه کار تونل‌ها، از سطوح سنگی در سازه‌های سنگی نیز به صورت نقطه‌ای و مطلق پارامترهای مقاومتی سنگ همچون زاویه اصطکاک، چسبندگی و مقاومت فشاری تک محوره را برآورد می‌کند و امکان بررسی عمقی بناهای سنگی را از نظر هوازدگی و فرسایش فراهم

مقاومت حفاری نام برده می‌شود. حفاری در مصالح مختلف از جمله سنگ مطابق شکل ۱ نشان می‌دهد که این پارامتر (مقاومت حفاری) همبستگی خوبی با مقاومت فشاری تک محوره آن‌ها دارد. از این رو می‌توان با انجام آزمون‌های حفاری بر روی مصالح مختلف و آزمون مقاومت فشاری تک محوره در آزمایشگاه نمودارهای مبنایی تهیه کرده و در محل بکار گرفت. از این روش در بررسی و تعیین مقاومت مصالح دیگری همچون انواع ملاترها، انواع بتن و مصالح بنایی در ساختمان‌های قدیمی استفاده شده است. در این راستا نیز ماشین‌هایی برای اندازه‌گیری مقاومت حفاری مطابق شکل ۲ ساخته شده است که در شکل ۳ نمونه‌ای از ماشین‌های اندازه‌گیری مقاومت حفاری را نشان می‌دهد. در شکل ۴ وضعیت مقاومت حفاری اندازه‌گیری شده توسط دستگاه ملاحظه می‌شود که وضعیت مقاومت حفاری سازه را قبل از ترمیم و بعد از ترمیم به‌خوبی نشان می‌دهد. در عین اینکه تخریب ایجاد شده قابل ترمیم و خیلی کوچک است. از این رو این روش به‌عنوان یک روش کم‌تهاجم

می‌کند. این کار اخیراً توسط کلانتری و همکاران (Kalantari et al, 2019; Kalantari et al, 2018) ارائه یک مدل تحلیلی و ساخت یک دستگاه با چنین قابلیتی فراهم شده است. یکی از چالش‌های اصلی این روش سایش مته حفاری در طول حفاری است. داده‌های حفاری به‌دست‌آمده متأثر از این چالش می‌باشند که نتایج به‌دست‌آمده برای مقاومت نسبی مصالح را غیر واقعی می‌کند. برای حل این موضوع در این مقاله سعی خواهد شد به نحوه استفاده از آن دستگاه در حوزه بررسی مقاومت نسبی و وضعیت بناهای تاریخی که یکی از قابلیت‌های آن است، پرداخته شود و روشی جهت حذف سایش مته که توسط افرادی همچون دلگادو (Delgado et al, 2004) ارائه شده است، برای سنگ‌های ساینده توسعه و ارائه می‌شود. ضمن اینکه در این مقاله به معرفی این روش در کشور ایران برای حوزه مرمت و بازسازی بناهای تاریخی می‌پردازیم زیرا مطابق بررسی ما تاکنون از این روش در کشور ما در این حوزه استفاده نشده است.

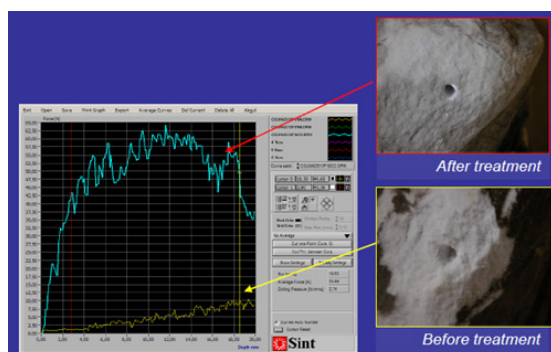
استفاده از روش میکرو حفاری در بناهای تاریخی

بررسی اندرکنش بین مته و سنگ در فرآیند حفاری بدون ملاحظه تجربی (آزمایشگاهی و صحرایی) آن کار بسیار سخت و پیچیده است. در فرآیند حفاری ابزار حفاری با غلبه بر مقاومت سنگ ابتدا منجر به نفوذ و شکستن سنگ و سپس منجر به خرد کردن آن می‌کند. در این فرآیند بخشی از انرژی حفاری صرف حفاری سنگ شده و بخشی از آن نیز به‌صورت اصطکاک مصرف می‌شود. تفکیک این دو بخش کار پیچیده و سختی است. علاوه بر این موضوع، پارامترهای تأثیرگذار در فرآیند حفاری نیز بسیار زیاد است. در این شرایط برآورد مقاومت سنگ از داده‌های حفاری مشکل بوده و نیازمند ارائه مدل‌های پیچیده ریاضی خواهد بود. از این‌رو ساده‌ترین راه در موضوع بررسی مقاومت سنگ از داده‌های حفاری، آزمون‌های تجربی است و استفاده از پارامتر مقاومت حفاری به‌عنوان نماینده مقاومت سنگ روش سریع و کم‌هزینه به نظر می‌رسد. در این روش از نیروی بار پشت مته لازم برای حفاری سنگ تحت شرایط گشتاور، نرخ نفوذ و سرعت چرخش ثابت به‌عنوان



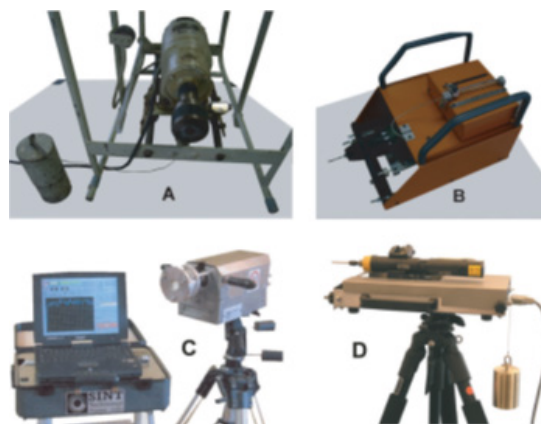
شکل ۱. نمودار خطی همبستگی بین مقاومت حفاری و مقاومت فشاری تک محوره (Pamplona et al 2007).

Figure1. Linear correlation between drilling resistance (DRi) and compressive strength (UCS).



شکل ۴. نمونه‌ای از آزمایش یک بنای تاریخی و نتایج مقاومت حفاری قبل و بعد از ترمیم (Tiano & Rescic, 2004).

Figure 4. An example of a test of a historical monument and the results of drilling resistance before and after treatment (Tiano & Rescic, 2004).



شکل ۲. نمونه‌هایی از ماشین اندازه‌گیری مقاومت حفاری (Pamplona et al 2007).

Figure 2. Examples of drilling resistance measuring machines.

سرعت چرخش و نرخ نفوذ را اندازه‌گیری می‌کنند و از طرفی برای دامنه مقاومتی پایین که عمدتاً زیر ۱۰ مگاپاسکال هستند، توانائی حفاری دارند. این محدودیت باعث می‌شود که استفاده از آن‌ها برای بناهای تاریخی ساخته شده از سنگ‌ها که عمدتاً مقاومت بالایی دارند، کارایی نداشته باشند. از طرفی به دلیل مسائل تحریم این دستگاه‌ها به کشور ایران فروخته نمی‌شوند. از این رو ما با ساخت و توسعه یک دستگاه حفاری با قابلیت حفاری در سخت‌ترین سنگ‌ها را نیز فراهم کرده و مشکل حفاری در بناهای تاریخی ساخته شده با مصالح سنگی سخت و با مقاومت بالا در مقیاس میلی‌متری را برطرف نمودیم.

معرفی دستگاه حفاری ساخته شده در ایران

دستگاه حفاری قابل حمل با همکاری و حمایت مالی دانشگاه صنعتی اصفهان ساخته شده است. این دستگاه مطابق شکل ۵ با هدف اندازه‌گیری پارامترهای مقاومتی سنگ به روش میکرو حفاری طراحی و ساخته شد. این دستگاه قابلیت حفاری در سنگ‌هایی با مقاومت‌های مختلف هم در محل پروژه و هم در آزمایشگاه بر روی نمونه‌های سنگی با قطر ۱ تا ۱۵ میلی‌متر و تا عمق ۱۰۰ میلی‌متر دارا است. این دستگاه هم‌زمان با حفاری در سنگ،



شکل ۳. دو نمونه از ماشین اندازه‌گیری مقاومت حفاری در حال کار در یک بنای تاریخی (Tiano & Rescic 2004).

Figure 3. Two examples of drilling resistance machines in operation in historical building.

جهت اندازه‌گیری مقاومت و همچنین کنترل وضعیت مقاومتی مصالح و بناهای تاریخی مختلف مطرح است.

یکی از بارزترین موضوع در این دستگاه‌های حفاری ساخته شده توسط افراد مختلف محدود بودن توان این ماشین‌ها و همچنین پارامترهای اندازه‌گیری است؛ که با توجه به گستردگی مصالح ساختمانی بناهای تاریخی از انواع ملاط‌ها و انواع آجرها تا انواع سنگ‌های مختلف است که دامنه مقاومتی مختلفی دارند. اکثر این دستگاه‌ها فقط نیروی بار پشت مته،

حفاری در هر شرایط از نظر شیب و موقعیت را فراهم می‌کند و می‌تواند بر روی دیواره‌های سنگی توسط پایه مخصوص جلویی تثبیت شود. بخش حفاری دستگاه از دو موتور خود کنترل مجزا برای حفاری کمک می‌گیرد. یکی موتور خود کنترل نیروی بار پشت مته را با ظرفیت بالای ۱۳۰۰ نیوتن تأمین کرده و این نیرو را توسط یک تسمه تایمر به محور مارپیچی منتقل می‌کند. محور انتقال مارپیچی نیروی محوری ایجاد شده توسط موتور خود کنترل مذکور را به مجموعه (موتور خود کنترل حفاری، جعبه دنده سرمته و مته) سوار شده بر روی آن منتقل می‌کند. موتور خود کنترل دیگر با ظرفیت حداکثر ۶ نیوتن متر گشتاور لازم برای حفاری را فراهم کرده و گشتاور ایجاد شده را به جعبه دنده متصل شده منتقل می‌کند. این موتور خود کنترل به همراه جعبه دنده بر روی محور انتقال مارپیچی سوار بوده و مته از طریق سه نظام به جعبه دنده متصل است. به این ترتیب گشتاور و نیروی محوری به مته منتقل می‌گردد. دستگاه جهت اندازه‌گیری عمق حفاری از دو حسگر جابجایی سنج تعبیه شده در روی پایه صفحه‌ای کمک می‌گیرد که کار کنترل و ثبت عمق حفاری را انجام می‌دهد. این بخش حفاری دستگاه از طریق کابل به یک پردازشگر مرکزی متصل است. بخش پردازشگر دستگاه شامل یک کنترلر منطقی برنامه پذیر (PLC)، تعدادی صفحه مدار، کلید و نمایشگر لمسی به همراه خروجی رابط برای ذخیره اطلاعات است. این بخش قابل اتصال به کامپیوتر بوده و امکان کنترل دستگاه از طریق کامپیوتر نیز فراهم می‌شود. داده‌های خروجی شامل بار پشت مته، گشتاور، سرعت چرخش، نرخ نفوذ و عمق حفاری را به‌طور هم‌زمان در قالب یک فایل اکسل ارائه می‌کند که امکان رسم انواع نمودارها بر اساس هر کدام از این داده‌ها فراهم می‌شود. نمودارهای شکل ۶ و ۷ نمونه‌ای از این نمودارها می‌باشند. شکل مته‌های مورد استفاده در این آزمایش‌ها مطابق شکل ۹ از نوع T شکل یا اسکنه‌ای بوده که دارای زاویه شیب ۱۵ الی ۲۰ درجه است. جنس نوک این مته‌ها از نوع تنگستن کارباید و یا از نوع الماسه است.

داده‌های حفاری همچون گشتاور، نیروی بار پشت مته، سرعت چرخش، نرخ نفوذ و عمق حفاری را اندازه گرفته و ثبت می‌نماید. برای این کار از دو موتور خودکنترل مجزا کمک می‌گیرد که یکی نیروی بار پشت مته با حداکثر ظرفیت ۱۳۰۰ نیوتن تأمین می‌کند و موتور خودکنترل دیگر با ظرفیت حداکثر ۶ نیوتن متر گشتاور لازم برای حفاری فراهم می‌کند.

دستگاه حفاری از دو قسمت اصلی شامل، قسمت حفاری و قسمت پردازشگر تشکیل شده است. بخش حفاری، کار حفاری در سنگ را انجام داده و بخش پردازشگر کار کنترل و ثبت داده‌های حفاری را بر عهده دارد. بخش حفاری دستگاه که در واقع بخش اصلی سخت افزاری این دستگاه را تشکیل می‌دهد. مطابق شکل ۵ بر روی سه پایه سوار شده و امکان



شکل ۵. نمایی از دستگاه حفاری ساخته شده در ایران با قابلیت اندازه‌گیری داده‌های حفاری.

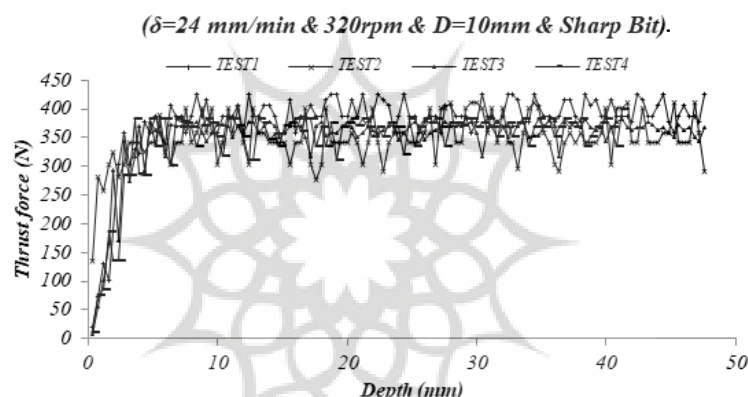
Figure 5. The constructed drilling machine in Iran with the drilling data measurement capability.

روش آزمایش پیشنهادی برای بررسی بناهای تاریخی

به دست آمده از تکرار چهار آزمایش در شرایط یکسان را در حفاری سنگ مرمر نشان می دهد.

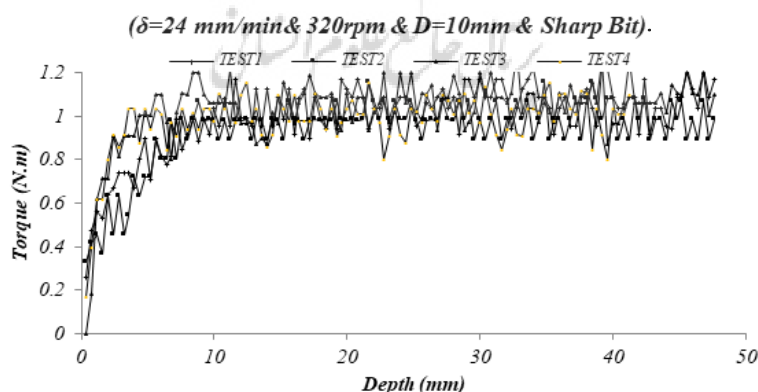
حال برای بررسی وضعیت یک بنای تاریخی، لازم است یک نمونه مبنا برای مصالح مورد آزمایش در بنا و یک نمونه برای کنترل وضعیت سایش مته و تأثیر آن بر نتایج آزمایش تهیه کنیم. نمونه مبنا بسته به نوع مصالح که می تواند آجر، سفال، ملاط و یا انواع سنگ های بکار گرفته شده در بنای تاریخی باشد. نمونه برای کنترل سایش مته باید از مصالح دست ساز همگن و همسانگرد باشد که بهترین نمونه نوعی از پلاستر که به عنوان سنگ مصنوعی استفاده

هدف این آزمایش اندازه گیری مقدار واقعی مقاومت حفاری و حذف تأثیر سایش مته است. در فرآیند حفاری پارامترهای مختلف شامل نیروی بار پشت مته، گشتاور، نرخ نفوذ و سرعت چرخش توسط دستگاه حفاری اندازه گیری و ثبت می شود. با تعریف سرعت چرخش و نرخ نفوذ مشخص و ثابت برای دستگاه در ابتدای هر حفاری پارامترهای نیروی بار پشت مته و گشتاور متناسب در فرآیند حفاری به دست می آیند. شکل های ۶ و ۷ نمونه ای از نمودارهای



شکل ۶ نیروی بار پشت مته اندازه گیری شده توسط دستگاه حفاری در سنگ مرمر با تکرار آزمایش.

Figure 6. Thrust force measured by the drilling machine in marble with repeated testing.



شکل ۷. گشتاور اندازه گیری شده توسط دستگاه حفاری در سنگ مرمر با تکرار آزمایش.

Figure 7. Torque measured by the drilling machine in marble with repeated testing.

از نمودار به دست آمده از مقاومت حفاری - عمق بر اساس روابطی که در ادامه بیان می شود.

- مراحل فوق برای آزمایش در محل و بر روی بنای تاریخی نیز تکرار می شود.

مقایسه نتایج مقاومت حفاری به دست آمده از آزمایش حفاری در محل و نمونه مینا

محاسبه مقدار میانگین مقاومت حفاری: برای هر سوراخ، مقدار میانگین مقاومت حفاری محاسبه می شود. این محاسبه مربوط به بخشی از نمودار است که قسمت اولیه را شامل نمی شود. (از قسمتی که نمودار افقی شده است که معمولاً بعد از ۵ میلی متر اول اتفاق می افتد) میانگین مقاومت حفاری DRp سوراخ p به عنوان مقدار متوسط نمونه های m-q پروفیل تعریف می شود (Valentini et al 2008):

$$DR_p = \frac{1}{m_p - q_p} \sum_{i=q_p}^{m_p} DR_{i,p} \quad \text{رابطه ۱}$$

i: شاخص نمونه داده (i=0, 1, 2, ..., m-1)

m_p: تعداد کل نمونه های داده در مشخصات نیرو در مقابل عمق، مربوط به سوراخ p ام.

q_p: تعداد نمونه های داده های دور ریخته شده به دلیل تأثیر نفوذ مته، مربوط به سوراخ p ام.

پارامتر دیگر شاخص عدم همگنی از طریق عمق (INHD) تعداد سوراخ p-امین است که به عنوان نسبت شاخص دقت به میانگین مقاومت حفاری تعریف می شود (با فرض اینکه پراکندگی عمدتاً به دلیل عدم همگنی مواد در جهت عمود بر سطح سنگ است). (Valentini et al 2008):

$$INHD_p(\%) = \frac{S_p}{DR_p} * 100 \quad \text{رابطه ۲}$$

که در این رابطه S_p شاخص دقیق تعداد سوراخ p ام به عنوان بهترین برآورد کننده انحراف استاندارد است.

مقدار میانگین مقاومت حفاری به دست آمده برای هر حفاری در نمونه کنترل سایش قبل و بعد آزمایش حفاری باهم مقایسه شده و درصد تغییرات به وجود آمده ناشی از سایش در مته به دست می آید و در نتایج



شکل ۸. نمونه سنگ های استفاده شده در آزمایش ها.

Figure 8. Samples of rocks used in the tests.

شکل ۹. شکل و نوع مته حفاری.

Figure 9. Shape and type of drilling bit .

می شود، یک نوع گچ دندانپزشکی با نام تجاری مولدانتارا است و در بازار موجود است. این گچ با نسبت آب به گچ ۳۰ به ۱۰۰ باهم ترکیب شده و با زمان گیرش اولیه ۱۵ دقیقه در ۷ روز به مقاومت حداکثر خود می رسد. مزیت اصلی این پلاستر همگنی آن و مطمئن بودن پارامترهای مقاومتی آن است. برای این کار لازم است قبل و بعد هر آزمایش حفاری در محل یک آزمایش حفاری کنترل سایش مته انجام گیرد که در ادامه فرآیند انجام آزمایش توضیح داده می شود.

مراحل انجام آزمایش

- طراحی فرمی با مشخصات پیوست ۱ به عنوان نمونه جهت ثبت مشخصات هر آزمایش حفاری - تهیه نمونه مینا برای مصالح جهت انجام آزمون آزمایشگاهی و نمونه گچ دندانپزشکی جهت کنترل سایش مته در آزمون آزمایشگاهی و محلی.

- انجام آزمایش حفاری بر روی نمونه مینا و انجام آزمایش حفاری بر روی نمونه کنترل سایش قبل و بعد از هر آزمایش حفاری.

- ثبت داده های حفاری هر آزمایش و ترسیم نمودار مقاومت حفاری - عمق حفاری.

- برآورد میانگین مقاومت حفاری برای هر حفاری - در نمونه مینا و نمونه کنترل سایش مته با استفاده

مقاومت حفاری به‌دست‌آمده از همان آزمایش حفاری نمونه مبنا اعمال می‌شود؛ زیرا با افزایش سایش مته مقاومت حفاری به‌دست‌آمده افزایش می‌یابد و باید با اعمال این ضریب خطای ناشی از سایش مته را از بین برد. باید توجه داشته باشیم که در فرآیند انجام تمام آزمایش‌ها چه در نمونه مبنا و چه در نمونه کنترل سایش و یا در محل، مقادیر پارامترهای حفاری از جمله سرعت چرخش مته، نرخ نفوذ، قطر مته مقادیر مشخص تعریف شده و در طول آزمایش‌ها ثابت نگه‌داشته شوند تا امکان مقایسه نتایج فراهم شود. اندازه‌گیری گشتاور میانگین هم امکان کنترل بهتر نتایج را فراهم می‌کند؛ زیرا این گشتاور رابطه خطی با مقاومت حفاری دارد و می‌تواند در برآورد مقاومت مطلق استفاده شود. هر چند در بحث بناهای تاریخی بیشتر پارامتر مقاومت نسبی مطرح است.

برخی مصالح مورد آزمایش بسیار ساینده هستند و این مورد در برخی سنگ‌ها به دلیل داشتن مقادیر زیاد از کانی‌های ساینده مانند کوارتز مشهود است. شدت ساینده‌گی به‌قدری است که میزان سایش در طول یک حفاری بر روی مته زیاد شده و باعث تغییرات زیادی در مقدار مقاومت حفاری اندازه‌گیری شده بین ابتدای سوراخ حفاری شده با انتهای همان سوراخ می‌شود. برای چنین سنگ‌هایی بهتر است از روش زیر استفاده شود.

ایده اصلی این روش فرض می‌کند که مقادیر تصحیح شده کسری از مقادیر اندازه‌گیری شده هستند و این کسر تصحیح را می‌توان به‌طور تجربی در طول هر عملیات حفاری مشخص و تعیین کرد.

با فرض اصطلاحات:

سنگ A - سنگ مورد مطالعه است.

نمونه تصحیح - قطعه‌ای از همان ماده ("سنگ A") است که دست نخورده باقی مانده است که در آن ضریب اصلاح باید تعیین شود.

سوراخ‌های اصلاح - سوراخ‌هایی هستند که در "نمونه اصلاح" ایجاد می‌شوند.

F₀ - مقاومت حفاری به‌دست‌آمده در اولین سوراخ

ایجاد شده در "نمونه اصلاح" است و بهترین تقریب مقاومت حفاری "واقعی" ماده را نشان می‌دهد. همان‌طور که بعداً مشاهده می‌شود، این مقدار نیز مستعد اصلاح است.

مقاومت متوسط - مقداری است که بین هر دو نقطه تعریف شده در امتداد نمودار مقاومت حفاری محاسبه می‌شود. می‌توان آن را مستقیماً در ابزار یا در فایل‌های اکسل صادر شده به دست آورد.

روش آزمایش در سنگ‌های سخت و ساینده

- نمونه‌ای از "سنگ A" را که قرار است سوراخ‌های اصلاح روی آن ایجاد شود، انتخاب کنید. این به‌عنوان "نمونه تصحیح" باقی خواهد ماند.

- اولین سوراخ را با مته جدید در "نمونه اصلاح" (عمق ۱ سانتیمتر) ایجاد کنید. مقاومت متوسط این سوراخ باید F₀ نامیده شود. برای جلوگیری از تأثیر ۱-۲ میلی‌متر اول، جایی که شکل نوک مته تأثیر زیادی دارد، فاصله بین ۲ تا ۸ میلی‌متر جهت استفاده پیشنهاد می‌شود.

- سوراخ‌های آزمایشی مورد نیاز را در نمونه‌های تحت آزمایش سوراخ کنید.

- در فواصل منظم از عمر حفاری مته، یک سوراخ ۱ سانتی‌متری جدید در "نمونه اصلاح" حفاری کنید (این مقاومت‌ها F_i نامیده می‌شوند).

- فاصله بین دو سوراخ اصلاحی باید با توجه به ساینده‌گی سنگ تنظیم شود. برای سنگ‌های ساینده‌تر کوتاه‌تر و برای سنگ‌هایی که کم ساینده‌تر هستند، طولانی‌تر است. در مورد ماسه سنگ، برای مته الماسی، سوراخ‌های اصلاحی ممکن است در هر ۵۰ میلی‌متر طول حفاری تا زمانی که پنج سوراخ مرجع در دسترس باشد، انجام شود. از آن زمان به بعد، باید در هر ۱۰۰ میلی‌متر یک سوراخ مرجع جدید ایجاد شود.

- تابع تصحیح (با فرض رگرسیون خطی) را می‌توان با حداقل دو سوراخ محاسبه کرد، اما دقت آن زمانی افزایش می‌یابد که تعداد سوراخ‌های بیشتری در دسترس باشد. از آنجایی که فرآیند حفاری هم بر

فرآیند تصحیح و هم بر داده‌های آزمایش واقعی تأثیر می‌گذارد، حفاری تعداد بیشتری سوراخ از قبل نامناسب است، زیرا برون‌یابی برای سوراخ‌های مته بعدی لزوماً اعمال نخواهد شد؛ بنابراین، باید در نظر گرفت که تصحیح اولین سوراخ‌ها ممکن است «کامل» نباشد و مطمئناً برای یافتن نتایج دقیق‌تر نیاز به بازبینی مجدد دارد.

- در صورت امکان، توصیه می‌شود برای داشتن یک عملکرد تصحیح قابل اعتماد منتظر تعداد معینی سوراخ اصلاحی باشید و سپس اقدام به اعمال آن بر روی داده‌های حفاری موجود کنید. به‌طور کلی، انتظار می‌رود این محدودیت خیلی حیاتی نباشد و در تجربه ما، این روش همیشه با روال عادی آزمایش سازگار بوده است. اغلب اوقات، زمانی که قرار است گزارشی همراه با آنالیزها تهیه شود، سوراخ‌های اصلاحی کافی برای تعیین ضریب تصحیح وجود دارد.

روش اصلاح

- اجرای روش اصلاح پیشنهادی را می‌توان از طریق پروتکل زیر انجام داد:

- مقاومت حفاری به‌دست‌آمده در هر سوراخ اصلاحی باید بین ۲ تا ۸ میلی‌متر باشد.

- مقاومت‌های F_i متوالی باید بر F_0 تقسیم شود،

- مقاومت متوسط سوراخ به نقطه شروع آن سوراخ خاص اختصاص داده می‌شود، یعنی برای نقطه اول، F_i/F_0 باید در $x=0$ میلی‌متر رسم شود. برای سوراخ حفر شده بین ۸۰ تا ۹۰ میلی‌متر، نتیجه F_i/F_0 باید در $x=80$ میلی‌متر رسم شود.

- برای تمام سوراخ‌های اصلاحی موجود، مقاومت حفاری را بر حسب طول کل حفر شده تا آن سوراخ مشخص رسم کنید.

- در مختصات طرح F_i/F_0 کل طول حفاری شده تا نقطه i را رسم کنید.

- یک خط رگرسیون را با داده‌های تصحیح تنظیم کنید. با توجه به نوع داده از یک یا چند خط

مستقیم استفاده کنید. برای درک آسان‌تر شکل ۱۰ را ببینید،

- اولین خط رگرسیون در اصل باید از نقطه $XY(0;1)$ یا بسیار نزدیک به آن عبور کند. انحرافات بزرگ از این فرض باید به دقت تجزیه و تحلیل شود و قبل از اقدام با روش اصلاح توضیح داده شود.

- معادله رگرسیون را برای هر خط رگرسیون تعیین کنید.

- هنگامی که معادلات رگرسیون در دسترس هستند، داده‌های حفاری را می‌توان به‌طور خودکار، نقطه به نقطه، به‌طور مستقیم در فایل‌های Excel استخراج شده توسط نرم افزار در دستگاه تصحیح کرد.

- فرمول تصحیح کلی این است (Delgado et al, 2004):

$$F_{Ci}=F_{mi}/a+b x_i \quad \text{رابطه ۳}$$

که

F_{Ci} : مقاومت تصحیح شده در نقطه i .

F_{mi} : مقاومت اندازه‌گیری شده در نقطه i .

x_i : طول کل حفاری انجام شده با مته مربوطه تا نقطه i .

a : ترتیب در مبدأ برای قسمت اول نمودار، باید بسیار.

نزدیک به یک باشد.

b : ضریب زاویه ای خط ریگراسیون

روش کامل در اینجا با استفاده از یک مثال نظری نشان داده شده است. شکل ۱۰ دو نمودار نظری را با تکامل مقاومت حفاری در تابع طول حفاری نشان می‌دهد. یکی دارای یک روند خطی واحد (A) و دیگری دارای دو روند متمایز (B). هنگامی که خطوط اصلاح تعریف می‌شوند، می‌توان مقاومت‌های حفاری واقعی را در هر عمقی با استفاده از یک برگه اکسل مناسب که در آن داده‌های دستگاه حفاری فهرست شده است، اصلاح کرد.

برای تصحیح داده‌های شکل ۱۰ (خط A)، این معادله رگرسیون داده‌های ساختگی هستند:

$$y=1+0.1x \quad \text{رابطه ۴}$$

و تصحیح در هر نقطه معین i ، که در طول حفاری x_i

هر بازه معین به طور متوالی تا انتهای منحنی یا تا زمانی که بتوان یک روند خطی را در آن برآزش کرد، انجام گیرد.

همان طور که این فرمول ها نشان می دهند، تصحیح با کسری انجام می شود و بنابراین هرگز مقادیر منفی به دست نمی آید. این مشکل ایجاد شده با نمودارهایی که مقادیر بسیار کم را نشان می دهند و به دلیل سایش نوک نیاز به اصلاح اساسی دارند، حل می کند. علاوه بر این، به نظر می رسد این روش منطقی، برای تصحیح داده های تجربی زمانی است که پیک های بالا و پایین نزدیک به دیگری پیدا می شوند. به طور طبیعی، پیک های بالاتر تصحیح بزرگتری دریافت می کنند و پیک های پایین تر تصحیح کمتری دارند، که به نظر می رسد حداقل تا آنجایی که ما تاکنون آن را درک کرده ایم، مطابق با واقعیت است.

جمع بندی

میکرو حفاری یک ابزار معتبر برای انجام آزمایش های شبه غیر مخرب و کم تهاجم در محل بر روی سنگ های طبیعی و مصالح ساختمانی مختلف تأیید شده است و می تواند به عنوان یک روش کم تهاجم در بررسی وضعیت عمقی بناهای تاریخی مورد استفاده قرار گیرد. تکرارپذیری آزمایش و امکان کنترل تأثیر سایش مته امکان پذیر است. هدف این مقاله معرفی ابزار حفاری و روش استفاده از آن در کشور ایران است و با توجه به وجود بناهای تاریخی متعدد در ایران توسعه استفاده از این ابزار در حوزه مرمت و بازسازی بناهای تاریخی می تواند بسیار مؤثر باشد.

مشارکت نویسندگان: نویسنده اول در بخش های مفهوم پردازی، روش شناسی و جمع آوری داده ها نقش داشت، در حالی که نویسنده دوم مسئولیت تحلیل رسمی و ویرایش نهایی را بر عهده داشت.

تضاد منافع: ندارد.

حامیان مادی و معنوی: دانشگاه صنعتی اصفهان

دسترسی به داده ها: داده های خام این پژوهش در اختیار نویسندگان است و با مکاتبات قابل دسترسی است.

رخ می دهد، به صورت زیر انجام می شود:

$$F_{Ci} = F_{mi} / 1 + 0.1x_i \quad \text{رابطه ۵}$$

برای نمودار B، یک معادله رگرسیون تا ۲۵ سانتی متر و یک معادله دوم بعد از آن قرار می گیرد. دو خط رگرسیون نمایش داده شده این فرض را نشان می دهد.

با فرض سادگی، دو معادله رگرسیون عبارتند از:

$$y = 1 + 0.25x \quad \text{تا } 25 \text{ سانتیمتر صادق است و}$$

$$y = 5.8 + 0.04x \quad \text{بعد از } 25 \text{ سانتیمتر صادق است.}$$

فرمول های تصحیح منجر به موارد زیر می شود:

$$F_{Ci} = F_{mi} / 1 + 0.25x_i \quad \text{رابطه ۶}$$

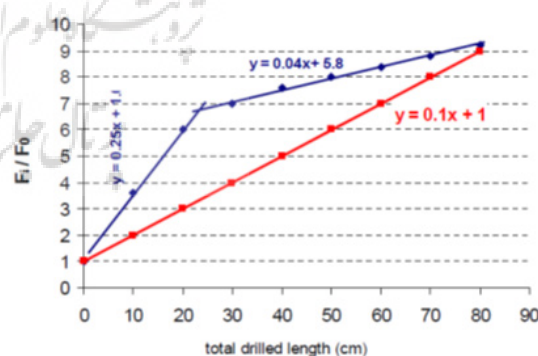
فرمول های تصحیح منجر به موارد زیر می شود:

تا ۲۵ سانتیمتر قابل کاربرد است و

$$F_{Ci} = F_{mi} / 5.8 + 0.04x_i \quad \text{رابطه ۷}$$

بعد از ۲۵ سانتیمتر قابل کاربرد است.

برای یک روند کاملاً غیر خطی، یا می توان یک تابع رگرسیون غیر خطی منفرد را در داده ها قرار داد و سپس استفاده از آن تابع برای تصحیح داده ها ساده است، یا چنین تابع رگرسیونی را نمی توان یافت و اصلاحات باید توسط تخمین یک ضریب تصحیح معتبر برای



شکل ۱۰. نمونه هایی از دو تابع تصحیح فرضی برای دو ماده مختلف (Delgado et al, 2004).

Figure 10. Examples of two hypothetical correction functions for two different materials.

منابع / Reference

Bingham M. G. (1964). How Rock Properties Are Related to Drilling. Oil & Gas Journal, 94-101.

Burgess T. M., & Less W. G. (1985). Measuring The Wear of Milled Tooth Bits Using MWD Torque And Weight-on-Bit. Drilling Conference (pp. 453-462). New Orleans: SPE/IADC 13475.

Chiaia B., Brunetto M. B., & Carpinteri A. (2013). Mathematical Modeling of the Mechanics of Core Drilling in Geomaterials. Machining Science and Technology(1-25). DOI: 10.1080/10910344.2012.747881.

Costa D., Magalhães A., & Veiga R. (2012). Characterization of Mortars Using DRMS: Tests on Field Panels Samples. LNEC, Lisbon, Portugal: HMC.

Del Monte E., & Vignoli A. (1-2 Settembr 2008). In situ mechanical characterization of the mortar in masonry buildings with DRMS. SACoMaTiS 2008 International RILEM Conference. Como Lake – Italy.

Delgado Rodrigues J., & Costa D. (2004). A New Method for Data Correction in Drill Resistance Tests for the Effect of Drill Bit Wear. International Journal for Restoration, 10, 1 –18.

Detournay E., & Defourny E. (1992). A Phenomenological Modle for the Drilling Action of Drag Bits. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 13-23.

Felicetti R. (2006). The Drilling Resistane Test For The Assessment of Fire Damaged Concrete. Cement & Concrete Composites, 321-329.

Fratini F., Rescic S., & Tiano P. (2006). A New Portable System for Determining the State of

Conservation of Monumental Stones. Materials and Structures(139-147(. DOI 10.1617/s11527-005-9013-8.

Gerbaud L., Menand S., & Sellami, H. (2006). PDC Bits: All Comes From the Cutter Rock Interaction. the IADC/SPE Drilling Conference held in Miami, 21-23 February. Florida, U.S.A.: SPE.

Hareland G., (2010).“A drilling rate model for roller cone bits and its application”, Presented at CPS/SPE International Oil & Gas Conference and Exhibition in China Held in Beijing, China, 8-10.

Hoferock L. L., & Bratcher G. J. (1996). A New Approach for Determining In-Situ Rock Strength While Drilling. Journal of Energy Resources Technology, 118, 249-255.

Kalantari S. Hashemalhosseini H. & Baghbanan A. (2018)“ Estimating Rock Strength Parameters Using Drilling Data” International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol. 104, pp. 45-52.

Kalantari S., Baghbanan A & Hashemalhosseini H. (2019)“ An analytical model for estimating rock strength parameters from smallscale drilling data”, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 135-145.

Karasawa H., Ohno T., Kosugi M., & Rowley J. C. (2002). Methods to Estimate the Rock Strength and Tooth Wear While Drilling With Roller-Bit Part 2 Insert Bits. Journal of Energy Resources Technology(133-139).DOI:10.1115/1.1482406#.

Karasawa H., Ohno T., Kosugi M., & Rowley J. C. (2002). Methods to Estimate the Rock Strength and Tooth Wear While Drilling With

- Roller-Bits Part 1 Milled-Tooth Bits. *Journal of Energy Resources Technology* (125-131). DOI: 10.1115/1.1482405#.
- Li Z., & Itakura K.-i. (2012). An Analytical Drilling Model of Drag Bits for Evaluation of Rock Strength. *The Japanese Geotechnical Society Soils and Foundations* (216-227). doi:10.1016/j.sandf.2012.02.002).
- Nakajima I., & Kinoshita S. (1979). Theoretical Studies on Cutting Force of Rock Fracture Mechanism in Rock Cutting. *Journal of the Mining and Metallurgical Institute of Japan*, 49-55.
- Ohno T., Karasawa H., Kosugi M., & Rowley, J. C. (2004). Proposed Practical Methods to Estimate Rock Strength and Tooth Wear While Drilling With Roller-Cone Bits. *Journal of Energy Resources Technology*, 302-310.
- Pamplona M., Kocher M., Snethlage R., & Barros L. A. (2007). Drilling Resistance: Overview and Outlook. *E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung*, D-70176, 158: 665-676.
- Pessier R.C., J., & Fear M. (1992). Quantifying Common Drilling Problems With Mechanical Specific Energy and a Bit-Specific Coefficient of Sliding Friction. 67th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers (pp. 373-388). Washington: SPE.
- Teale R. (1965). The Concept of Specific Energy in Rock Drilling. *Int. J. Rock Mech. Mining Sci*, 57-73.
- Tiano P., & Rescic S. (2004). New Diagnostic Tools For In-situ Evaluation of Conservative Treatments For Monumental Stones. *EAS Conference*, November 15 - 18. Somerset: NJ.
- Valentini E., Benincasa A., Tiano P., Fratini F., & Rescic S. (2008). On Site Drilling Resistance Profiles of Natural Stones. Italy: SINT Technology s.r.l.
- Warren T. M. (1987). Penetration Rate Performance of Roller Cone Bits. *SPE Drilling Engineering*, 9-18.
- Wojtanowicz A. K., & Kuru E. (1993). Mathematical Modeling of PDC Bit Drilling Process Based On a Single-Cutter Mechanics. (Vol. 115 - 247). *Journal of Energy Resources Technology*, (115). doi:10.1115/1.2906429.
- Wolcott D.S. R., & Bordelon D. (1993). Lithology Determination Using Downhole Bit Mechanics Data. 68th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers (pp. 769-778). Texas: Society of Petroleum Engineers.

پیوست ۱: نمونه جدول ثبت داده‌های مربوط به حفاری سوراخ‌ها در نمونه‌های مینا و کنترل سایش.

نمونه (Specimen)	پلاستر (Plaster)								
سرعت چرخش (Rotational Speed)	600 rpm								
سرعت نفوذ (Penetration Rate)	10 mm/min								
عمق سوراخ (Hole Depth)	10 mm								
قطر سوراخ (Hole Diameter)	5 mm								
مته حفاری (Drill Bit)	الماسه (Polycrystalline diamond)								
شماره سوراخ (Hole Number)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
مقاومت حفاری DR (1.5-10)	5.3	4.9	5.1	5.1	5.1	5.3	5.3	5.3	5.2
انحراف استاندارد St.Dev.	0.19	0.21	0.23	0.22	0.23	0.15	0.20	0.28	0.24
شاخص عدم همگنی INHD(%)	3.6%	4.3%	4.5%	4.3%	4.5%	2.9%	3.8%	5.3%	4.6%
تعداد داده هر سوراخ (Data per hole (m))	101								
تعداد داده‌های حذف شده (Discharge data(k))	14								
مقاومت حفاری DR (1.5-10)	5.2 N	مقاومت حفاری نمونه (Drilling Resistance of the Specimen)							
ضریب دقت (Precision Index)	0.2 N								
شاخص عدم همگنی INHD(%)	3.8%	ضریب غیر همگنی در طول عمق (Index of Non Homogeneity through Depth)							
فاکتور پوشش (Coverage Factor- k)	2								
فاکتور پوشش (Declaration of results)	DR=5.2±0.1 N	حد اطمینان 95% (confidence limit)							