

Evaluation of Methods for Estimating the Penetration Depth of Consolidant Material in Porous Materials of Historical Monuments

Mehdi Razani^{1*}, Leyli Nemani Khiavi²

1- Faculty of Cultural Materials Conservation, Tabriz Islamic Art University, P.O. Code: 5164736931, Tabriz, Iran.

2- Faculty of Conservation and restoration, Isfahan Art University, P.O. Code: 8173887681, Isfahan, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 06- 04- 2023

Accepted: 09- 10-2023

Available online: 30 -12-2023

Print ISSN: 2251-7278

Online ISSN: 2383-2223

DOR: 20.1001.1.22517278.1402.13.4.2.0

Keywords:

Conservation and restoration

Consolidating

Coating

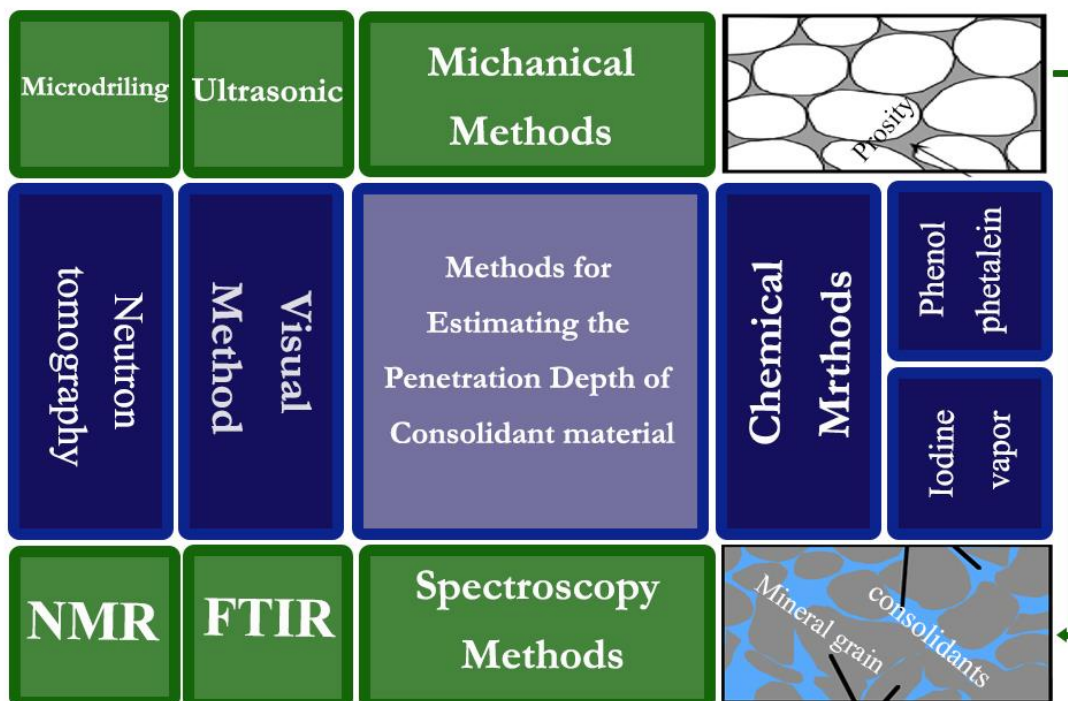
Materials

Porosity

Penetration depth

ABSTRACT

Consolidation is one of the most important processes for conservation and restoration, particularly for historical monuments. It is typically made of porous, heterogeneous, and complex materials such as stones, bricks, and mortars. The effectiveness of the consolidation process depends on various factors, including the inherent properties and degree of damage to the material, as well as the condition and method of application of the consolidating material. However, achieving sufficient penetration depth of the reinforcing material is a challenge and can negatively impact the efficiency and effectiveness of the used materials. This research investigates conventional methods for measuring the penetration depth of consolidating materials in porous substrates. This research investigates imaging and spectroscopy techniques for measuring the penetration depth of consolidating materials in porous substrates.



Corresponding author: m.razani@tabriziau.ac.ir



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



ارزیابی روش‌های تخمین عمق نفوذ ماده استحکام‌بخش در مصالح متخلخل یادمان‌های تاریخی

مهدی رازانی^{۱*}، لیلی نعمانی خیاوی^۲

۱- دانشیار، دانشکده حفاظت آثار فرهنگی، دانشگاه هنر اسالمی تبریز، تبریز، ایران، کدپستی: ۵۱۶۴۷۳۶۹۳۱.

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران، کدپستی: ۸۱۷۳۸۸۷۶۸۱.

چکیده

استحکام‌بخشی از مهم‌ترین اقدامات حفاظتی و مرمتی است که برای پایدارسازی آثار آسیب‌دیده و به‌خصوص یادمان‌های تاریخی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. عمدتاً سنگ‌ها، آجرها و ملاط‌ها مصالحی متخلخل ناهمگن و از لحاظ ترکیب شیمیایی پیچیده هستند و فرآیند استحکام‌بخشی آن‌ها به متغیرهای زیادی همچون خواص ذاتی، میزان آسیب‌دیدگی، ماده استحکام‌بخش و شرایط و روش اعمال ماده وابسته است. از طرفی مسئله عمق نفوذ ماده استحکام‌بخش چالشی در استفاده از مواد و بررسی کارایی و اثربخشی آن‌ها است. در این پژوهش روش‌های معمول برای سنجش میزان عمق نفوذ ماده پس از درمان ماده استحکام‌بخش در آثار متخلخل با رویکرد توصیفی-تحلیلی و با استفاده از منابع کتابخانه‌ای، مورد بررسی قرار گرفته است. این مقاله به بررسی روش‌های مختلف شیمیایی، مکانیکی، تصویری و طیف‌سنجی برای اندازه‌گیری عمق نفوذ مواد تثبیت‌کننده در مواد و مصالح متخلخل می‌پردازد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۷

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۲/۱۰/۰۹

شاپا چاپی: ۲۲۵۱-۲۲۷۸

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۲۲۳

DOR: 20.1001.1.22517278.1402.13.4.2.0

واژه‌های کلیدی:

حفاظت و مرمت

ماده استحکام‌بخش

پوشش دهی

مصالح

تخلخل

عمق نفوذ



۱- مقدمه

استحکام‌بخشی در دانش حفاظت و مرمت، اقدامی است که به منظور بازیابی و تقویت خواص مکانیکی ازدست‌رفته، با استفاده از پوشش‌های استحکام‌بخش^۱ انجام می‌گیرد. استحکام‌بخش‌ها، هر ماده (آلی یا معدنی) است که برای مقاوم‌سازی و استحکام دادن به لایه‌های متخلخل، شکننده و فرسوده‌ی یک ماده‌ی دیگر افزوده می‌شود (۱). استحکام‌بخشی فرآیندی در جهت تقویت آثاری است که انسجام آن‌ها ازدست‌رفته یا کاهش یافته است. پوشش دادن در حفاظت و مرمت آثار فرهنگی و تاریخی به‌ویژه مصالح متخلخل همانند: سنگ، آجر، بدنه‌های سرامیکی، نقاشی‌های دیواری و غیره سابقه‌ای نسبتاً طولانی دارد؛ مفهوم دقیق این عملکرد، تجدید پیوند میان ذراتی است که تضعیف شده، دچار ریزترک شده و یا توسط دیگر سازوکارهای تخریبی و هوازگی ازدست‌رفته‌اند (۲). تخریب مواد متخلخلی مانند سنگ‌ها، عمدتاً مربوط به فرآیندهای شیمیایی - فیزیکی است و نقطه‌ی آغاز تخریب‌ها زمانی است که آب (به شکل مایع یا بخار به درون ساختار وارد می‌شود و آب نفوذی عموماً در مرحله بعدی در ترکیب با سایر عوامل مخرب به‌صورت پیش‌رونده عمل می‌کند؛ می‌توان ماده استحکام‌بخش را درمان عمقی سنگی که پیوستگی و انسجام آن ازدست‌رفته و موجودیت فیزیکی آن به خطر افتاده تعبیر کرد. به‌نحوی که این درمان در مواردی اشباع کردن سطح سنگ هوازده و بخش قابل توجهی از لایه محکم زیرین است (۳) تا مجدداً با استفاده از مواد استحکام‌بخش به هسته سالم سنگ اتصال یابد و یکپارچگی خود را به دست آورد، در این صورت است که فرآیند استحکام‌بخشی موفقیت‌آمیز ارزیابی می‌شود (۱۳-۴). مصالح متخلخل، معمولاً دارای ساختاری ناهمگن و پیچیده هستند که در قسمت تخریب‌شده از نظر قابلیت جذب، تخلخل، ترکیب و غیره با بخش سالم تفاوت دارند. انتخاب ماده استحکام‌بخش مناسب، الزامی بااهمیت بالا در روند درمان محسوب می‌شود، که به‌خوبی در قسمت‌های آسیب‌دیده نفوذ کند و به‌طور همگن در داخل ماتریکس آسیب‌دیده، توزیع شود (۵، ۱۶-۱۴) اگر به مسئله استحکام‌بخشی از منظر حفاظت نگاه شود، یوکیلهتو در باب آثار فرهنگی، حفاظت را مفهومی کلیدی، حاکی از فرآیندی که مشتمل بر انواع عملیات لازم برای صیانت از میراث فرهنگی است، دانسته و معتقد است، حیطة این قبیل عملیات ممکن است بسته به نوع میراث (اثر، سازه، محوطه) تغییر کند (۱۷). پیش اقدام لازم برای حوزه‌ی حفاظت سنگ شامل شناخت ویژگی‌های ساختاری سنگ، شناخت گونه‌ی آسیب و عوامل آن، توسعه درمان‌های حفاظتی، اقدام پیشگیرانه، ارزیابی اثربخشی درمان‌ها و موضوعات دیگر تقسیم‌بندی می‌شود و این مشکلات و مسائل موجود، یافتن راه‌حل و متغیرها را ضروری می‌گرداند. می‌توان گفت مهم‌ترین اقدام قبل از مداخلات حفاظتی تشخیص است و هر اقدام بعدی، نشئت‌گرفته از آن خواهد بود (۱۸، ۱۵).

آن‌چنان‌که واضح و مبرهن است، استحکام‌بخشی مداخله‌ای برگشت‌ناپذیر است و اگر ماده استحکام‌بخش در عمق مناسب نفوذ نکند، خطر تخریب سریع و از بین رفتن آثار تاریخی ارزشمند وجود دارد (۶، ۷). اهمیت و نقش کلیدی نظارت بر عمق نفوذ در ارزیابی کارکرد استحکام‌بخشی سنگ به دنبال این توصیف مشخص خواهد شد. با توجه به اهمیت میراث تاریخی و فرهنگی، اقدامات درمانی به‌ویژه مبتنی بر استحکام‌بخشی و تثبیت برای اطمینان از بقای آثار روبه‌زوال مانند مواد متخلخل موردتوجه قرار می‌گیرند (۹-۱۲). روش‌های غیرتهاجمی و غیر مخرب، که قادر به بررسی ساختارهای متخلخل و مشخص‌سازی محل عامل ماده استحکام‌بخش باشند، برای ارزیابی وضعیت حفاظت و کارایی درمان‌ها موردنیاز است. در یک مفهوم گسترده، گزارش‌شده است که درمان‌های مبتنی بر استحکام‌بخشی، زمانی مؤثرتر هستند که مقدار نسبتاً زیادی پلیمر بتواند نفوذ کند و در ساختار به‌طور یکنواخت باقی بماند (۲۰، ۱۹). در ارزیابی کارایی ماده استحکام‌بخش برای سنگ‌های تاریخی به‌ویژه انواع کربناته که به علت فراوانی و سهولت در شکل‌پذیری، بیشترین تعداد آثار تاریخی سنگی را شامل می‌شود و به‌مراتب بیشتر از سایر سنگ‌ها موردپژوهش قرار می‌گیرد، در تعیین عمق نفوذ ماده، مشکلاتی وجود دارد و برطرف کردن این معضل، امری ضروری در موضوع استحکام‌بخشی و درمان سنگ است چراکه این مسئله میزان موفقیت درمان را مشخص خواهد نمود. هدف این مقاله مقایسه و شرح روش‌هایی است که بر اساس آن می‌توان تخمینی نسبتاً دقیق از عمق نفوذ مواد در بدنه‌های متخلخل به دست آورد و بر این مبنا کارایی، قابلیت اطمینان و اهمیت روش‌های مختلف سنجش عمق نفوذ مواد استحکام‌بخش در درمان سنگ‌های یادمان متخلخل را تشریح نمود.

۲- عوامل تأثیرگذار بر عمق نفوذ و ضرورت سنجش

میزان نفوذ

آنچه در امر حفاظت اهمیت دارد، آشنایی با ساختار ماده مورد مرمت، آسیب‌شناسی، عوامل ایجاد آسیب و عملیات درمان است. بدیهی است که قبل از هرگونه اقدام درمانی، ضروری است تا آسیب‌شناسی صورت پذیرفته و در ادبیات این مبحث که شامل شناخت آسیب و تعیین عمق آسیب است، دقیق شد (۲۱) تخریب شامل دو نوع درونی و بیرونی است که هرکدام شامل چند زیر بخش اعم از عوامل ذاتی، ویژگی سازه‌ای، عوامل مرتبط با اتمسفر و فعالیت‌های انسانی هستند (۳) تخریب‌ها معمولاً در دو گروه ماکرو و میکرو قائل تقسیم‌بندی هستند که بدون چشم مسلح و با چشم مسلح قابل مطالعه‌اند و شیوه برخورد و مطالعه‌ی هرکدام از آن‌ها منحصربه‌فرد است. یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب سنگ‌ها که از

¹ Consolidant coating

ویژگی‌های ذاتی (بافت، ساخت، ترکیب کانی‌شناسی، میزان تخلخل، شکل پذیری و غیره)، موقعیت زمین‌شناسی (شیب، ارتفاع محل از سطح دریا، ویژگی‌های توپوگرافی منطقه)، شرایط اقلیمی و آب و هوایی و همچنین عوامل انسانی بر آن مؤثرند (۲۸-۲۶). گراسجر (۲۹-۳۱) در بررسی آخرین تئوری‌های هوازدهی می‌نویسد برخی تأثیرات جداگانه در گروه‌های هوازدهی فیزیکی، شیمیایی، یا بیولوژیکی مدنظر هستند اما مهم‌ترین سازوکارها دارای عواملی چندگانه و به همدیگر وابسته‌اند با این تفاسیر، عوامل ذکر شده باعث افزایش خلل و فرج بیشتر درون بافت سنگ شده و عواملی مانند آب و نمک‌های محلول درون بافت سنگ و نفوذپذیری سنگ را افزایش می‌دهد (شکل ۱).

۲- روش اعمال مواد ماده استحکام‌بخش در سطوح متخلخل

برای اعمال ماده استحکام‌بخش روش‌های مختلفی به کار گرفته می‌شوند، که اثرات گوناگونی روی بدنه تحت درمان دارند و باید هنگام اتخاذ شیوه اعمال، با در نظر گرفتن عوامل مختلف و با پیش‌بینی‌های لازم انتخاب کرد. برای مثال روش اعمال مویرگی، هنگامی که ماده استحکام‌بخش از سطح زیرین اثر وارد آن می‌شود، تأثیر منفی در ظاهر آن ایجاد نمی‌کند اما ممکن است به‌صورت نامحسوس باعث افزایش وزن اثر شود و دوام شیمیایی آن نیز در وهله اول به‌صورت تئوری قابل پیش‌بینی است اما نتایج دقیق نیازمند انجام مراحل آزمایشگاهی است. اما آنچه واضح و مبرهن است، مسئله قابلیت درمان مجدد و برگشت‌پذیری است که این عمل تقریباً به‌طور کامل اقدامی برگشت‌ناپذیر بوده و در صورت اقدام برای خروج ماده استحکام‌بخش به احتمال زیاد آسیب جدی به سطح تحت درمان وارد خواهد شد لذا باید قبل از هر اقدامی به‌طور کامل مطالعه و بررسی انجام داد. همچنین روشی مانند پاشش، باعث کدورت سطح یا تزیینات احتمالی موجود خواهد شد که می‌تواند به‌عنوان آسیب جانبی حین حفاظت محسوب گردد (جدول ۱).

۳- روش‌های سنجش عمق نفوذ ماده استحکام‌بخش

حفاظت و مرمت آثار و اشیاء سنگی اغلب با آغشته‌سازی با مواد استحکام‌بخش آغاز می‌شود عمق اشباع دهی مواد استحکام‌بخش عاملی کلیدی برای ارزیابی کارایی درمان است و بسته به ساختار داخلی مواد سنگی و خواص محصولات حفاظتی متفاوت خواهد بود (۳۲). با این حال، برای ارزیابی اثربخشی چنین درمان‌هایی، باید حرکت و توزیع مواد در داخل سنگ مشخص شود. روش‌های اندازه‌گیری که در گذشته مورد بررسی قرار گرفته‌اند، عمدتاً به دلیل نیاز به ابزار دقیق یا به دلیل ناکارآمدی آن‌ها در مورد برخی از ماده استحکام‌بخش‌ها به‌طور گسترده در تحقیقات فنی و عملیات حفاظتی مورد استفاده قرار نگرفته‌اند (۲۳).

سطحی‌ترین نقطه آن شروع شده و در طول ساختار پیش می‌رود، تخمین میزان پیشرفت هوازدهی است که در بحث درمان و ماده استحکام‌بخش (در صورت لزوم) بسیار ضروری خواهد بود. این مطالعه عمدتاً در دو گروه کمی و کیفی قابل انجام است که به ترتیب شامل اندیس‌های شیمیایی، خصوصیات مکانیکی، خصوصیات فیزیکی، بررسی میدانی^۱ و آزمون‌های کیفی درجا و مطالعات کانی‌شناسی است (۲۲، ۲۳).
در برخی منابع برای تخمین و اندازه‌گیری میزان هوازدهی رابطه ۱ پیشنهاد شده است (۲۴).

$$TWD = aCWD + bPWD (\%) \quad (1)$$

aCWD: درجه هوازدهی شیمیایی و وزن آن و bPWD: درجه هوازدهی فیزیکی و وزن آن را مشخص می‌نماید.

با توجه به آنکه هوازدهی فیزیکی و شیمیایی سنگ هم‌زمان اثراتی را بر خواص مکانیکی بر جای می‌گذارند از این برآیند می‌توان با محاسبه موارد فوق در سنگ نرخ هوازدهی کلی سنگ را تعیین نمود و با در نظر داشتن فرآیند تخریب و هوازدهی به‌عنوان مهم‌ترین عامل تخریب حوزه آثار سنگی، دریافت که شناخت سازوکار آن گامی مهم در جهت تعیین و انتخاب روش حفاظتی است. با اینکه در طی دهه‌های گذشته سازوکارهای مختلفی برای حفاظت آثار سنگی طراحی و اجرا شده است اما همچنان حفاظت آثاری که در فضای باز قرار دارند امری ضروری و چالش‌برانگیز است. اگر بتوان اعمال ماده استحکام‌بخش را به‌عنوان یک درمان حفاظتی نگریست، می‌توان عوامل تأثیرگذار در میزان نفوذ ماده را در موارد زیر تعریف کرد:

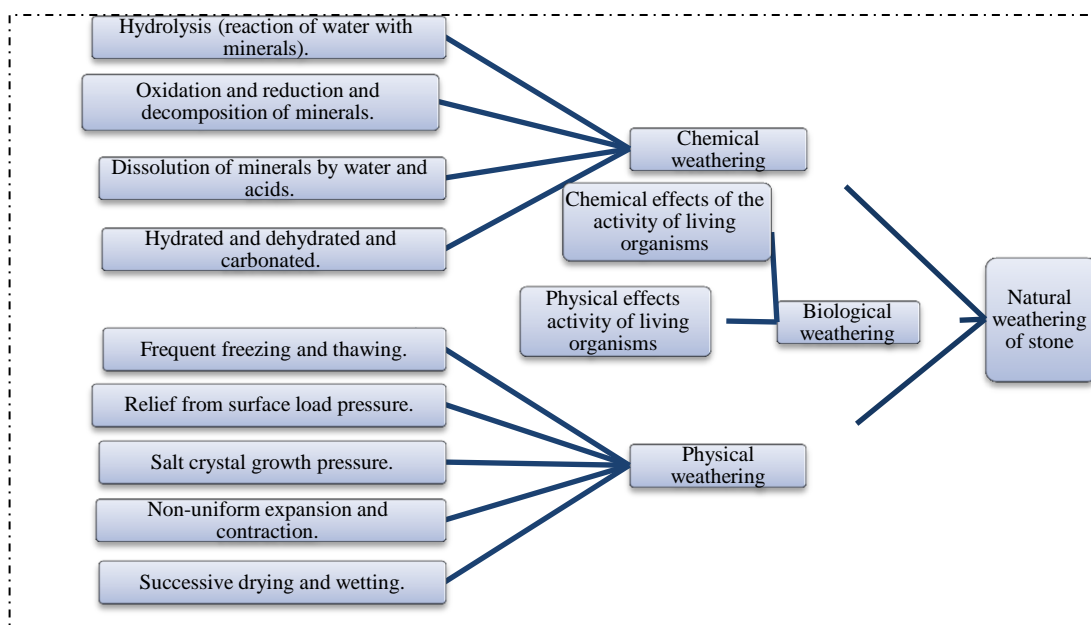
۱- تخلخل و تراکم و ساختار لوله‌های موئین

اندازه منافذ و توزیع ذرات سنگ، گرچه عمدتاً در تعیین پایداری و مقاومت سنگ مؤلفه‌های مهمی به شمار می‌آید اما میزان تخلخل می‌تواند در میزان نفوذ دادن یک ماده یا امکان تبخیر آب موجود در ساختار، یک ویژگی مثبت نیز به شمار آید (۱۵). یکی از مهم‌ترین علل تخریب سنگ‌ها، برهم‌کنش آب موجود در منافذ و تخلخل‌ها با ساختار سنگ است که می‌توان با خارج کردن آب موجود از ساختار و جایگزینی با ماده استحکام‌بخش، به چرخه‌ی تخریب خاتمه داد. میزان موفقیت نفوذ ماده در سنگ‌های متخلخل را می‌توان با نسبت جذب آب و انتقال آن توجیه کرد زیرا که طبق پژوهش‌های ودکاینند و همکارانش، میزان جذب و انتقال در سنگ، به میزان تخلخل کلی و تخلخل مؤثر و میزان توزیع و شعاع حفرات وابسته است (۱۵).

۲- میزان و نوع هوازدهی و عمق تخریب

سرعت و میزان هوازدهی در نقاط مختلف سنگ، متفاوت است و

¹ Field survey



شکل ۱: مهم‌ترین گونه‌های هوازدگی طبیعی در سنگ (۳۰).

Figure 1: The most important types of natural weathering in stone (30).

جدول ۱: مقایسه روش‌های مختلف اعمال مواد استحکام‌بخش.

Table 1: Comparison of different methods of applying strengthening materials.

Reversibility	Chemical durability	Physical effects	Appearance	Method of application
Irreversibility	It varies depending on the type of substance and the depth of penetration and concentration	Slight weight gain	Possible color change	Capillary absorption
Irreversibility	It varies depending on the type of substance and the depth of penetration and concentration	Slight weight gain	Surface opacity	brush
Possible reversibility without direct intervention	Due to coating with a coating such as cotton, the rate of penetration is higher and as a result, it lasts longer.	The possibility of the substance remaining on the decorations	Remaining traces of the applied material on the reinforced body	poultice
Irreversibility	There is a possibility of more surface evaporation.	Distortion of possible surface decorations	Surface opacity	Spray or sprinkle
Irreversibility	Due to the depth of the actions, the stability is more.	Visual damage and weight gain	Creating holes on the treated body	Injection
Irreversibility	Placing all aspects of the effect inside the material makes the action last longer.	Weight gain and substance remaining on the body	Remaining of the reinforcing material on the reinforced body	Immersion
Irreversibility	Due to the complete penetration inside the samples, the depth of penetration is high.	Slight weight gain	Polishing and layer formation on the surface	Immersion with vacuum suction

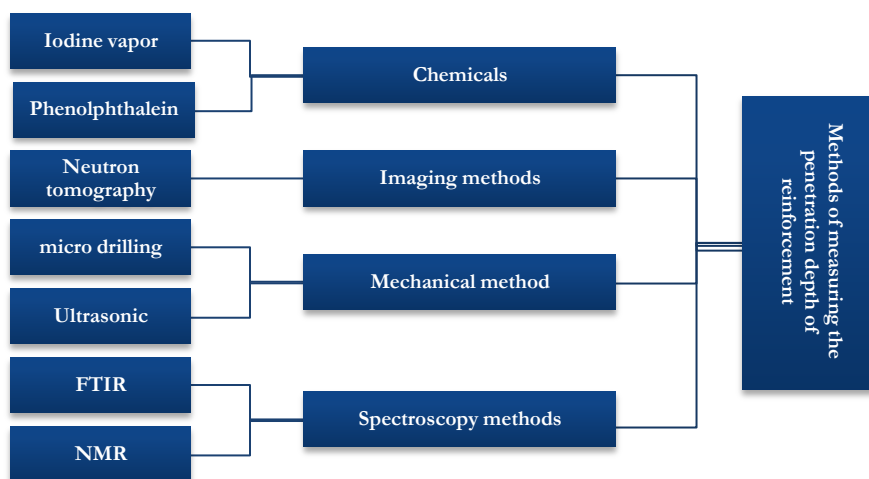
می‌گذارد. با توجه به این ویژگی بخار ید، تصور می‌شد که در صورت حفاظت سنگ، ممکن است بتوان محل ماده استحکام‌بخش‌ها را در سنگ تجسم کرد. از آنجایی که بخار ید جذب نشده و با سنگ‌آهک واکنش نشان نمی‌دهد، جذب بخار ید روی پلیمرهایی که اغلب برای نواحی یکپارچه استفاده می‌شوند، به صورت رنگ زرد یا قهوه‌ای روشن ظاهر می‌گردد و ناحیه استحکام بخشی نشده را بدون تغییر می‌گذارد و می‌توان بسیاری از مشکلات مربوط به تخمین محل ماده استحکام‌بخش‌ها در سنگ‌آهک و احتمالاً انواع دیگر سنگ‌های متخلخل را نیز حل کرد.

مهم‌ترین روش‌های گزارش شده در بخش عمق نفوذ در شکل ۲ آمده است که در ادامه به صورت مجزا شرح داده خواهند شد.

۳-۱- مواد شیمیایی

-تخمین عمق نفوذ با استفاده از بخار ید

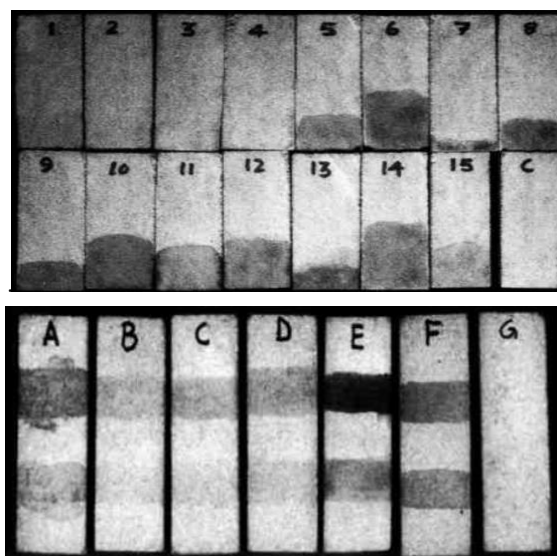
بخار ید، اغلب در زمینه کروماتوگرافی لایه‌نازک برای شناسایی ترکیبات آلی استفاده می‌شود. از نظر فیزیکی روی سطح بسیاری از ترکیبات آلی جذب شده و رنگ زرد یا قهوه‌ای روشن تولید می‌کند. کمپلکس رنگی که تشکیل می‌شود عموماً برگشت پذیر است و پس از تجزیه کمپلکس و تبخیر ید، ماده را بدون تغییر شیمیایی باقی



شکل ۲: نمودار تقسیم‌بندی روش‌های مختلف سنجش عمق نفوذ ماده استحکام‌بخش در مصالح متخلخل (نگارندگان).

Figure 2: Classification diagram of different methods of measuring the penetration depth of the reinforcing material in porous materials.

ماده می‌توان در علوم میراث فرهنگی نیز بهره جست و برای شناسایی میزان عمق نفوذ استحکام‌بخش‌هایی که خاصیت قلیایی دارند، بسیار کاربردی است. به عنوان مثال، می‌توان از نمونه‌های مطالعاتی خاویز بسرا و همکارانش (۳۵) یاد کرد که با ماده کلسیم هیدروکسید، تحت عمل استحکام‌بخشی قرار گرفته‌اند و برای سنجش میزان عمق نفوذ، آزمایش در دو مرحله ابتدای درمان و ۲۰ روز پس از درمان انجام گرفته است.



شکل ۳: الف) میزان نفوذ استحکام‌بخش سنجیده شده با روش بخار ید ب) طیف رنگی ایجاد شده مربوط به غلظت‌های مختلف استحکام‌بخش اعمال شده روی سنگ (۳۴).

Figure 3: a) The amount of reinforcement penetration measured by the iodine vapor method, b) The created color spectrum related to different concentrations of the reinforcement applied on the stone (34).

نتایج آزمایش انجام شده برای سنجش عمق نفوذ ماده استحکام‌بخش در سنگ آهک با استفاده از بخارید توسط کومار و گینل در سال ۱۹۹۷ نشان داد که روش پیش رو در مقایسه با سایر روش‌های ممکن، برای تعیین عمق نفوذ یک ماده کارا تر باشد. برای بیشترین اثربخشی، سنگ مورد آزمایش باید رنگ روشن داشته باشد و غلظت تثبیت شده در سنگ باید حداقل ۱ درصد وزنی باشد. مشاهدات تجربی گزارش شده نشان می‌دهد که روش بخارید سریع، ساده برای استفاده، قابل اتکا، ارزان و دقیق برای تعیین عمق نفوذ و توزیع استحکام‌بخش در سنگ نسبت به روش‌های در حال استفاده است. روش کار این‌گونه است که پس از تبخیر حلال‌ها و عمل‌آوری مواد ماده استحکام‌بخش، نمونه‌ها به موازات جهت جذب مویرگی برش داده شده و بر روی پایه در محفظه شیشه‌ای در داخل هود بخار قرار می‌گیرند. سپس بلورهای ید با دقت در پایین محفظه شیشه‌ای قرار داده شده و درب شیشه‌ای محفظه محکم بسته می‌شود تا بخارید خارج نشود. نمونه‌ها به مدت ۵ تا ۱۰ دقیقه در محفظه بخارید باقی‌مانده و در هر قسمتی از نمونه که جذب صورت گرفته، در عرض ۲-۵ دقیقه رنگ زرد ظاهر می‌شود. در اینجا ذکر این نکته مهم است که زمان قرار گرفتن در معرض ید باید برای برخی از غلظت‌های ماده استحکام‌بخش کمی طولانی‌تر باشد. اگر زمانی که آزمایش انجام می‌شود یک ماده تثبیت‌کننده به‌طور کامل جذب نشود، ممکن است رنگ زرد برای مدت طولانی‌تری باقی بماند (شکل ۳) (۳۴).

-تخمین عمق نفوذ با استفاده از فنل فتالئین

فنل‌فتالئین، نوعی شناساگر است که برای شناسایی محیط اسیدی از بازی به کار می‌رود. به طوری که اگر چند قطره از این ماده در محیط‌های بازی اضافه شود، بلافاصله رنگ آن تبدیل به ارغوانی می‌شود و اگر در محیط اسیدی باشد، بی‌رنگ باقی می‌ماند. از این

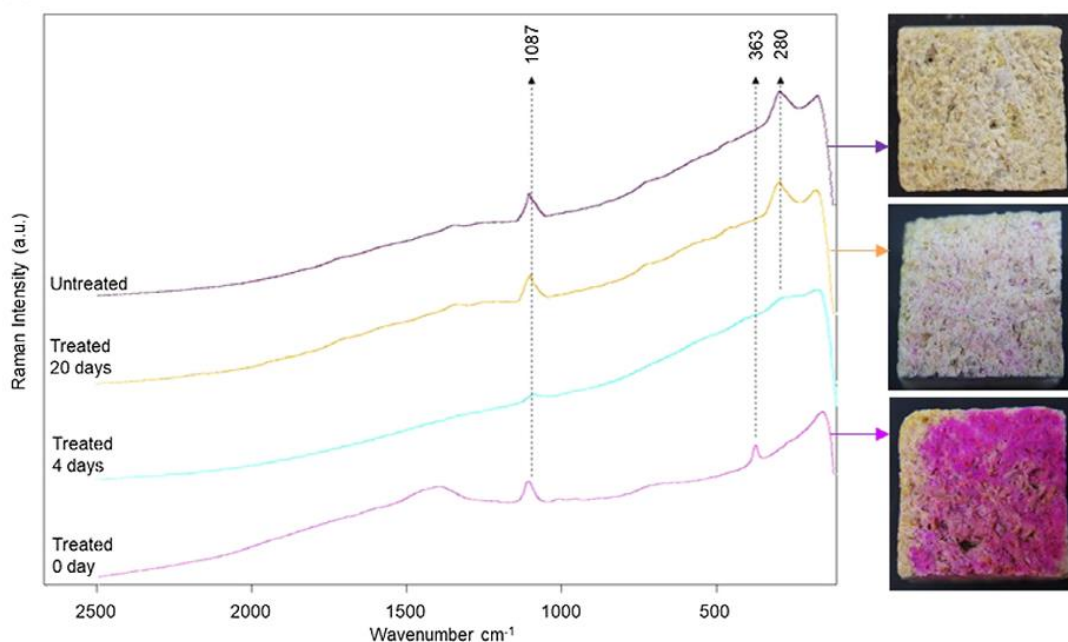
سنگ‌های متخلخل، آجر یا چوب است. روش توموگرافی نوترونی معمولاً شامل ثبت رادیوگرافی نوترونی با زمان نمایش مشخص (با واحد ثانیه) است که نمونه‌ها در امتداد محور عمودی می‌چرخند. می‌توان چنین بیان کرد، که این روش رویکردی روش‌شناختی جدید برای ارزیابی درمان‌های حفاظتی است. اثربخشی این رویکرد برای ارائه اطلاعات در مورد مقدار فازهای تازه تشکیل شده و توزیع آن‌ها در یک فضای سه‌بعدی نشان داده می‌شود. این ارزیابی کمی، با سایر روش‌های تحلیلی تاکنون به دست نیامده است. می‌توان گفت اساس آن، به دست آوردن اطلاعات در مورد یک تیمار خاص متمرکز نیست، اما نشان‌دهنده اثبات مفهومی در مورد امکان ارزیابی اثرات نفوذ یک تیمار معدنی در یک سنگ متخلخل، میزان فازهای تازه تشکیل شده و عمق به‌دست‌آمده آن‌ها است (۳۸، ۳۹). کاربرد دیگر این روش در تخمین میزان هوازدگی سنگ‌های آسیب‌دیده با استفاده از میزان نفوذ آب است که در مطالعات رانری و همکارانش، انجام شده است. آن چنان‌که از نتایج این مطالعه مشخص است، عمق نفوذ آب در سنگ‌هایی که دچار هوازدگی نشده‌اند، نسبت به نمونه هوازده بیشتر است اما سرعت نفوذ آب در نمونه متخلخل و هوازده بسیار بیشتر گزارش شده است. شکل ۵ نتایج حاصل از نفوذ آب در ساختار سنگ را نشان می‌دهد که با استفاده از روش توموگرافی نوترونی به‌دست‌آمده است (۴۰).

هنگامی که ماده به‌تازگی روی سطح اعمال شده بود، به علت بازی بودن محیط ماده کاملاً به رنگ ارغوانی تغییر می‌کند و پس از گذشت ۲۰ روز و اعمال مجدد فنل فتالین، تغییر رنگ محسوسی روی سطح رخ نمی‌دهد که نشان‌دهنده نفوذ ماده به داخل بافت سنگ بوده است. (شکل ۴) (۳۶-۳۳). پژوهش دیگری که توسط باغبانان و همکارانش در بهبود خواص استحکام‌بخش‌ها در سنگ‌های ضعیف جهت استفاده در موج‌شکن‌ها انجام شده است، برای ارزیابی میزان نفوذ آب‌آهک در سنگ لوماشل، پس از اعمال فنل فتالین، سطح سنگ‌های درمان شده را با آب مقطر مرطوب کرده و سپس از جهت مقطع عرضی به فنل فتالین آغشته نمودند که میزان تغییر رنگ فنل فتالین به رنگ ارغوانی، میزان نفوذ ماده را نشان می‌دهد (۳۷).

۲-۳- روش‌های تصویری

-تخمین عمق نفوذ با روش توموگرافی نوترونی

نوترون‌ها به‌طور قابل‌توجهی با عناصر سبک برهم‌کنش می‌کنند و عمدتاً توسط هیدروژن پراکنده می‌شوند و به تصاویر قابل‌تشخیص کنتراست می‌دهند. مشخص شده است که این ویژگی برای تجسم محصولات حاوی هیدروژن در داخل یک بستر متخلخل بسیار مفید هستند. تصویربرداری نوترونی، یک دید کلی از انتشار محصولات و بینش عمیق در مورد تعامل بین محصول و بستر بلوری ارائه می‌کند و ابزار مؤثری برای تعیین جذب و توزیع آب در داخل ماده و همچنین شناسایی عمق نفوذ محصولات حفاظتی غنی از هیدروژن در



شکل ۴: طیف رامان از سطح سنگ‌آهک تیمار نشده و با نانو ذرات $\text{Ca(OH)}_2/\text{ZnO}@APTMS$ (A) و تصاویر آزمایش فنل فتالین انجام‌شده بر روی نمونه سنگ‌آهک تیمار نشده و تیمار شده با نانو ذرات $\text{Ca(OH)}_2/\text{ZnO}@APTMS$ در ۰ و ۲۰ روز خشک شدن (B) (۳۵).

Figure 4: Raman spectra of the limestone surface untreated and treated with $\text{Ca(OH)}_2/\text{ZnO}@APTMS$ nanoparticles (A), and pictures of the phenolphthalein test performed on a limestone sample untreated and treated with $\text{Ca(OH)}_2/\text{ZnO}@APTMS$ nanoparticles at 0 and 20 days of drying (B) (35).

سیستم اندازه‌گیری نیروی دریل زن ("XE سیستم اندازه‌گیری نیروی دریل‌زنی")^۱ نیز مشهور است یک روش مفید با حداقل تخریب ("XE تخریب") برای ارزیابی وضعیت سنگ و ماده استحکام‌بخش سنگ است (۴۶، ۴۴-۴۲، ۱۶). این سیستم شامل یک مته قابل حمل، یک سر مته سرامیکی و یک حسگر برای اندازه‌گیری نیروی لازم برای پیشروی سر مته (در سنگ) به مقدار معین است.

در مطالعه گرازیانی و همکارانش، توموگرافی نوترونی برای تعیین عمق نفوذ و همگنی توزیع یک ماده تثبیت‌کننده معدنی مبتکر بر اساس تشکیل هیدروکسی آپاتیت استفاده شد و توزیع مواد به‌طور همگن در بستر سنگ تحت درمان اثبات گردید. شکل ۵ و ۶ رادیابی ماده فسفاتی درون ساختار سنگ را نمایش می‌دهد (۳۹).

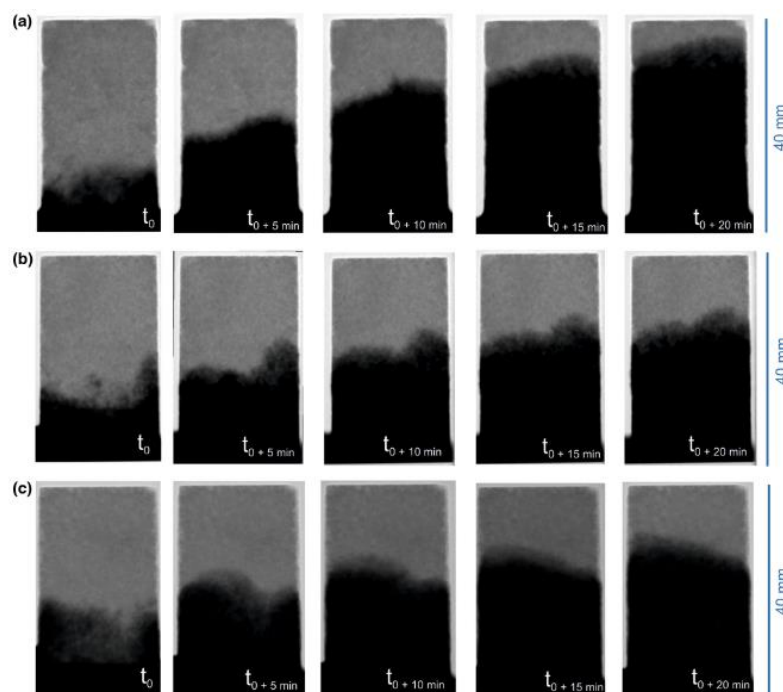
۳-۳- روش مکانیکی

تخمین عمق نفوذ با روش میکرو دریل

توسعه و کاربرد سیستم اندازه‌گیری مقاومت سنجی سنگ توسط دریل زنی ("XE مقاومت‌سنجی سنگ توسط دریل‌زنی")^۱ که به

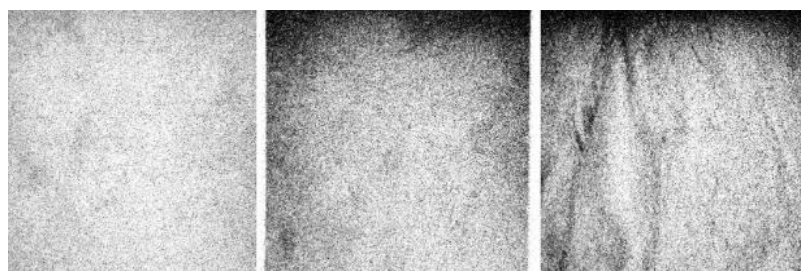
¹ Drilling Resistance Measurement System (DRMS)

² Drilling Force Measurement System (DFMS)



شکل ۵: نمونه‌هایی از توموگرافی نوترونی نرمال شده در مراحل زمانی انتخاب شده در طول جذب آب مویرگی توسط سنگ‌های ماسه سنگ‌آهکی محوطه تاریخی سابوسینا: یک نمونه بدون هوازدگی (a) و نمونه‌هایی که در معرض چرخه‌های هوازدگی مصنوعی b8 و c15 قرار گرفتند. مناطق خاکستری روشن شرایط خشک را نشان می‌دهد، در حالی که مناطق خاکستری تیره شرایط اشباع را نشان می‌دهد (۳۹).

Figure 5: Examples of normalized neutron tomography at selected time steps during capillary water absorption by calcareous sandstones of the Sabusina historical site: an unweathered sample (a) and samples subjected to artificial weathering cycles b8 and c15. Light gray areas indicate dry conditions, while dark gray areas indicate saturated conditions (39)

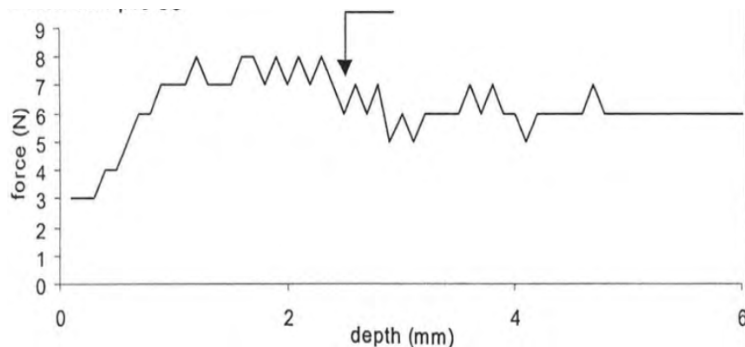


شکل ۶: مناطق تیره‌تر مربوط به تضعیف نوترون است و حضور محصول تثبیت‌کننده غنی از هیدروژن را اثبات می‌کند (۳۹).

Figure 6: Darker areas are related to neutron attenuation and prove the presence of hydrogen-rich stabilization product (39).

ρ = تخلخل را نشان می‌دهد، $M1$ = وزن سنگ درمان‌نشده را نشان می‌دهد، $M2$ = وزن سنگ درمان شده را مشخص می‌کند، $M3$ = وزن سنجش شده حین استحکامبخشی را مشخص می‌کند. در نتیجه مطالعات انجام شده می‌توان بیان کرد که این روش، نتیجه صحیح و قابل‌اعتمادی از عمق نفوذ ماده استحکامبخش در سنگ‌های مختلف ارائه می‌دهد.

از پژوهش‌های انجام شده می‌توان به پروژه‌ی یک گروه اروپایی که به ارزیابی تعدادی از روش‌های استحکامبخشی از جمله هیدروکسید باریم پرداخته است اشاره کرد که نشان می‌دهد در سنگ‌های متخلخل آهکی که با هیدروکسید باریم درمان شده‌اند مقاومت دریل زنی به عمق ۲ سانتیمتر ارتقا یافته است که این امر بدان معنی است که استحکامبخش حداقل تا ۲ cm تحکیم لایه‌ها را در پی داشته است (۴۶). روش سنجش با مقاومت حفاری، اگرچه مخرب است، اما مزیت بزرگی که دارد، در محل بدون نمونه‌برداری از هسته اثر قابل‌اجرا است. پژوهش‌های انجام‌گرفته توسط دلگادو رودریگز و همکارانش، در حوزه مقاومت سنجی با استفاده از دریل زنی میکرو، موارد قابل‌توجهی از سنجش میزان مقاومت آثار سنگی و ملاط هستند. شکل ۹ نشان‌دهنده‌ی مقاومت حفاری نمونه ملاط آهکی درمان شده با نانو آهک در مقابل نمونه درمان‌نشده را نشان می‌دهد و میزان مقاومت بیشتر نمونه درمان شده در عمق ۲ تا ۵ میلی‌متری به‌وضوح قابل‌مشاهده است (۴۲). شکل ۱۰ نیز نشان‌دهنده میزان مقاومت سنگ‌های درمان شده آهکی با استفاده از اتیل سیلیکات را در مقابل سنگ‌های درمان‌نشده نشان می‌دهد (۴۷).



شکل ۸: مقایسه بین نیروی ایجادشده با میزان عمق نفوذ را نشان می‌دهد و همچنان‌که مشخص است قسمت فلش، ایجاد خمش در مغز استحکامبخشی نشده را نشان داده است. (۴۲)

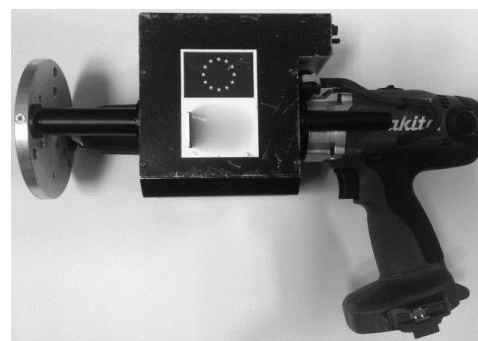
Figure 8: It shows the comparison between the created force and the depth of penetration, and as it is clear, the arrow part has shown the creation of bending in the unreinforced brain (42).

در اصل، سیستم DFMS ("XE سیستم DFMS") یک روش میدانی است که با کمترین تخریب (یک سوراخ ۳ میلی‌متری) می‌تواند عمق آسیب و عمق نفوذ ("XE عمق نفوذ") مواد ماده استحکامبخش را اندازه‌گیری کند. (شکل ۷). اساس کار به این صورت است که رابطه بین مقاومت در مقابل حفاری (DR) سنگ و تخلخل آن بررسی می‌شود.

نتیجه این مطالعه، به‌صورت محاسبه یک رابطه مشتق ریاضی به دست می‌آید و عدد حاصل میزان تخلخل موجود در سنگ را نشان می‌دهد. در اجرای آزمایشگاهی این روش مکعب‌های $5 \times 5 \times 5$ cm سنگ‌برش داده شده و تحت حفاری با میکرو دریل قرار می‌گیرند. از آنجایی‌که مقاومت حفاری سنگ متأثر از سختی مواد معدنی تشکیل‌دهنده آن است (۴۴).

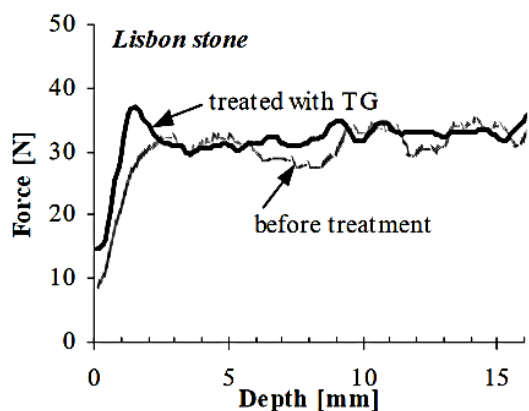
می‌توان میزان تخلخل بستر را سنجید و اهمیت آن حین استحکامبخشی به این شکل مشخص می‌شود که ماده استحکامبخش بانفوذ به درون بافت متخلخل، باعث پر شدن منافذ موجود شده و مقاومت سنگ را در مقابل حفاری ارتقا می‌بخشد. فرمول محاسبه میزان تخلخل به شکل نشان داده شده در فرمول ۲ است که در حالت مقایسه‌ای بین دو نوع سنگ درمان شده و درمان‌نشده موردسنجش قرار می‌گیرد (شکل ۸).

$$\rho = \left(\frac{M2-M1}{M2-M3} \right) 100 \quad (45)$$



شکل ۷: اندازه‌گیری مقاومت سنجی سنگ توسط سیستم دریل زنی (۵۸).

Figure 7: Measurement of rock resistivity by drilling system(58).



شکل ۱۰: مقاومت میکرو حفاری توسط اتیل سیلیکات قبل و بعد از اعمال با برس بر روی سنگ لیسبون (۴۷).

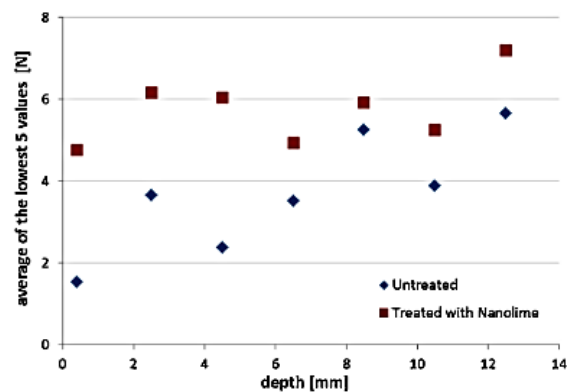
Figure 10: Micro-drilling resistance by ethyl silicate before and after brush application on Lisbon stone (47).

تخلخل وجود دارد و سرعت پالس فراصوت از نظر ساختار و بافت نشانگر خوبی برای آسیب سنگ‌های کربناته است (۵۰). ارتباط تغییرات در خواص سنگ در نتیجه تخریب با سرعت مافوق صوت می‌تواند نظام‌های طبقه‌بندی را برای ارزیابی میزان تخریب سنگ فراهم کند. سرعت امواج فراصوت در سنگ تحت تأثیر درجه اشباع آب منافذ است. این اندازه‌گیری‌ها اطلاعات مفیدی در مورد ویژگی‌های فضای منافذ و تراکم ترک‌های باز سنگ ارائه می‌کنند. ناهمسانگردی نمونه‌های سنگ بر اساس رابطه ۳ محاسبه می‌شود (شکل ۱۱).

$$A = \frac{(V_{p_{max}} - V_{p_{min}})}{V_{p_{max}}} \times 100 \quad (3)$$

A: سرعت ناهم‌سان‌گرد، $V_{p_{max}}$: بیشینه سرعت فراصوت در سه جهت و $V_{p_{min}}$: حداقل سرعت فراصوت در سه جهت را مشخص می‌کند.

این روش می‌تواند وضعیت هوازگی سنگ‌های کربناته را با حالت مقایسه‌ای بین داده‌های مواد جدید با داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌های انجام‌شده بر روی سنگ‌های قدیمی منعکس کند، حتی زمانی که اثرات تخریب چندان مشهود نیست و آسیب محدود به تشکیل ریزترک‌ها در داخل سنگ است. مهم‌تر از همه می‌توان با امواج فراصوت تغییرات جزئی در تخلخل سنگ و تغییرات حجمی را که برای چشم قابل مشاهده نیست و نشان‌دهنده آغاز فرآیند زوال است را نیز تشخیص داد. در واقع یک همبستگی منفی قوی بین سرعت موج P و تخلخل برای هر دو نمونه تحت گرمایش و سرمایش مکرر ایجاد می‌شود که برای اهداف پیشگیرانه و نظارتی بسیار مفید و ابزاری قدرتمند در طراحی آزمایش خواهد بود (۵۰-۵۲).

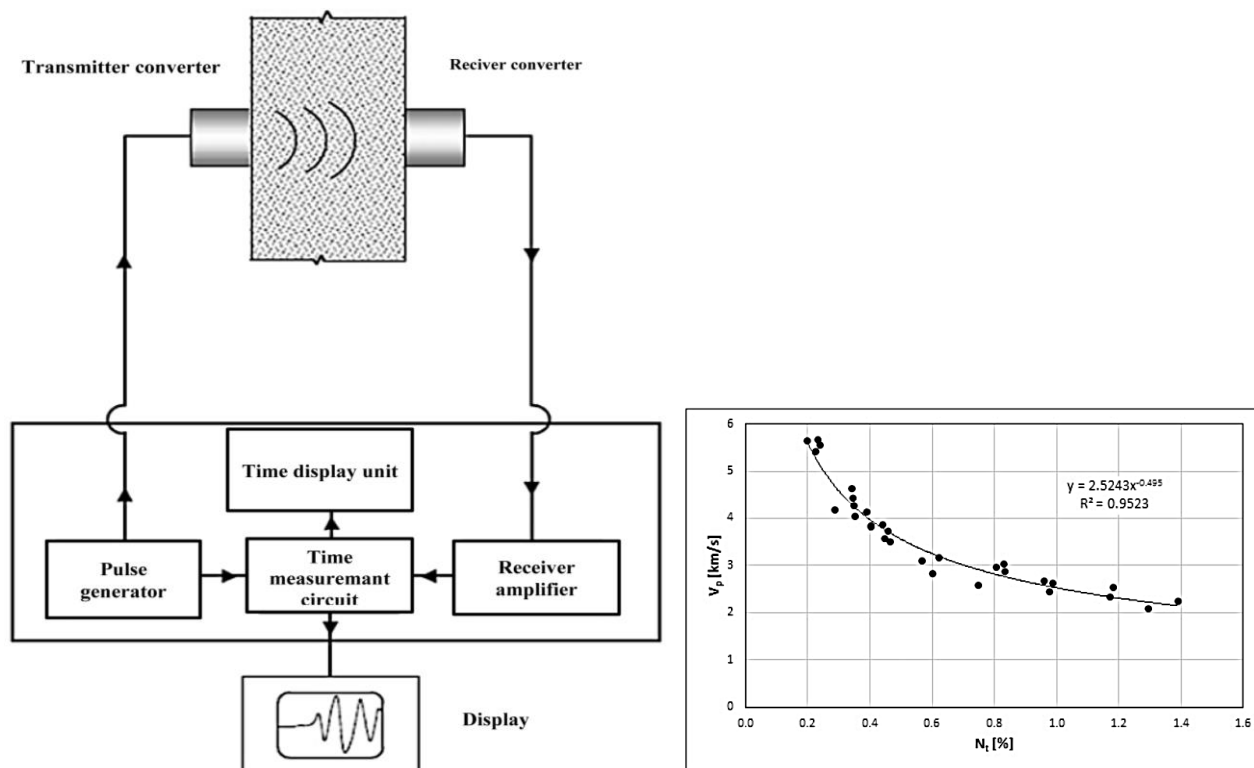


شکل ۹: مقاومت دریل زنی در ملاط آهک قبل و بعد از درمان با نانو آهک (۴۲).

Figure 9: Drilling resistance in lime mortar before and after treatment with nanolime (42).

-تخمین عمق نفوذ با استفاده از روش فراصوت

اطلاعات به‌دست‌آمده حاصل از روش تصویربرداری سه‌بعدی، برای توصیف فرآیندهای دینامیکی داخلی (به‌عنوان مثال، مشخص نمودن حرکت آب و نمک، تأثیر تغییرات دما و/یا رطوبت نسبی) در سنگ، ملاط، آجر و بتن کاربرد دارد. درک شبکه منافذ سه‌بعدی (مورفولوژی، تخلخل باز یا بسته، اندازه، اتصال و غیره) در داخل سنگ‌ها و تعیین کمیت چنین شبکه‌هایی نه‌تنها برای توصیف سنگ‌ها بلکه برای ارزیابی میزان زوال آن بسیار حائز اهمیت است. (۴۸) روش سنجشی فراصوت مبنی بر تصویرسازی سه‌بعدی، یک روش غیر مخرب است که معمولاً برای ارزیابی غیرمستقیم برخی از عوامل ژئومکانیکی سنگ‌های طبیعی به کار می‌رود. انتشار پالس موج در مواد سنگی نه‌تنها به خواص فیزیکی (چگالی، کشش، تخلخل و محتوای آب) بستگی دارد بلکه بر روی عناصر و آرایش آن‌ها، توزیع فضایی و جهت‌گیری ترجیحی آن‌ها نیز مؤثر است. در مقابل، سرعت امواج فراصوت می‌تواند وضعیت حفاظت از سنگ را در مقایسه با داده‌های مواد تازه و داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌های انجام‌شده بر روی مواد تخریب‌شده منعکس کند (۵۲-۵۰). از دهه پنجاه میلادی قرن گذشته، از شیوه غیر مخرب فراصوت به‌طور گسترده‌ای برای بررسی و ارزیابی وضعیت سنگ، استفاده‌شده است (۵۶). روش عمدتاً مبتنی بر انتشار امواج فراصوت از طریق سنگ و اندازه‌گیری سرعت حرکت آن‌ها است. سرعت امواج فراصوت به خواص اینرسی و کشسانی سنگ بستگی دارد. دومی تا حد زیادی تحت تأثیر اثرات زوال مانند توسعه ترک‌ها، افزایش تخلخل و کاهش مقاومت مکانیکی قرار می‌گیرد (۴۹). نتایج تجربی نشان داده است که سرعت پالس فراصوت با افزایش آسیب سنگ تحت فرآیندهای سریع پیرسازی کاهش می‌یابد: یک همبستگی منفی قوی بین سرعت موج P و



شکل ۱۱: الف) تصویر شماتیک عملکرد دستگاه ایجادکننده فراصوت، ب) رابطه بین سرعت پالس فراصوت و میزان تخلخل (۵۶).

Figure 11: a) Schematic illustration of the operation of the ultrasonic generating device, b) Relationship between ultrasonic pulse speed and porosity (56).

موجی $4100-500 \text{ cm}^{-1}$ و با وضوح 4 cm^{-1} و در 64 میکرومتر ثابت شدند که وضوح فضایی حدود 50 متر مربع بود. پس از اعمال استحکام‌بخش مورد نظر، آنالیزهای FTIR برای بررسی عمق نفوذ بسترهای سیلیکاته انجام شد. که بهترین نتیجه در محدوده عدد موجی 2800 تا 3000 cm^{-1} قابل مشاهده بود. در بین طیف‌هایی که از این طریق به دست آمد، در محدوده‌ی 2978 ، 2930 و 2894 طیف نوارهای استحکام‌بخش بلافاصله بعد از اعمال ماده قابل مشاهده است. نقطه b نشان داده شده در شکل ۱۴ نیز در محدوده موجی 1300 تا 1500 cm^{-1} سیگنال‌های واضحی را نشان می‌دهد. به عبارتی با این روش آنالیز، می‌توان از طیف‌های به‌دست آمده به حضور و یا عدم حضور استحکام‌بخش در نمونه درمان شده در محل موردنظر دسترسی پیدا کرد در این مطالعه علاوه بر روش FTIR از طیف‌سنجی رامان نیز استفاده شده است که نشان می‌دهد این روش می‌تواند برای پیگیری عمق نفوذ ماده استحکام‌بخش کربنات کلسیم در بسترهای مبتنی بر کربنات کلسیم استفاده شود (۵۳).

- تخمین عمق نفوذ با روش رزونانس مغناطیسی هسته‌ای (NMR)

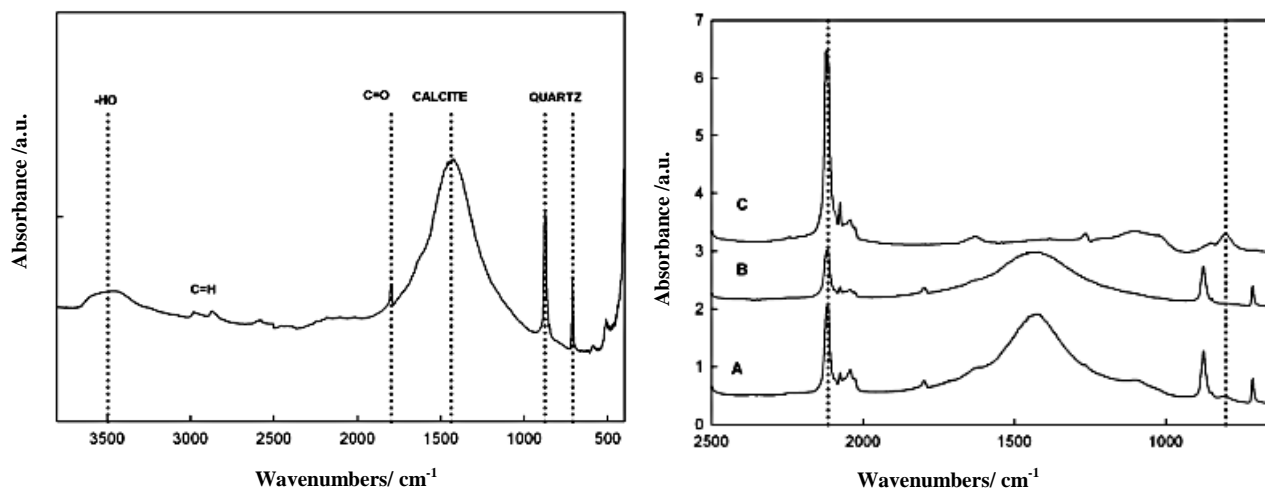
امروزه NMR به‌عنوان روش سنجش در حفاظت آثار تاریخی، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.

۴-۳- روش‌های طیف‌سنجی

-تخمین عمق نفوذ با روش طیف‌سنجی فراسرخ (FTIR)

تجزیه و تحلیل FTIR را می‌توان در انتقال با عبور تابش IR از نمونه بیان کرد. این روش از بازده انرژی و حساسیت بالا بهره می‌برد. نمونه‌ها در مواد پودری غیرفعال IR پراکنده شده و به‌صورت گلوله یا لایه‌های نازک بین پنجره‌های شفاف IR تهیه می‌شوند. نمونه‌های مات را می‌توان بدون هیچ گونه آماده‌سازی در بازتاب آنالیز کرد. این روش بر این اصل استوار است که وقتی یک پرتو تابشی از دو محیط مختلف عبور می‌کند، با توجه به نسبت ضریب شکست دو ماده به پرتوهای بازتابی و ارسالی در نسبت‌های مختلف تقسیم می‌شود از مطالعاتی که در این حوزه انجام شده است، می‌توان به پژوهش‌های آل‌مورایمت گیل و همکارانش اشاره کرد که بر روی تعیین کمی نفوذ ماده استحکام‌بخش سیلیسی بر روی سنگ آهک انجام شده است که یک روش تحلیلی مستقیم و بدون معرف برای تعیین کمیت تثبیت‌کننده تعریف شده است. طبق نمودار شکل ۱۲ و ۱۳ نتیجه فرآیند، همبستگی و حساسیت رضایت بخشی را نشان داد (۵۱).

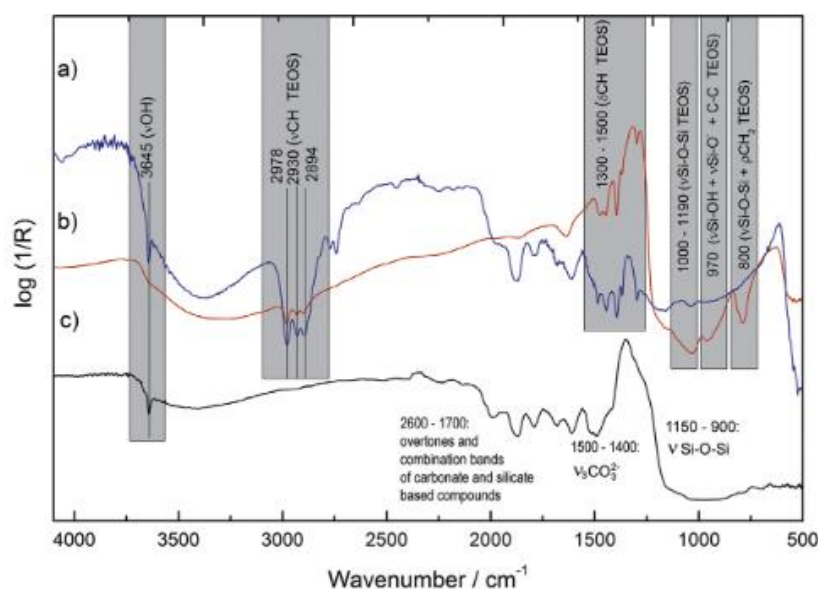
در پژوهش دیگری که در قالب پروژه Heromat FP7 برای ارزیابی عمق نفوذ مواد استحکام‌بخش در سنگ‌های کربناته از روش FTIR استفاده شد که طیف‌ها در حالت بازتابی در محدوده عدد



شکل ۱۲: جذب طیف فروسرخ سنگ تیمار نشده در برومید پتاسیم (۵۱).

Figure 12: Infrared spectrum absorption of untreated stone in potassium bromide (51).

شکل ۱۳: نماینده طیف جذب فروسرخ فریسیانید پتاسیم و سنگ تثبیت‌شده، (B) سنگ و (C) ماده استحکام‌بخش در برمید پتاسیم (۵۱).
Figure 13: Representative infrared absorption spectra of potassium ferricyanide and (A) stabilized stone, (B) stone and (C) consolidating agent in potassium bromide(51).



شکل ۱۴: طیف FTIR از (الف) استحکام‌بخش سیلیکاتی مخلوط شده با بستر سیلیکات، (ب) استحکام‌بخش خالص، و (ج) بستر سیلیکات (۵۳).

Figure 14: FTIR spectra of (a) silicate consolidant mixed to silicate substrate, (b) pure consolidant, and (c) silicate substrate (53).

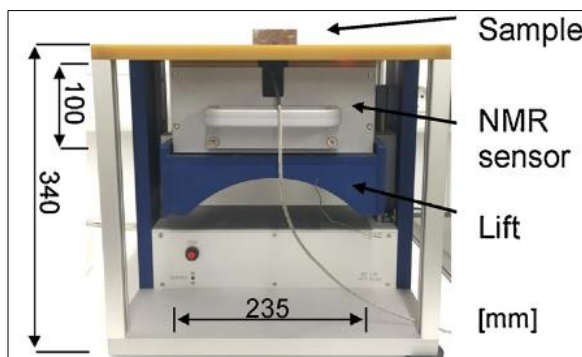
اطلاعاتی در مورد کارایی عوامل آب‌گریز اعمال‌شده بر روی سنگ به صورت غیر مخرب و وابسته به عمق دریافت کرد. علاوه بر این، فرآیندهای انتقال آب از سطح به قسمت‌های داخلی سنگ را می‌توان تخمین زد. با این کار می‌توان بررسی کرد که منطقه دافع آب تا چه مدت از جذب آب جلوگیری می‌کند و لایه آب‌گریز در طول زمان چقدر کارآمد است (۵۴). در واقع، NMR می‌تواند خواصی مانند تخلخل، توزیع اندازه منافذ و ترشوندگی سطح را قبل و بعد از

این شیوه یک روش اندازه‌گیری غیرمخرب و غیرتهاجمی است که از مولکول‌های آب به عنوان شاخصی برای بررسی مصالح ساختمانی متخلخل و میزان ورود عامل استحکام‌بخش در بستر، برای ارزیابی وضعیت حفاظت و کارایی تیمارها استفاده می‌کند. از آنجایی که آب یکی از فراوان‌ترین ترکیبات شیمیایی در مواد متخلخل است، با تکنیک NMR می‌توان سست شدن هسته‌های هیدروژن را در داخل منافذ سنگ‌های طبیعی بررسی کرد. به همین دلیل می‌توان

که در آن N تعداد انتقال دامنه در عمق است و xk و $wk/2$ به ترتیب طول و مختص مؤلفه k در نقطه عطف هستند، Δk نصف عرض انتقال دامنه از پایین است. به ارزش بالا طول در نقطه عطف xk عمق نفوذ درمان است. مقدار xk پایین مربوط به عمق نفوذ کم تیمار است، درحالی‌که مقدار xk بالا مربوط به عمق نفوذ زیاد تیمار است (شکل ۱۵) (۵۴، ۵۵).

۳- مقایسه روش‌های مختلف سنجش عمق نفوذ

روش‌های مختلف ارزیابی سنجش عمق نفوذ طبق عوامل مختلفی قابل تقسیم‌بندی هستند که می‌توانند در شرایط ویژه انتخاب و یا رد شوند. برآیند نهایی نشان می‌دهد که برای هر یک از بافت‌های مواد و متخلخل و عمدتاً سنگی، طبق شرایط ویژه خود، می‌تواند یک یا چندین روش از آن‌ها را درگیر کند که در این خصوص متغیرهای فراوانی نظیر نوع ماده استحکام‌بخش، نوع بافت بستر، انجام پذیر بودن و قابلیت دسترسی و سنجش، تعیین‌کننده شرایط هستند. جدول ۲ خلاصه‌ای از این تقسیم‌بندی را به صورت مختصر ارائه نموده است.



شکل ۱۵: حسگر NMR در تنظیمات آزمایشگاهی (۵۴).
Figure 15: NMR sensor in laboratory setup (54).

عملیات حفاظتی بررسی کند. به‌طور خاص، سیگنال H-NMR می‌تواند به مقدار آب در فضای منافذ و در شرایط مساعد، به‌اندازه منافذی که مولکول‌های آب در آن محدود شده‌اند، مرتبط باشد. با استفاده از گرادیان میدان مغناطیسی، NMR همچنین می‌توان خود انتشار مولکولی مولکول‌های مایع را به‌صورت عمده و محدود به منافذ مطالعه کرد. یکی از مهم‌ترین مزایای این روش، قابلیت انجام در محیط آزمایشگاه و هم در محل با ابزار فشرده، قابل حمل و کم‌هزینه است (۵۴، ۸۰). والریا دی. تولیو و همکارانش و کیین و همکارانش (۵۴، ۵۵) به‌طور مجزا بر روی عمق نفوذ عوامل درمانی، اثر آب‌گریز و تغییرات در تخلخل باز ناشی از تیمارها مطالعه کرده و ناهمگنی‌های فیزیکی و شیمیایی بین لایه‌های درمان شده توف و لایه‌های زیرین نیز شناسایی نمودند و برای سنجش میانگین شعاع منافذ و اتصال متقابل منافذ به‌دست‌آمده با عوامل درمانی، از اندازه‌گیری‌های انتشار NMR برای مقایسه اثرات تیمارهای مختلف تثبیت‌کننده و/یا محافظ بر روی سنگ استفاده کردند و جنبه‌های مربوط به مقدار آب جذب‌شده، تحرک آب و توزیع و انتشار آب در ساختار متخلخل را مورد بررسی قرار داده و تقویت خواص آب‌گریز را مشاهده نمودند. در این روش برای بررسی اثر درمان بر جذب مویرگی آب در زمان t_i به‌عنوان درجه حفاظت توسط مویرگی (PDci) تعریف شده است و مطابق با استاندارد EN 16581:2013 مطابق رابطه ۴ قابل محاسبه است:

$$PD_{ci}(100) = 100 (Q_{b,t_i} - Q_{a,t_i}) / Q_{b,t_i} \quad (4)$$

Q_{b,t_i} مقدار آب جذب‌شده توسط سنگ بکر، Q_{a,t_i} مقدار آب جذب‌شده توسط سنگ درمان شده و t_i واحد زمان را مشخص می‌کند.

عوامل شیمیایی- فیزیکی مانند بازده آب‌گریز (HE)، عمق نفوذ x_{kr} و شیب در نقطه عطف طبق فرمول ۵ محاسبه خواهند شد:

$$f(x) = \sum_{k=1}^n \frac{wk}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{xk-x}{\sqrt{2\Delta k}} \right] + q_0 \quad (5)$$

جدول ۲: مقایسه روش‌های سنجش عمق نفوذ.

Table 2: Comparison of penetration depth measurement methods.

Depth measurement method	Interpretability	Accuracy in measurement	Time	Cost
Iodine vapor	Can be interpreted by an expert operator	Qualitative and quantitative results	Results in a short time	Affordable
Phenolphthalein	Can be interpreted by an expert operator	Qualitative and quantitative results	Results in a short time	Affordable
FTIR	Need operator	A little more detailed result	Results in a short time	Average cost
NMR	Need operator	A little more detailed result	Results in a short time	High cost
Neutron tomography	Need operator	Qualitative and more detailed result	Results in relatively high time	High cost
Ultra Sonic	Need operator	Qualitative and more detailed result	Results in relatively high time	Average cost
Microdrill	Can be interpreted by an expert operator	Qualitative and quantitative results	Results in relatively high time	Average cost

آن است. مهم‌ترین تقسیم‌بندی برای روش‌های موجود را می‌توان در چهار دسته طیف‌سنجی، تصویربرداری مینا، مکانیکی و استفاده از مواد شیمیایی خلاصه نمود. روش‌هایی مبنی بر سینکروترون نیز، می‌تواند با توجه به دقت سنجشی بالا در طیف‌سنجی و تصویربرداری متمرکز باشند که شامل چند طیف برای اهداف مختلف است. بر طبق معرفی و تشریح‌های انجام‌شده از هر روش، به نظر می‌رسد می‌توان با محاسبه میزان عمق نفوذ ماده استحکام‌بخش کمک شایانی به حفاظت از این‌گونه میراث فرهنگی در راستای اولویت‌بندی حفاظتی نمود زیرا عدم دقت بر این موارد و نبود چنین اولویت‌هایی موجب بروز ایرادات و مشکلات بسیاری در امر حفاظت و مرمت خواهد گردید. در نهایت بر آیند مطالعات انجام گرفته نشان می‌دهد (۱) مبحث سنجش میزان عمق نفوذ مواد استحکام‌بخش در یادمان‌های متخلخل، در بحث عملی و تئوری نیازمند مطالعاتی بیشتری است و فارغ از مباحث تئوری مرتبط با ماده و نفوذ می‌تواند در رابطه با مباحث مربوط به مبانی نظری مرمت از آثار فرهنگی و تاریخی ورود کرده و با تدقیق این موضوع در رابطه با کنترل عمق نفوذ نسبت به کارهایی و بهره‌برداری بهینه از آنها اقدام نمود بخصوص اینکه مباحثی مانند تجدد و درمان مجدد نیز می‌توانند زیر این موضوع طرح گردیده و به عنوان فازهای مطالعاتی جدید مورد بررسی قرار گیرند.

تقدیر و تشکر

این مقاله با حمایت‌های مادی و معنوی دانشگاه هنر اصفهان و دانشگاه هنر اسلامی تبریز به انجام رسیده است از این‌رو از دست‌اندرکاران این دو موسسه علمی سپاسگزاری می‌گردد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

دسته‌ای از این روش‌ها امکان اجرای سریع‌تر، در دسترس‌تر و قابل اجرا در محیط غیرآزمایشگاهی و تخصصی را ارائه می‌دهند اما بالطبع میزان دقت اندازه‌گیری و سنجش آن‌ها نیز با خطای بیشتری مواجه است. استفاده از معرف‌ها و مواد شیمیایی در این دسته قرار می‌گیرند. سایر موارد سنجش عمق نفوذ که با استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی انجام می‌شود علی‌رغم هزینه‌بر بودن داده‌های قابل استنادی را ارائه می‌کنند. به علاوه شایان ذکر است برخی روش‌ها هر آزمون نیازمند تکرار در سطوح مختلف است که خود منجر به افزایش نرخ نهایی آنالیز خواهد شد. جدول ارائه‌شده و روش‌های معرفی شده، نماینده تمام روش‌های موجود نبوده و تنها به معرفی و مقایسه‌ی روش‌هایی پرداخته شده است که بیشترین استفاده و تکرار را در بین پژوهش‌های انجام‌شده داشته‌اند.

۴- نتیجه‌گیری

ارائه راهکار مناسب درمانی، از مهم‌ترین مسائل موردتوجه در رابطه با حفاظت از آثار، سازه‌ها و یادمان‌های با مصالح متخلخل است؛ اما آنچه در پس تمامی اقدامات نهان است، ارزیابی، سنجش و پایش اقدامات انجام‌گرفته است از این‌رو شناخت انواع روش‌های سنجشی و سازوکارهای آن که هرکدام با نتایج متفاوتی ظهور می‌یابند، گام مهمی در جهت درمان آثار محسوب می‌گردد. در طی چند دهه گذشته روش‌های متعددی برای سنجش میزان نفوذ ماده معرفی و به کار گرفته شده است که مبنای تقسیم‌بندی آن‌ها نوع ابزار یا مواد مورد استفاده و یا نوع نتیجه‌ی نهایی حاصله از آن است. تعدد و تنوع روش‌های معمول در ارزیابی سنجش عمق نفوذ ماده استحکام‌بخش در آثار سنگی، برای حفاظت گران، چالش بزرگی را ایجاد کرده است که در پی آن، ضرورت معرفی و مقایسه هر یک از روش‌های موجود مشخص می‌شود. علاوه بر آن متخصصان همواره به دنبال راهی برای حصول بهترین و کارآمدترین نتیجه هستند. مهم‌ترین معیار در انتخاب یک روش برای سنجش میزان نفوذپذیری، غیرمخرب بودن

۵- مراجع

1. Xarrié i Poveda M. El llenguatge de la conservació-restauració d'obres d'art. 2015.
2. ASTM, E2167-01, 2008 Ginell, ASTM International, Wessel WSD, Searles C. Standard Guide for Selection and Use of Stone Consolidants. West Conshohocken, PA, 2008.
3. Amoroso J, Fasina J, stone wear and protection, atmospheric pollution, cleaning, strengthening and protection. 1983, Translator: Rasul vatan-Dost, Tehran: Cultural Heritage (In Persian)
4. Slavíková M, Krejčí F, Žemlička J, Pech M, Kotlík P, Jakůbek J. X-ray radiography and tomography for monitoring the penetration depth of consolidants in Opuka—the building stone of Prague monuments. J Cult Herit. 2012;13(4):357-64. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.01.010>
5. Bayer K. Možnosti hodnocení efektivity konsolidace poréznych anorganických materiálů. Padesát let používání organokřemičitanů na území České republiky, Proceedings of ICOMOS. 2008:35-42.
6. Pinto AF, Rodrigues JD. Stone consolidation: The role of treatment procedures. J Cult Herit. 2008;9(1):38-53. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2007.06.004>.
7. Sneathlge R, Wendler E. Chemical conservation of stone structures. Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry electronic release 2001.
8. Brizi L, Camaiti M, Bortolotti V, Fantazzini P, Blümich B, Haber-Pohlmeier S. One and two-dimensional NMR to evaluate the performance of consolidants in porous media with a wide range of pore sizes: Applications to cultural heritage. Microporous and Mesoporous Materials. 2018 1:269:186-90. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2017.08.014>

9. Striegel MF, Guin EB, Hallett K, Sandoval D, Swingle R, Knox K, Best F, Fornea S. Air pollution, coatings, and cultural resources. Progress in organic coatings. 2003 1;48(2-4):281-8. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2003.05.001>
10. Cai H, Liu X. Freeze-thaw durability of concrete: ice formation process in pores. Cement and concrete research. 1998;28(9):1281-7. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00103-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00103-3)
11. Hutchinson AJ, Johnson JB, Thompson GE, Wood GC, Sage PW, Cooke MJ. Stone degradation due to wet deposition of pollutants. Corros Sci. 1993;34(11):1881-98. [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(93\)90025-C](https://doi.org/10.1016/0010-938X(93)90025-C)
12. Sanjurjo-Sánchez J, Alves C. Decay effects of pollutants on stony materials in the built environment. Environ Chem Lett. 2012; 10:131-43. <https://doi.org/10.1007/s10311-011-0346-y>
13. Vallet JM, Gosselin C, Bromblet P, Rolland O, Vergès-Belmin V, Kloppmann W. Origin of salts in stone monument degradation using sulphur and oxygen isotopes: First results of the Bourges cathedral (France). J Geochem Explor. 2006; 88(1-3):358-62. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2005.08.075>
14. Scherer GW, Wheeler GS. Silicate consolidants for stone. In Key Engineering Materials. Trans Tech Publications Ltd, 2009.
15. Doehene E, Price CA. Stone Conservation – An overview of current research. Second edition. Getty Publications; the Getty Conservation Institute: Los Angeles (CA), 2010.
16. Pinto AF, Rodrigues JD. Stone consolidation: The role of treatment procedures. J Cult Herit. 2008;9(1):38-53. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2007.06.004>
17. Jokilehto J. History of architectural conservation. Routledge; 2007.
18. Rodrigues JD. Basic steps in conservation interventions Multidisciplinary and interdisciplinary requirements, Charisma international course in stone conservation Lisbon, May 7th- 18th, 2012.
19. Kamke FA, Lee JN. Adhesive penetration in wood—a review. Wood and Fiber Science. 2007 27:205-20.
20. Christensen M, Kutzke H, Hansen FK. New materials used for the consolidation of archaeological wood—past attempts, present struggles, and future requirements. J Cult Herit. 2012;13(3):S183-90. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.02.013>
21. Abdullahi M, Asgharizadeh S, Razani M. A review of the use of synchrotron radiation in archaeological sciences. Archaeological research. 6 (1). 2019. 155-174. <https://doi.org/10.29252/jra.6.1.155> (In Persian).
22. Ceryan S, Tudes S, Ceryan N. A new quantitative weathering classification for igneous rocks. Environ Geol. 2008; 55:1319-36. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-1080-4>
23. Topal T, Sözmen B. Deterioration mechanisms of tuffs in Midas monument. Engineering Geology. 2003;68(3-4):201-23. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00228-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00228-4)
24. Razani M, Baghbanan A, Emami SMA. A review of the methods of determining the rate and estimation of weathering depth in volcanic tuffs, the 11th conference on the restoration of historical and cultural monuments and decorations related to architecture, March 2013. Historical and Cultural Monuments Restoration Research Institute Cultural Heritage Research Institute and Tabriz University of Islamic Art (In Persian)
25. López-Doncel R, Wedekind W, Dohrmann R, Siegesmund S. Historical building stones of Guanajuato, Mexico: weathering, properties and restoration. In 12th International Conference on the deterioration and conservation of Stones, Extend abstracts book 2012.
26. Feyz niya S, Dastourani J, Ahmadi H, Ghoddousi J. Investigating sensitivity to erosion and sediment yield of formations in Gorgan Drainage basin Journal of the Iranian Natural Res., Vol. 61, No. 1, 2008, pp. 13-27 (In Persian)
27. Memariyan H. Geology and geotechnical engineering. Tehran University: Tehran. 2013 (In Persian)
28. Hunt RE. Geotechnical engineering investigation handbook. Crc Press; 2005 Apr 12.
29. Grassegger G. Decay mechanisms of natural building stones on monuments-A review of the latest theories. Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen, Hamburgo, Libri BOD. 1999:54-81.
30. Sedaghat MH. Physical geology (first volume: external processes). Tehran: Payam Noor University (in Persian).
31. Razani M, Nemani khiyavi L. A Review of Consolidation of Stone with Nanotechnology. JI Stud Color World, 2022; 10(3), 55-64. <https://dori.net/dor/20.1001.1.22517278.1399.10.3.5.0> (In Persian).
32. Cnudde V, Dierick M, Vlassenbroeck J, Masschaele B, Lehmann E, Jacobs P, Van Hoorebeke L. Determination of the impregnation depth of siloxanes and ethylsilicates in porous material by neutron radiography. J Cult Herit. 2007 1;8(4):331-8. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2007.08.001>
33. Tamer T. The use of methylene blue adsorption test to assess the clay content of the Cappadocian tuff. In 8th= eighth international congress on deterioration and conservation of stone, Berlin, 30 Sept.-4 Oct. 1996: proceedings 1996 (pp. 791-799).
34. Kumar R, Ginell WS. A new technique for determining the depth of penetration of consolidants into limestone using iodine vapor. Journal of the American Institute for Conservation. 1997 Jan 1;36(2):143-50. <https://doi.org/10.1179/019713697806373181>
35. Becerra J, Ortiz P, Martín JM, Zaderenko AP. Nanolimes doped with quantum dots for stone consolidation assessment. Construction and Building Materials. 2019 28;199:581-93. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.077>
36. Borsoi G, Lubelli B, van Hees R, Silva AS. Optimization of nanolime solvent for the consolidation of coarse porous limestone. Appl. Phys. A. 2016;122:1-0. <https://doi.org/10.1007/s00339-016-0382-3>.
37. Bakhshi B, Mohammadi M, Al-hosseini H. Investigation of different improvers on the properties of weak stones. Marine engineering scientific-research journal. 2018 10;13(26):35-45 (In Persian)
38. Possenti E, Conti C, Gatta GD, Merlini M, Realini M, Colombo C. Synchrotron radiation μ X-ray diffraction in transmission geometry for investigating the penetration depth of conservation treatments on cultural heritage stone materials. Anal Methods. 2020;12(12):1587-94. <https://doi.org/10.1039/D0AY00010H>
39. Conti C, Colombo C, Festa G, Hovind J, Cippo EP, Possenti E, Realini M. Investigation of ammonium oxalate diffusion in carbonatic substrates by neutron tomography. J Cult Herit. 2016;19:463-6. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2015.12.005>
40. Raneri S, Barone G, Mazzoleni P, Rabot E. Visualization and quantification of weathering effects on capillary water uptake of natural building stones by using neutron imaging. Appl. Phys. A. 2016;122:1-9. <https://doi.org/10.1007/s00339-016-0495-8>
41. Lotzmann S, Sasse HR. Drilling resistance as an indicator for effectiveness of stone consolidation. Astm Special Technical Publication. 1999; 1355:77-89.
42. Leroux L, Vergès-Belmin V, Costa D, Delgado Rodrigues J, Tiano P, Sneathlage R, et al. Measuring the penetration depth of consolidating products: comparison of six methods. In Proceedings of the 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Venice, June 2000 Jun 19 (pp. 19-24).
43. Rodrigues JD, Costa D. A new interpretation methodology for microdrilling data from soft mortars. J Cult Herit. 2016;22:951-5. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.06.010>
44. Pamplona M, Kocher M, Sneathlage R, Aires Barros L. Drilling resistance: overview and outlook. Zeitschrift-Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften. 2007; 158(3):665. <https://doi.org/10.1127/1860-1804/2007/0158-0665>
45. Al-Naddaf M, Wakid F, Abu Alhassan Y. Micro-Drilling Resistance Measurement: A new technique to Estimate the porosity of A building Stone. Mediterranean Archaeology & Archaeometry. 2013;13(1).
46. Pinto AP, Rodrigues JD, Bracci S, Sacchi B. The action of APTES as coupling agent of ethylsilicate for limestone and marble consolidation. Proceedings of the International Symposium Stone consolidation in cultural heritage, research and practice, Lisbon. 2008:71-9.
47. Kouli M, Zezza F, Kouli D, editors. 10th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin: Natural and Anthropogenic Hazards and Sustainable Preservation. Springer; 2018. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-78093-1>
48. Cnudde V, De Kock T, Boone M, De Boever W, Bultreys T, Van Stappen J, Vandevoorde D, Dewanckele J, Derluyn H, Cárdenes V, Van Hoorebeke L. Conservation studies of cultural heritage: X-ray imaging of dynamic processes in building materials. European Journal of Mineralogy. 2015;27(3):269-78. <https://doi.org/10.1127/ejm/2015/0027-2444>.
49. Gomez M, Cardu M, Mancini R. Nondestructive testing for soundness

- of stone architectural pieces. In Science, Technology and European Cultural Heritage 1991 Jan 1 (pp. 583-586). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-0237-2.50095-2>
50. Fioretti G, Andriani GF. Ultrasonic wave velocity measurements for detecting decay in carbonate rocks. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. 2018;51(2):179-86.
51. Gil MA, Luna M, Zarzuela R, García-Moreno MV. Quantitative determination of the penetration of a silica-based consolidant in a limestone by FTIR spectroscopy. Vibrational Spectroscopy. 2020;110:103109. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2020.103109>
52. Vasanelli E, Calia A, Luprano V, Micelli F. Ultrasonic pulse velocity test for non-destructive investigations of historical masonries: an experimental study of the effect of frequency and applied load on the response of a limestone. Materials and Structures. 2017 Feb;50:1-1. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0892-7>
53. Ropret P, Legan L, Retko K, Špec T, Pondelak A, Škrlep L, Škapin AS. Evaluation of vibrational spectroscopic techniques for consolidants' penetration depth determination. Journal of Cultural Heritage. 2017; 23:148-56. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.07.004>
54. Braun F, Orlowsky J. Non-destructive detection of the efficiency of long-term weathered hydrophobic natural stones using single-sided NMR. J Cult Herit. 2020;41:51-60. <https://doi.org/10.1080/00393630.2021.2001263>
55. Keine S, Holthausen RS, Raupach M. Single-sided NMR as a non-destructive method for quality evaluation of hydrophobic treatments on natural stones. J Cult Herit. 2019;36:128-34. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.07.012>
56. Di Tullio V, Cocca M, Avolio R, Gentile G, Proietti N, Ragni P, Errico ME, Capitani D, Avella M. Unilateral NMR investigation of multifunctional treatments on stones based on colloidal inorganic and organic nanoparticles. Magnetic Resonance in Chemistry. 2015;53(1):64-77. <https://doi.org/10.1002/mrc.4136>
57. Ahmad A, Pamplona M, Simon S. Ultrasonic testing for the investigation and characterization of stone—a non-destructive and transportable tool. Studies in Conservation. 2009;54(sup1):43-53. <https://doi.org/10.1179/sic2009.54.Supplement-1.43>
58. Drms – drilling resistance measurement system [Internet]: sint technology S.R.L [cited 2021 Aug 20]. Available from: https://sint-technology.com/wp-content/uploads/2016/08/MG_4674-1500x1000.jpg

How to cite this article:

Razani M, Nemani Khiavi, Evaluation of Methods for Estimating the Penetration Depth of Consolidant Material in Porous Materials of Historical Monuments. J Stud color world. 2023;13(4): 343-358. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22517278.1402.13.4.2.0> [In Persian].