

## مروری بر استحکام بخشی سنگ با استفاده از فناوری نانو

مهدی رازانی<sup>۱\*</sup>، لیلی نعمانی خیای<sup>۲</sup>

۱- استادیار، دانشکده حفاظت آثار فرهنگی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران، صندوق پستی: ۵۱۶۴۷۳۶۹۳

۲- کارشناسی ارشد، دانشکده حفاظت آثار فرهنگی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران، صندوق پستی: ۵۱۶۴۷۳۶۹۳

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۴/۲۵ تاریخ بازبینی نهایی: ۹۹/۰۹/۰۸ تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۹/۰۸ در دسترس بصورت الکترونیک: ۹۹/۰۹/۳۰

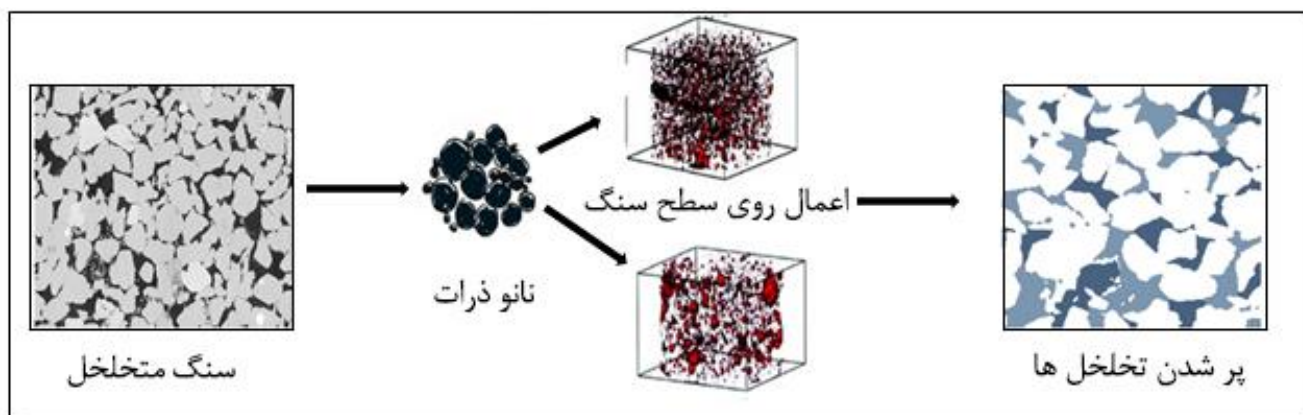
### چکیده

استحکام بخشی، از جمله مهم ترین مراحل حفاظت از آثار تاریخی به ویژه سنگ و آثار سنگی ساختمانی محسوب می شود. این واژه به معنای افزایش مقاومت درونی اثر در مقابل اضمحلال فعلی و مصون سازی در برابر مخاطرات آتی است و با استفاده از مواد و روش های گوناگونی انجام می گیرد. مواد مختلفی که به این منظور تولید و استفاده می شود شامل مواد آلی، معدنی، کامپوزیت، مواد پایه زیستی و نانو ذرات هستند که هر کدام برای ویژگی به خصوصی از اثر تجویز می گردد. هدف از این پژوهش، مروری بر کاربرد فناوری مواد نانو ساختار در استحکام بخشی آثار سنگی است که در چند سال اخیر پس از تولید در زمینه علم حفاظت، پیشرفت چشمگیری کرده و مشکلات مختلفی را در زمینه جلوگیری از نابودی آثار تاریخی حل نموده اند. این تحقیق استحکام بخشی با نانو مواد را مورد مطالعه قرار داده و نتایج حاصله را در مورد نحوه تأثیر روش های اعمال و عمق نفوذ نانو مواد سنجیده تا بتوان از میان این روش ها استدلالی جامع در مورد استحکام بخشی با نانو ذرات کسب کرد.

### واژه های کلیدی

استحکام بخشی، حفاظت، مرمت، نانو ذرات، سنگ.

### چکیده تصویری





## A Review of Consolidation of Stone with Nanotechnology

Mehdi Razani\*, Leyli Nemani Khiyavi

Faculty of cultural materials conservation, Tabriz Islamic Art University, P. O. Box: 516473693, Tabriz, Iran.

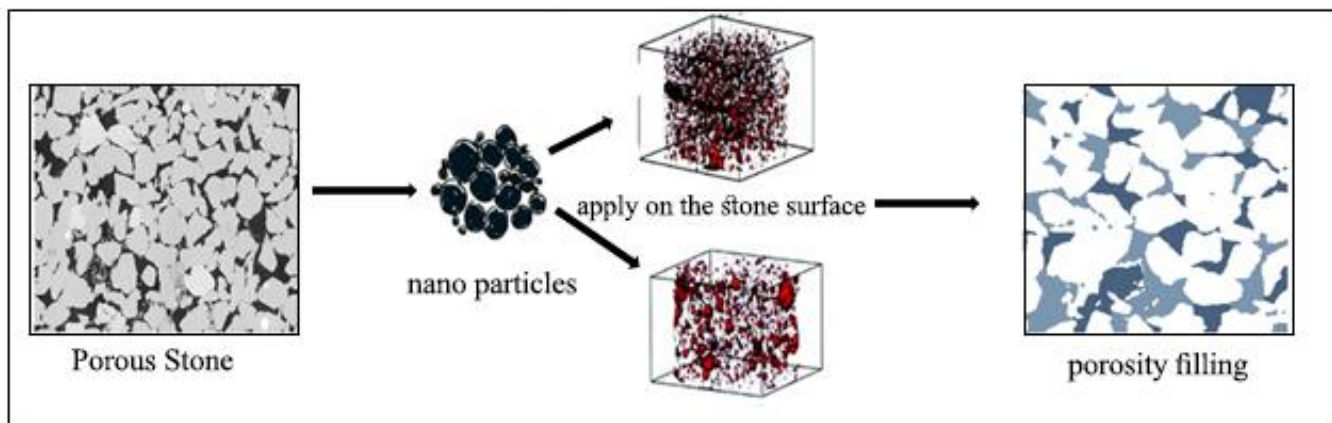
### Abstract

Consolidation is one of the most important elements of conservation of historical objects, especially stone monuments. This term is meant to increase the internal resistance of the effect against current disintegration and hedging against future hazards and is done using various materials and methods. The various materials that are produced and used for this purpose include organic, inorganic, composite, biological and nano-particle materials, each of which is prescribed to the private characteristic of the effect. The aim of this study was to review the application of nano-structure material technology in the robustness of stone works, which has dramatically improved in the recent years after production in the field of conservation science and solve various problems in the field of preventing the destruction of historical monuments. This study investigated the robustness of nano-materials and the results of the method of the effect of methods and the depth of penetration of nano-materials in order to achieve the reasoning of these methods of comprehensive strength-part with nano particles.

### Keywords

Consolidation, Conservation, Restoration, Nanoparticles, Stone, Rock.

### Graphical abstract



۱- مقدمه

استحکامبخش به موادی اطلاق می‌گردد که توانایی نفوذ در ساختار یک اثر را داشته و ذرات آسیب‌دیده‌ی آن را به هم متصل کند و هم‌چنین باعث افزایش مقاومت در برابر حملات بیرونی نیز باشد [۱]. با توجه به اهمیت این اقدام در حفاظت و مرمت آثار تاریخی و فراهم شدن فرصت استفاده از فناوری‌های نوین در استحکامبخشی این آثار و با استناد به نتایج تحقیقات انجام‌شده در استفاده از انواع مختلف مواد شیمیایی برای درمان آثار تاریخی-هنری، مطالعات تاریخی و تطبیقی برای پی بردن به تأثیر فناوری نانو در روند استحکامبخشی آثار سنگی انجام‌شده است. استحکامبخشی و سایر اقدامات حفاظت پیشگیرانه، در چند سال گذشته توجه زیادی را به خود جلب کرده است. برای آثاری که دچار مراحل اولیه تخریب‌شده‌اند، مرمت اضطراری اقدامی لازم و ضروری است؛ اما بسیاری از آثار وجود دارند که همواره در معرض تخریب هستند [۲] و در صورت عدم بررسی علمی و اقدامات عملی در سریع‌ترین زمان ممکن احتمال واپاشی دارند. به همین علت انتخاب درست مواد و شیوه اعمال، دغدغه مهمی برای پژوهشگران این حوزه است. از جمله مهم‌ترین موادی که همواره نظر مرمتگران و دانشمندان را به‌سوی خود منعطف نموده است، استحکامبخشی سنگ‌هاست که پژوهش‌های زیادی برای شناخت مناسب‌ترین ماده صورت گرفته است. سنگ‌ها به دلیل این‌که اغلب در فضای خارج قرار دارند و عوامل مختلفی نظیر هوازدگی، رطوبت به صورت‌های مختلف صعودی و نزولی، میکروارگانیسم‌ها، عوامل زیستی و غیره روی آن‌ها تأثیر می‌گذارد؛ در بحث استحکامبخشی باید تمامی آسیب‌های وارده را بررسی کرده و با توجه به نتیجه، شیوه خاصی را انتخاب و دقت بالایی در بحث عمل به خرج داد تا امکان درمان‌های بعدی نیز فراهم شود. در زمینه پوشش‌دهی و استحکامبخشی سنگ‌ها، انواع مختلفی ارائه‌شده است که می‌توان به پایان‌نامه‌های دانشجویان دانشگاه‌های هنر اصفهان و تبریز اشاره کرد که در سال‌های گذشته با یک نوع ماده و یک نوع روش اعمال آزمایش‌شده‌اند ولی به علت تک‌بعدی بودن مطالعه، نتایج حاصل از آن‌ها چندان قابل استناد نیست اما به‌تازگی پژوهش‌هایی مبتنی بر استحکامبخشی سنگ‌های مختلف در این حوزه انجام‌گرفته است که نتایج چند استحکامبخش رایج را با روش‌های چندگانه بر بناها و آثار سنگی آزمایش کرده و مقایسه حاصل از پاسخ آن را گزارش نموده‌اند [۳]. استفاده از نانو ذرات نیز روشی است که برای مرمت و استحکامبخشی آثار تاریخی، جایگاهی بیش از تاریخ استفاده خود به دست آورده و نتایج حاصل از آن، زمینه‌ی گسترش استفاده را فراهم کرده است که می‌توان از این مواد به‌صورت اختصاصی و متناسب با شرایط و جنس اثر استفاده کرد [۴، ۵]. در پژوهش ابتدا به حساسیت بالای میراث سنگی پرداخته‌شده و در ادامه به معرفی نانو مواد و چگونگی استفاده از آن اشاره‌شده است؛ سپس پیشینه مشخصات و روش استفاده‌ی نانو مواد متنوع در نمونه‌های موردی مختلف بررسی شده و مورد تحلیل قرار گرفته است.

اطلاعات حاصل از این مطالعه از طریق بررسی کتابخانه‌ای و مروی

جمع‌آوری شده و مورد تحلیل قرار گرفته تا بتوان به پاسخ‌های مناسبی در مورد چند سؤال دست‌یافت:

- مهم‌ترین مواد نانو ساختار استفاده‌شده در استحکامبخشی سنگ کدام‌اند؟

- شرایط بهینه برای ارتقاء اثربخشی نانو مواد در استحکامبخشی سنگ چیست؟

- روش مورد استفاده برای سنجش اثربخشی نانو مواد کدام‌اند؟

۲- ویژگی‌های استحکامبخش‌ها و فرآیند استحکامبخشی

۲-۱- استحکامبخشی<sup>۱</sup>

در دانش حفاظت و مرمت به معنای استفاده از استحکامبخش‌ها و فرآیندهای استحکامبخشی در جهت تقویت آثاری که انسجام و استحکام آن‌ها از دست‌رفته یا کاهش‌یافته به کار می‌رود. هدف از درمان استحکامبخشی تجدید پیوندها میان ذراتی است که تضعیف‌شده، دچار ریزترک شده و یا توسط دیگر سازوکارهای تخریبی و هوازدگی از دست‌رفته‌اند (ASTM, E2167-01, 2008). در رابطه با گرایش حفاظت و مرمت سنگ استحکامبخشی به درمان عمقی سنگی که پیوستگی و انسجام آن قدر از دست‌رفته و موجودیت فیزیکی آن به خطر افتاده تعبیر می‌گردد به‌نحوی که این درمان در مواردی اشباع کردن سنگ هوازده و همچنین بخش قابل‌توجهی از لایه محکم زیرین آن است [۶]. در تحقیق حاضر استحکامبخشی به معنی مواد یا فرآیندهایی است که بتواند خواص فیزیکی و انسجام سطوح بیرونی اثر را در آثار سنگی ارتقا دهد. در این زمینه استفاده از پوشش‌های سطحی همچون مواد ضدآب‌کننده و دافع آب نیز بعد از فرآیند استحکامبخشی کاربرد دارند.

۲-۲- ماده استحکامبخش<sup>۲</sup>

موادی (آلی یا معدنی) که برای مقاوم‌سازی و استحکام دادن به مواد دیگر به‌کاربرده می‌شوند [۷]. در مبحث حفاظت سنگ به ماده استحکامبخش در واقع به موادی اطلاق می‌شود که برای تجدید پیوند میان ذراتی که ممکن است به سبب فرسایش یا سازوکارهای تخریبی دیگر از دست‌رفته باشد؛ به کار می‌روند، هدف درمان با استحکامبخش در میراث سنگی کاهش میزان تخریب در سنگ است [۸] در تحقیق حاضر منظور از ماده استحکامبخش کلیه موادی است که برای تقویت ساختار سنگ مورد استفاده قرار گرفته است.

هر ماده‌ای در فضا دارای سه بعد طول، عرض و ارتفاع است. اگر کمینه یکی از این سه بعد یک ماده در مقیاس نانومتری باشد، به آن ماده نانو ساختار گفته می‌شود. مقبول‌ترین تعریف برای نانو ماده توسط موسسه ملی ابتکارات نانوفناوری ایالات متحده آمریکا<sup>۳</sup> ارائه‌شده است که عبارتست از: نانو مواد دسته‌ای از مواد هستند که مقیاس طولی مشخصه آن‌ها کمتر

<sup>1</sup> Consolidation

<sup>2</sup> Consolidate

<sup>3</sup> National Nanotechnology Initiative

## مقاله

است. در این میان فناوری نانو عرصه تحقیقات جدیدی را به روی پژوهشگران گشوده است. این علم به دلیل توانایی‌های فراوانی که در تهیه مواد با خاصیت‌های قابل مدیریت دارد، می‌تواند بسیاری از معضلات و مشکلاتی که مرمته‌گران با آن روبرو هستند را حل کرده و افق روشنی پیش روی محافظان آثار تاریخی قرار دهد. طبق مدارک موجود، در ادوار گذشته مواردی به‌عنوان استحکام‌بخش استفاده شده‌اند که از دسته پلیمرهای سنتزی هستند و صرفاً برای این کار طراحی نشده‌اند و پس از گذشت مدتی از عملیات درمان باعث بروز اثرات نامطلوب روی آثار شده‌اند [۹]. هنگامی که اثری دچار تخریب و تزلزل بنیان می‌شود، ضروری است که استحکام‌بخشی روی آن انجام گیرد. بدین منظور نباید به بررسی با چشم غیرمسلح اکتفا کرد بلکه باید از روش‌های مختلف میکروسکوپی بهره جست و سپس ضرورت یا عدم استفاده از یک ماده را برای تحکیم ساختار یک اثر سنجید. استحکام‌بخشی نخستین مرحله حفاظت و آغازکننده آن است [۸] و قبل از اقدام به هر عملی، باید آن را انجام داد تا شرایط فعلی اثر تثبیت شده یا از وخامت آن جلوگیری کرده و راه را برای اقدامات بعدی میسر ساخت و حتی اگر پس از بررسی این نتیجه حاصل شد که استحکام یک اثر در شرایط مطلوبی است، می‌توان به‌عنوان حفاظت پیشگیرانه پوشش دهی سطحی را انجام داد تا از زوال جلوگیری شود. استحکام‌بخش مناسب‌ترین پاسخ را در درمان یک اثر می‌دهد که از نظر ساختار و ترکیب مشابه بافت درمان شده باشد و برای نیاز کنونی یک اثر تجویز شده و خطرات احتمالی آینده را نیز پوشش دهد [۷]. دارای عمق نفوذ مناسبی بوده و علاوه بر سطح، لایه‌های داخلی اثر را در برگیرد. برای اثر، شخص استفاده‌کننده و محیط‌زیست بی‌خطر بوده و عوارض جانبی نداشته. همچنین ترکیب شیمیایی شی در حال درمان را تغییر نداده و جنبه‌ی بصری آن را نیز تحت تأثیر قرار ندهد [۱۰]. علاوه بر آن دارای طول عمر مناسب بوده و اثربخشی خود را به‌سرعت از دست نداده و راه را برای درمان‌های حفاظتی آینده مسدود نسازد [۲]. چون در نفس عمل، استحکام‌بخشی یک فرآیند برگشت‌ناپذیر است، ماده و روش مورد استفاده باید به‌گونه‌ای باشد که بتوان با پیشرفت علم یا اشتباه بودن روند درمان، آن را جایگزین کرد بدون آنکه آسیب جدی به اثر وارد شود [۱۲].

از ۱۰۰ نانومتر باشد. یکی از دسته‌بندی‌های متداول نانو مواد (نانو ساختارها)، تقسیم‌بندی آن‌ها بر اساس تعداد ابعادی است که خارج از محدوده نانومتری قرار دارند. طبق این دسته‌بندی، نانو مواد به سه دسته صفربعدی، یک‌بعدی و دوبعدی تقسیم می‌شوند. نانو مواد به دلیل توانایی در تولید و ترکیب مختلف با خواص قابل کنترل در اندازه‌های ۵۰ تا ۲۵۰ نانومتر تولید شده و به‌واسطه‌ی اندازه‌ی ذرات، به عمق سنگ نفوذ کرده و در پایدارترین حالت خود به درمان می‌پردازد [۵]. استحکام‌بخش‌ها به‌عنوان مهم‌ترین ماده در مرحله حفاظت و مرمت مصالح معماری، در صورت استفاده از استانداردهای بین‌المللی، می‌تواند بسیار مفید و قابل اعتماد باشد (جدول ۱).

به شرطی که هنگام استفاده، ویژگی‌های اثر و همچنین ماده، مدنظر قرار گیرد. این ماده به‌عنوان جزئی برای تجدید پیوند بین ذرات فرسوده شده به کار می‌رود، ولی باید پس از بررسی کامل عوامل مؤثر در تخریب مورد استفاده قرار گیرند. پس از تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی علت و نوع تخریب و نوع ماده، اجرای آن انجام شود. با توجه به تجربیات گسترده در این مورد برای جلوگیری از گسترش فرسودگی‌ها، باید ابتدا منشأ زوال شناسایی و سپس درمان آغاز شود چون معمولاً استفاده از این مواد برگشت‌ناپذیر بوده و دقت بیشتری را در شروع استفاده می‌طلبد. استحکام‌بخش باید توان نفوذ در عمق آسیب‌دیده‌ی سنگ را داشته و قدرت نفوذش آن قدر باشد که بتوان از موفقیت آن در بحث درمان اطمینان حاصل کرد تا باعث توقف لایه‌لایه شدن و پوسیدگی شده و بدون تغییر در ویژگی‌های بصری سنگ مانند رنگ و شفافیت، بقای آن را تضمین کرده و در برابر رطوبت و میکروارگانیسم‌ها مقاوم باشد. رزین‌ها همچنان از پرکاربردترین نوع استحکام‌بخش‌ها هستند. در صورتی که طبق مقالات غیرفارسی منتشر شده در سال‌های اخیر مشخص شده که معایب برخی رزین‌ها برای بسترهای معدنی بسیار بیشتر از مزایای آن است. البته انتخاب ماده‌ی استحکام‌بخش بستگی به پارامترهایی از قبیل جنس اثر شرایط محیطی و میزان تخریب آن و همچنین عملکرد مورد انتظار از استحکام‌بخش دارد [۷، ۸]. علاوه بر این استفاده از فناوری‌های نوین در روند بهینه‌سازی مواد مورد استفاده و شیوه‌های مرمتی از اهمیت بسیاری در زمینه حفاظت از اشیاء فرهنگی و تاریخی برخوردار

جدول ۱- مهم‌ترین ویژگی‌های استحکام‌بخش‌های موجود در حوزه حفاظت و مرمت سنگ (مأخذ: نگارندگان)

تناسب داشتن با ساختار سنگ	ارزیابی عمق نفوذ	سازوکار عمل	میزان اثربخشی	سایر موارد
تناسب بین ماده مصرفی و سنگ هدف از نظر نوع مواد تشکیل شده و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی تا رفتار و واکنش آن بعد از درمان قابل پیش‌بینی باشد.	دارای اندازه‌ی ذرات ریز باشد تا بتواند در عمق بیش‌تری از سنگ نفوذ کرده و پاسخ‌گوی ترک‌ها و سایر آسیب‌های موجود باشد.	خنثی باشد و با ساختارهای سنگ وارد واکنش نگردد. باعث توقف رشد میکروارگانیسم‌ها شده و با تشکیل فیلم داخل ساختار سنگ، یک‌لایه‌ی محافظ ایجاد کند.	از نظر طول درمان و مدت‌زمان مصونیت سنگ در حد مطلوب باشد و طول عمر بالایی نیز داشته باشد تا به‌آسانی از ساختار سنگ خارج نشده و بقای اثر را تا مدت‌زمان بیش‌تری تضمین کند	آسیب‌رسان به محیط نباشد دچار تغییر رنگ نگردد در سطح سنگ رسوب نکند به راحتی تغییر ساختار ندهد و غیره. عدم خطر برای استفاده‌کننده و اپراتور

فضاهای یکسانی از سنگ واکنش نداده و در یک نقطه متمرکز شده و نقاط دیگر بدون استحکامبخش می‌مانند [۱۶].

### ۳- روش‌های آزمایشگاهی برای سنجش میزان اثربخشی استحکامبخش‌ها

بررسی مؤثر بودن یک استحکامبخش، با چشم غیرمسلح به‌سادگی امکان‌پذیر نیست و زمان زیادی لازم است تا یک شی درمان شده در معرض آلودگی‌های جوی، آسیب‌های مکانیکی، زیستی و سایر عوامل آسیب‌رسان قرار گیرد تا رفتار آن مورد سنجش قرار گرفته و میزان موفقیت درمان ارزیابی شود البته در مورد استحکامبخش‌های پایه نانو ذرات، عدم تشکیل فیلم و رسوب روی سطح اثر و همچنین عدم تغییر رنگ نقطه‌ی عطف روند استحکامبخشی است اما حصول نتیجه دقیق‌تر، بررسی‌های جزئی‌تری را می‌طلبد. در پژوهش‌های مختلف، اغلب نانو ذرات را بسته به شرایط و مقیاس اثر، با روش پاشش و واپاشش، ضماذگذاری و یا قلم‌مو اعمال می‌کنند [۱۷] و اگر شی در حال مرمت اثر هنری و کوچک‌تری بود از روش اشباع و غوطه‌وری بهره می‌برند [۱۸]. لازم به ذکر است که به‌منظور حصول اطمینان از اثربخشی فرآیند، ابتدا نمونه‌های آزمایشی تهیه کرده و مراحل درمان را روی آن‌ها پیاده نموده و فرآیندهای پیرسازی تسریعی را به انجام رسانده و پس از حصول نتیجه بر روی اثر اصلی، درمان انجام می‌شود. به‌منظور بررسی نحوه درمان، از میکروسکوپ روبشی الکترونی برای مشاهده ریخت محصولات نهایی در خلا، از پتروگرافی برای شناخت کانی‌ها و تشخیص نوع سنگ، XRD برای بررسی درصد عناصر و شناخت کانی و تجزیه‌وتحلیل دیفرانسیل حرارتی و گرماسنجی DTA-TB به‌منظور بررسی نوع واکنش‌های انجام‌شده در درمان‌های حرارتی و تعیین کمیت‌های جذب آب است. از روش طیف‌سنجی با هدف بررسی مشخصه‌های کروماتیک و همچنین به‌منظور کنترل ساختار شیمیایی از EDS استفاده می‌شود [۱۵]. شرایط بهینه برای ارتقاء اثربخشی نانو مواد در استحکامبخشی سنگ مربوط به عوامل مختلفی نظیر شیوه اعمال، درصد خلوص ماده و همچنین محیط درمان است که در هر اقلیمی، هر ماده پاسخ به‌خصوص می‌دهد و همچنین شرایط اثر مورد درمان نیز در اثربخشی بیش‌تر مؤثر است [۱۹]. سنجش اثربخشی این مواد به‌عنوان استحکامبخش نیز، با استفاده از تصویربرداری میکروسکوپی و حرارتی امکان‌پذیر است که میزان نفوذ ماده را در ساختار اثر مشخص نماید و همچنین می‌توان با تهیه نمونه‌های شاهد و انجام عملیات پیرسازی تسریعی، مقاومت سنگ موردنظر را در برابر شرایط سنجید و برای مراحل بعدی تصمیم‌گیری کرد [۱۵].

### ۴- نتایج پژوهش‌های پیشین

استحکامبخشی در حوزه میراث سنگی، تلاش در انتخاب ماده مناسب و روش صحیح مقوله بسیار مهمی است. تلاش در انتخاب ماده مناسب و روش صحیح، امری بسیار ضروری است. سازگاری با محیط و ماندگاری بالا، از دیگر مواردی است که باید موردتوجه قرار گیرد تا بتوان از آینده

ضمنا در یک نقطه از اثر تجمع پیدا نکرده و تمام سطح داخلی را پوشش دهد [۱۱]. استحکامبخش‌هایی که در یک اثر تاریخی به‌ویژه سنگ استفاده می‌شوند، گل‌ها به دلیل نبود اطلاعات کافی، پاسخ حفاظتی مناسبی را نمی‌دهند و به دلیل تخلخل کم در ساختار، در رطوبت بالا در محتوی لایه‌های خود بازده مناسبی ندارند بعضی از نمونه‌های دیگر به علت عمق نفوذ کم و تغییر رنگ سطح اثر مناسب نیستند و عده‌ای به خاطر طول عمر کم و شکستگی پلیمر پاسخ مناسبی نمی‌دهند. در مورد استحکامبخش‌های آلی چون معمولاً آب‌گریزند و این به دلیل نوع ساختار شیمیایی آن‌ها که غیرقطبی هستند در تماس با آب که دارای ساختار قطبی است و در حضور میدان مغناطیسی واکنش نشان می‌دهد، قابل‌امتزاج نبوده و بنابراین عنوان آب‌گریز<sup>۱</sup> به آن‌ها اطلاق می‌گردد. آب‌گریز در شیمی و زیست‌شناسی کاربرد دارد و یک پدیده فیزیکی در مولکول‌ها است که از آب دوری می‌کنند. آب‌گریزی از جمله خصوصیات فیزیکی سطحی یک ماده است. مواد آب‌گریز به دلیل ناهموزاری‌های سطحی میکرومتری و نانومتری خود، اجازه پخش شدن یا جذب شدن آب روی سطح را نمی‌دهند. مولکول‌های آب‌گریز غیرقطبی هستند و به همین خاطر تمایل به دیگر مولکول‌ها و حلال‌های غیرقطبی دارند، بنابراین این در صورت حضور استحکامبخش‌های آلی، در تماس با آب باعث حل نشدن نمک‌های محلول در آب‌شده و باعث تخریب می‌شوند [۱۱]. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد که مواد آب‌گریز غیرقطبی هستند و نمک یک ترکیب با پیوند شیمیایی از نوع یونی است و بنابراین برای حل شدن نیاز است تا یک حلال قطبی وارد عمل شود؛ مانند آب یا اتانول. اغلب آهک به دلیل ترکیب با CO<sub>2</sub> هوا گزینه مناسب‌تری است ولی چون این فرآیند با سرعت کمی انجام می‌گیرد و فرآیند کربنات ناکامل بوده و فیلم سفیدرنگ روی سطح اثر تشکیل می‌دهد [۱۲، ۸]. علاوه بر آن داخل ساختار سنگ تشکیل شبکه متراکم داده و اثر مستعد ترک‌خوردن می‌شود [۱۳]. پرایس، رایس و وایت [۱۴]. در مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که این ماده عمدتاً بر لایه‌های بیرونی رسوب می‌کند و عمق نفوذ چندان مناسبی ندارد که بتوان آن را موردبررسی قرارداد. طبق نتیجه‌گیری این محققان، دوغابی که بعد از اعمال شیره آهک استفاده می‌شود عامل استحکام سنگ‌ها است و طبق فرضیه دیگری، آهک به دلیل ضد باکتری بودن و جلوگیری از رشد کلنی باکتری‌ها مانع پوسیدگی سنگ می‌شود [۱۵] استفاده از آن در مقیاس معمولی توصیه نمی‌شود. برخی استحکامبخش‌ها نیز برای یک سنگ پاسخ مناسب می‌دهند ولی وقتی برای نمونه دیگری تجویز می‌شود، به دلیل اختلاف در ضریب حرارت انبساطی اثر و استحکامبخش، واکنش به‌درستی انجام‌نشده و ترکیب ایجادشده در اثر کوچک‌ترین ارتعاش، دچار فروپاشی شده و سنگ را هم دچار آسیب می‌کند همچنین باعث پرشدن منافذ سنگ شده و حرکت آب در داخل سنگ را با مشکل مواجه می‌کند که احتباس آب یک عامل تخریب محسوب می‌شود. همچنین گاهی در

1 Hydrophobic

## مقاله

رنگ‌دانه‌ها می‌شود. از آنجایی که سایر مواد استحکام‌بخش دچار تغییر و تخریب می‌شوند، همراه خود اثر را نیز می‌توانند دچار تخریب کنند. به این منظور اگر بتوان اندازه ذرات این استحکام‌بخش‌ها را تا حد نانو کاهش داد، کارایی آن به‌طور چشمگیری افزایش پیدا می‌کند. همچنین سنگ‌های برپای کربنات مانند آهک و مرمر که در طی سال‌ها به‌عنوان مواد ساختمانی و هنری استفاده شده است و به دلیل شرایط قرارگیری دستخوش فرآیندهای تخریبی مانند ساییدگی فیزیکی، چرخه‌های انجماد و ذوب، تخریب‌های زیستی و خوردگی شیمیایی توسط باران‌های اسیدی و رطوبت قرار می‌گیرند. همان‌طور که بیان شد برای جلوگیری از این موضوع در طی سال‌ها استحکام‌بخش‌های مختلفی به‌کاررفته‌اند ولی پایداری آن‌ها موردسنجش واقع نشده است و مشاهدات عملی در طی ۵۰ سال اخیر نشان داده است که عملکرد این مواد قابل قبول نبوده است و در اثر پرتوهای فرابنفش، رطوبت محیط و سایر عوامل دچار تغییر گشته و ویژگی‌های دیداری اثر را تهدید کرده‌اند. برای مثال پارالوئید B72، پریمال AC33 و الواسیت ۲۰۴۶ بر روی آثار نقاشی توسط کراتی و دی در سال ۲۰۰۴ آزمایش شده‌اند و نتیجه آن این بود که پس از مدتی باعث کاهش شدید خاصیت نفوذپذیری و آب‌دوستی سطح نمونه شده و ارتباط اثر با محیط را به‌طور کامل قطع نمود که باعث توقف تنفس اثر گردید. همچنین در ابتدای دهه ۱۹۶۰ تحقیقی بر روی مواد معدنی سازگار مانند میکرو ذرات و نانو ذرات برای استحکام‌بخشی نقاشی‌های دیواری در فلورانس شروع شد و به دنبال اعمال این مواد، تقویت شگرفی در لایه‌های نقاشی مشاهده شد. نتایج آزمون‌های انجام‌شده بر مبنای تأثیر نانو مواد در استحکام‌بخشی چوب‌های تاریخی، نشان داده است که استفاده از دی‌اکسید تیتانیم به‌عنوان کاتالیزور در اشیا چوبی در شرایط وجود نور، فعالیت ضدقارچی رشد مساعدی دارد و مطالعه طیف ATR-FTIR نمونه‌های مورد مطالعه بعد از ۷ هفته، نشان داده که نانو مواد زیر توانسته به‌خوبی از اثر محافظت کند و در شرایط نور UV و همچنین نور محیطی، از تخریب آن توسط این عوامل جلوگیری کند [۱۹]. مطالعه دیگری نشان داده است که پلیمرهای سنتزی آلی از لحاظ خواص فیزیکی و شیمیایی با سنگ سازگاری چندانی ندارند و پس از بررسی مسئله ترک‌خوردگی توسط میلیون و همکارانش در سال ۲۰۰۷ میلادی، به این نتیجه رسیدند که با اضافه کردن نانو ذرات سیلیکا و سیلان‌های عامل‌دار شده به‌عنوان ژل خشک‌شده در منافذ سنگ، از ترک‌خوردگی جلوگیری کرده و کاهش موئینگی را حین تبخیر حلال‌ها باعث می‌شود. در مطالعه‌ای نیز که در سال ۲۰۰۱ انجام شد، گروهی از متخصصین به سرپرستی آمبروسی، نانو ذرات هیدروکسید کلسیم را در ۱-پروپانول در نمونه‌های ترک‌خورده آزمایشگاهی تزریق کردند و پس از مدتی روی سنگ تاریخی نیز همین مطالعه را انجام دادند و این نتیجه برایشان حاصل شد که افزایش فشردگی سطحی و نیز اتصال بین‌دانه‌ای از خواص این ماده است. در کلیه این آزمایش‌ها پس از ارزیابی نتایج حاصله از SEM-EDS، آنالیز سطحی و ارزیابی استحکام‌بخش‌ها پی بردند که در تمام موارد، درمان حاصل از نانو مواد بسیار مؤثر بوده و علاوه بر استحکام‌بخشی سطحی، در ساختار منافذ نیز تغییراتی ایجاد

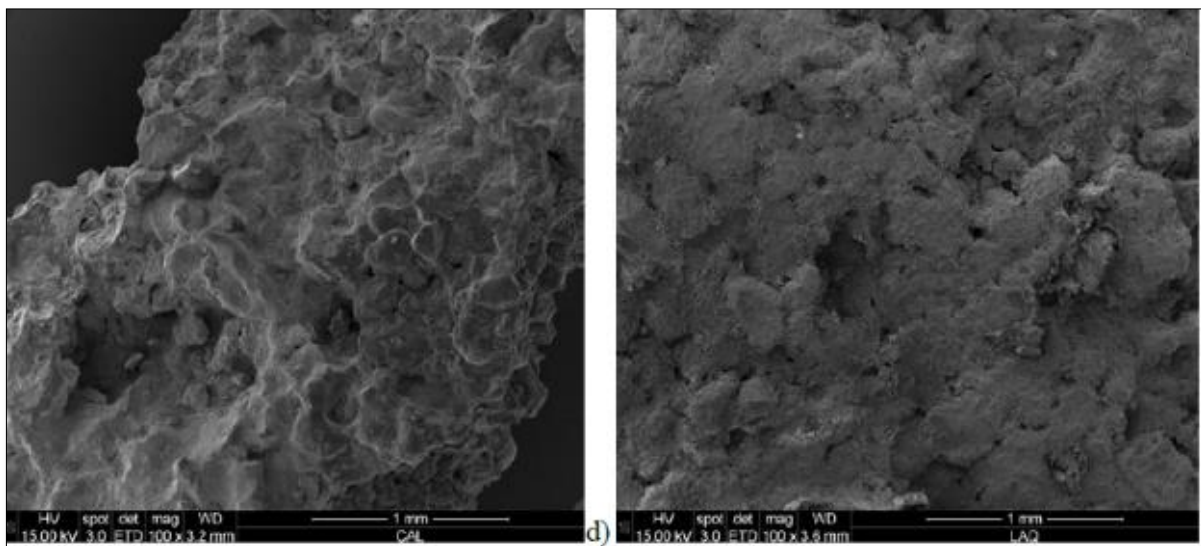
عملکرد امروز، پیش‌بینی مختصری به دست آورد. بدین منظور ضرورت دارد تا پژوهش‌های مختلف بررسی شده و با استناد به نتایج حاصله از آن‌ها و با در نظر داشتن شرایط، اقدام کرد. پژوهش مشابهی در این حوزه انجام گرفته و طی آزمونی دو قطعه سنگ را به‌عنوان شاهد با دو نوع ماده آلی و معدنی استحکام‌بخشی کرده و مشاهده کردند سنگی که با نانو ذرات استحکام‌بخش شده بود دارای مقاومت بیشتری در برابر عوامل آسیب‌رسان است و به نسبت سنگ دیگر کمتر در معرض آلاینده‌های جوی مانند گردوغبار و حمله میکروارگانیسم‌ها قرار گرفت. البته این مواد در همه‌ی سنگ‌ها و اقلیم‌ها پاسخ مثبت نداده و در بعضی موارد استحکام‌بخش‌های آلی مناسب‌تر بودند؛ زیرا مواد نانو در محیط‌هایی که سنگ حداقل به مدت یک سال در هوای آزاد و در معرض تغییرات شدید آب و هوایی قرار گیرد و در ارتباط با محیط بیرون باشد پاسخ مناسب‌تری خواهد داد و تفاوت این دو نوع ماده زمانی مشخص می‌شود که عواملی مانند درصد تخلخل بالا، حضور نمک‌های محلول، قرارگیری در محیط باز و حضور آب به‌طور هم‌زمان تأثیر بگذارد. در چنین شرایطی است که عدم سازگاری محصولات آلی پلیمری درشت ساختار بسیار مشهود خواهد بود [۲۰]. همچنین به علت آن که این نوع مواد باعث افزایش مقاومت فشاری و کشسانی و عدم تغییر رنگ سطح سنگ شده و ارتباط سنگ با محیط اطراف را قطع نمی‌کند، برای استفاده مناسب است اما نتیجه مطلوب را زمانی خواهد داد که آثار حداقل به مدت یک‌ساله در محیط باز و در هوای آزاد و در ارتباط با رطوبت چه به‌صورت نزولی و چه صعودی قرار گرفته باشد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در حوزه حفاظت و مرمت آثار تاریخی بهره‌گیری از روش‌های جدید در جهت دستیابی به درمان حفاظتی بهتر، در جهت ازدیاد طول عمر آثار، موردنیاز بوده و استفاده از علوم مهندسی جهت کمک به بقای اشیاء فرهنگی گسترش یافته است که در این میان به دلیل فراوانی آثار سنگی، مواد متنوع‌تری نیز تولید گشته است که پاسخگوی تعداد و بقای آثار باشد چون سنگ‌ها عموماً در فضای آزاد و در معرض هوای بیرون هستند بیشتر در معرض هوازدگی و پوسیدگی قرار می‌گیرند [۲۱]. نانو مواد در جلوگیری از فرآیندهای فرسایشی-تخریبی بدون وارد شدن هرگونه خدشه‌ای به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آثار هنری-تاریخی مؤثرند. از آن‌ها برای به حداقل رساندن یا حذف هرگونه آسیب و صدمه استفاده می‌شود. یکی از مهم‌ترین عوامل تخریبی آثار هنری، طیف وسیعی از موادی است که توسط بشر به‌کاررفته شده‌اند و امروزه ما را مجاب به یافتن روش مؤثر برای جلوگیری از روند فرسایش، پیری و زوال کرده است. تجربه نشان داده است استفاده از ماده‌ای که حداکثر تشابه را به بستر آثار دارند، می‌تواند راه‌حل مناسبی در به حداقل رساندن صدمات باشد. درواقع نقش علم حفاظت و مرمت قابل مقایسه با علم پزشکی است به شکل شناخت آناتومی و فیزیولوژی بیمار و تشخیص مناسب و اقدام به بهترین روش‌های درمان به‌صورت ترمیم بافت و فرآیند تخریب. آثار هنری نظیر نقاشی و سنگ همواره در معرض آسیب‌دیدگی هستند. برای نمونه از بین رفتن اتصال‌دهنده و بلوره‌ای شدن نمک‌ها در منافذ سطحی این آثار منجر به ازهم‌گسیختگی لایه‌های سطحی و پوسته‌پوسته شدن

و افراد بسیار بی‌خطر شناخته‌شده است. بنا بر گزارشی که از انجام پژوهش علمی و عملی بر روی سطح سنگ مرمر پنتلیک انجام شده است، این نتایج حاصل شده که در بسیاری از کشورها مثل یونان، برای استحکام بخشی سنگ، پاشش محلول  $K_2CO_3$  با دمای کنترل شده به کار رفته است. استفاده از آهک تقویت شده نیز به جای آهک معمولی مورد تأیید است. این ماده، ترکیبی ایده‌آل برای سنگ‌های هم‌جنس خود است زیر تحت تأثیر  $CO_2$  جو است ولی روند واکنش این دو ماده بسیار کند بوده و برای حل این مشکل می‌توان کلسیت را با آهک ترکیب کرد که این کار باعث خروج سریع گازهای موجود در ترکیب دانه‌ها شده و نرخ بلوری شدن را افزایش می‌دهد (شکل ۱). در این شرایط دانه‌بندی کوچک بوده و مقاومت مکانیکی ساختار بیشتر می‌شود [۲۳].

در گزارش دیگری از تولید ماده استحکام بخش برای سنگ‌های یادمان که در مورد موضوع تترا اتیل اورتو سیلیکات<sup>۱</sup> (TEOS)، انجام شده، روند تشکیل پلیمر در ساختار سنگ و بررسی افزایش انسجام آن مطالعه شده است. پس از استحکام بخشی یک نمونه با این ماده مشاهده شد که از نظر چشمی تغییری در ظاهر اثر ایجاد نشده اما با بررسی به وسیله اطفیسنج، مشخص شد نقاطی که استحکام بخش توانسته درون آن‌ها متخلخل تر بوده است و با ایجاد یک لایه همگن، از نفوذ پذیری سنگ در مقابل آب جلوگیری می‌کند. که با تهیه ژل کلئیدی این ترکیب با سیلیس، باعث فشرده‌سازی شده و استحکام آن را زیاد کرده است استفاده از این دسته استحکام بخش‌ها به طور معمول باعث تقویت خواص ساختاری شده و مقاومت در برابر نفوذ آب را از طریق پر کردن خلل و فرج، مقاومت در ضربه را از طریق تشکیل فیلم روی سطح و داخل بستر و همچنین مقاومت در برابر شکستگی نمک را با پر کردن لوله‌ای موئین سنگ فراهم می‌آورند [۲۵].

کرده است [۲۱]. طبق مطالعات انجام شده که پیش تر نیز بدان اشاره شد، انتخاب مواد سازگار با ساختار سنگ‌های طبیعی و دست‌ساز بسیار حائز اهمیت است. در مورد سنگ‌های تاریخی به منظور بهبود خواص بصری و فیزیکی سنگ‌ها، از موادی نظیر هیدروکسید کلسیم، هیدروکسید منیزیم و هیدروکسی آپاتیت به صورت محلول در الکل استفاده شده است. برای مثال در بنایی سنگی برای پی بردن به خواص درمانی مواد ذکر شده، مطالعاتی صورت گرفت و طی مشاهدات AFM پس از اعمال HAP، درون ساختار سنگ، فیلمی از این ماده در قسمت داخلی سنگ تشکیل شده و به صورت یکسان در تمام نقاط سنگ توزیع شده بود و قسمت‌های جدا شده و هوازده کاملاً در اتصال باهم بودند و در نتیجه مقاومت ذاتی سنگ نیز بسیار بهبود پیدا کرده بود. در نمونه درمان شده با هیدروکسید کلسیم و منیزیم نیز نتایج مشابهی به دست آمد ولی به علت گرایش این دو مواد به تجمع در یک نقطه و عدم پراکندگی مناسب، تأثیری به اندازه‌ی HAP نداشتند. در آزمون دیگری به همین شیوه این ماده را درون ساختار سنگ تزریق کردند و پس از مدتی با تشکیل شبکه‌ای از ساختار بلوری قدرت اتصال بین لایه‌های مختلف بهبود یافت و در مقایسه‌ی طول درمان، اثر درمان شده با HAP پس از دو روز نتیجه مطلوب را نشان داد و سایر نمونه‌ها حداقل پس از گذشت یک ماه نتیجه‌ی مشابه را دادند [۲۰]. طبق اسناد موجود دیگری که در آن به بررسی تأثیر نانو ذرات سیلیکات بر روی سنگ‌های بر پایه سیلیسی انجام شده، به این نتیجه رسیده‌اند که با اضافه کردن نانو ذرات سیلیکا و سیلان‌های عامل دار شده به عنوان ژل خشک شده در منافذ سنگ، از ترک خوردگی سنگ جلوگیری می‌کند؛ زیرا این کار باعث کاهش موئینگی در حین تبخیر حلال‌ها شده و از خالی شدن منافذ سنگ جلوگیری کرده در نتیجه سنگ سالم خواهد ماند؛ و این نتیجه بر اساس مطالعات میلیانی و همکارانش به دست آمده است [۲۲]. همچنین با توجه به خاصیت شیمیایی این ماده و طبق شواهد موجود هیچ‌گونه مسمومیت و ایجاد آلودگی حاصل از نانو سیلیس تاکنون گزارش نشده و برای محیط

<sup>1</sup> Tetra Ethyl Ortho Silicate



شکل ۱- تغییر ساختار سنگ قبل و بعد از اعمال نانو آهک [۲۴].

## مقاله

موجود است و وقتی عمل درمان صورت پذیرد، میزان نمک موجود در ساختار سنگ کم شده است. در دهه‌های گذشته فرآیندهای مختلفی برای تولید  $\text{Ca(OH)}_2$  مصنوعی در مقیاس نانو انجام شده و از نظر کار تحقیقاتی این عمل در چهارچوب کلونیدی انجام گرفته است. استفاده از این ماده به عنوان استحکام بخش، باعث شده که خواص فیزیکی شیمیایی اثر درمان شده طی استحکام بخشی تغییر نکند. این آزمایش به طور سامانمند در چند مرحله و روی چند نمونه مختلف آزمایش شده و در نهایت به جای مواد و روش‌های سنتی در اختیار موزه‌داران قرار گرفته است. در آزمایش مشابهی نانو سیلیکا در آزمایشگاه تولید شده و تأثیر آن بر رطوبت نسبی سنگ درمان شده بررسی گردیده است که با استفاده از روش‌های پیشرفته تحلیلی خصوصیات محصول، با روش‌های مخرب و غیرمخرب بررسی شده و رفتار نانو سیلیکا درون این سنگ رصد شده است که وقتی این ماده در معرض رطوبت بالا قرار گیرد، به شکل سیلیس بی‌شکل از نانو ذرات کروی که دارای مقدار بالای جذب رطوبت است، مشابه ژل سیلیکا رفتار کرده و پس از نفوذ به داخل ساختار سنگ توسط فشار مویری، با ایجاد حالت ژل شدن (شکل ۵)، کم‌کم داخل سنگ خشک شده و تخلخل درونی زیر لایه‌ها را افزایش داده و بدون ایجاد احتباس رطوبت، باعث بالا رفتن نرخ تبخیر شده و با پر شدن منافذ با نانو سیلیکا، انسجام سطح بستر بیش تر شده و تحکیم سنگ نیز افزایش یافته است. همچنین باعث افزایش سختی سطح و کاهش مقدار مواد جدا شده نیز گشته است.

احتمالاً اتیل سیلیکات پر استفاده‌ترین ماده از میان مواد استحکام بخش سنگ است [۲۶] در واقع استر اتیل از اسید سیلیسیک در قالب ترکیبی از اسید و باز به شکل یک نمک و یک مولکول آب است که در نتیجه انباشتگی اسید با الکل که حاصلش یک استر و یک مولکول آب است ایجاد می‌شود. چنان‌که اسید سیلیسیک دارای چهار موضع واکنش پذیر است و می‌تواند با چهار مولکول اتیل الکل ترکیب شود و به صورت اتیل سیلیکات و چهار مولکول آب درآید. اتیل سیلیکات ماده مناسبی برای استحکام بخشی مواد متخلخل آب‌دوست به صورت اشباع سازی است چراکه گرانی کمی دارد و می‌تواند به راحتی تا عمق منافذ و درزه‌ها به شکل اسید سیلیسیک نفوذ نماید و اگر مقداری آب و رطوبت نیز در دسترس باشد بعد از اعمال نمودن می‌تواند آبکافت شده و به صورت ذرات کلونیدی در ساختارهای متخلخل نفوذ نماید [۲۷] مولکول‌های سیلیس به صورت شیمیایی شبیه کانی‌های سیلیکاتی هستند و بنابراین آنها یک سازگاری قابل قبولی را با سنگ‌هایی که ترکیب سیلیکاتی دارند از خود نشان می‌دهند [۲۸] از طرف دیگر ذرات نانو سیلیس به صورت سوسپانسیون در به عنوان محصولی بدون اثر زیست محیطی مخرب، مورد استفاده قرار گرفت این ماده دارای گرانی مشابه آب است و برای سطوح خیس ساخته شده و می‌تواند در این قبیل سطوح به صورت تزریقی و به صورت پاشش بر سطح اعمال شود (BASF 2015). بخش اعظم موادی که به عنوان مواد استحکام بخش سنگ به کار گرفته و پیشنهاد شده‌اند پلیمرهای آلی بوده‌اند، اما چند ماده غیر آلی نیز از جمله شیریه آهک در طی دهه‌های اخیر طرفداران خود را حفظ کرده است. به کارگیری مواد

در این پژوهش همچنین به این نتیجه رسیده‌اند که به علت گرانی کم، مونومرهای آلکوکسی سیلان‌ها، می‌توانند به عمق سنگ نفوذ کنند و پس از پلیمری شدن با رطوبت محیطی واکنش داده و ترکیبات سیلیکون-اکسیژن به دست می‌آید. رشد شبکه کوچک مترامک در داخل سنگ نمونه‌ای از اثرات منفی این گزینه است. علاوه بر آن ژل‌هایی که استفاده شده‌اند تمایل به شکست دارند و وقتی جریان مویری داخل آن‌ها ایجاد می‌شود تحت تأثیر فشار زیاد آسیب می‌بینند.

هدف این پژوهش تولید TEOS جدید با خواص بهبود یافته است که باعث تقویت ژل در pH خنثی شده و از پوسیدگی حاصل از اسید جلوگیری می‌کند. در این واکنش اتانل و DBLT حلال و کاتالیزورند و پس از اعمال ماده تولیدی اتانل از ترکیب خارج شده و پس از گذشت ۶ ماه، یک ماده خشک بدون ترک باقی مانده است. بهبود قابل توجه استحکام بخش پس از تثبیت و غنی سازی به علت قدرت فشرده سازی ساختار سنگ بوده که در این حالت اثر بخشی آن دو برابر بیشتر از حال معمولی است.

معمولاً برای سنجش نتیجه آزمایش‌های مختلف از روش‌های مختلف دستگاهی مانند SEM، OM، ICP-AES، TIR، RAMAN و همچنین سنجش گرما، یخ زدگی و تأثیرات آن‌ها بر تخلخل سنگ کمک می‌گیرند و تمام این مراحل را یک بار قبل درمان و یک بار بعد آن انجام می‌دهند؛ برای مثال در پژوهشی که در مجموعه کلیسای باسارابی بر روی سنگ گچ‌های دیواره انجام شد، برای حصول نتیجه اعمال هیدروکسی آپاتیت ترکیب شده با کلسیم اگزالات سه‌آبه از روش‌های مذکور استفاده شد و افزایش چسبندگی ذرات هوازدهی سطح سنگ و استحکام درونی آن‌ها تأیید شد. قبل از این آزمایش نیز از HAP در اندازه ۱۳۰ nm تا ۳۳۰ nm با حامل اتانول استفاده شد که به دلیل رطوبت بالای محتوای این ماده و تبخیر سریع حلال، ترکیب با COT تصویب شده و در به تأخیر انداختن آسیب‌ها گزینه‌ی مناسبی شناخته شد [۲۳].

از جمله مواد دیگری که برای استحکام بخشی سنگ مورد استفاده قرار گرفته‌اند فسفات آمونیم است که به علت سمیت کم و انحلال بالا در آب، بسیار مناسب است و نتایج پژوهش حاصل از آزمایش این ماده در میراث فرهنگی و معماری توسط متخصصان این حوزه انجام شده و اثر بخشی آن با دلایل عمق نفوذ مناسب، عدم تغییر رنگ در سطح سنگ و طول درمان کوتاه ثابت شده است. در استحکام بخشی سنگ‌ها معمولاً علاوه بر حلال از یک ماده دیگری تحت عنوان سورفاکتانت یا تسهیل کننده استفاده می‌کنند که به علت پایین بودن گرانی و در نتیجه نفوذ به عمق سنگ و حفظ پایداری در مقابل رطوبت محیط رایج شده‌اند. یکی از این نوع مواد n-کتیل آمین است که در ترکیب با اتانل به عنوان حلال، باعث فشرده‌گی ساختار سنگ شده و استحکام آن را افزایش می‌دهد که به دلیل امکان نفوذ راحت به مناطق آسیب دیده و عدم محدودیت اندازه، خلوص بالا و ترکیبات مشخص، پاسخ مناسبی را داده است [۲۴، ۲۵]. همچنین نتایج مطالعات دیگری ثابت کرده است که پس از درمان سنگ با استحکام بخش‌های پایه نانو، رشد نمک در لایه‌ها و سطح کمتر شده زیرا اندازه بلوره‌ها متناسب با غلظت نمک



ماده استحکام‌بخش اشاره کرد. استحکام‌بخش‌هایی که پایه آلی دارند، تخلخل ذرات آن‌ها از خود سنگ بیشتر است و همین علت باعث می‌شود اجازه دهند جریان آب چه به‌صورت نزولی و چه صعودی وارد ساختار سنگ شود و چون اغلب این مواد آب‌گریز هستند مانع از خروج نمک‌های محلول شده و برای سنگ خطرآفرینی می‌کنند. نتایج این تحقیق به‌طور آشکار اثربخش بودن درمان‌ها بر اساس استحکام‌بخش‌های پایه معدنی در مقیاس نانو یا تقویت‌شده با یک جزء دیگر را که بر روی سنگ اعمال می‌شود ثابت می‌کند. نوآوری در فناوری مواد و عقلائی بودن استفاده از علوم جدید، مبحثی درخور توجه در حوزه حفاظت و مرمت است، تهیه دانش تازه‌ای از مجموعه سامانه‌های درمان و پیشروی با علم نوین موضوعی است که استفاده از آن بسیار رایج شده و تمامی نتایج حاصل از این پژوهش‌ها مثبت و سودمند ارائه‌شده و با یک روش آزمایشگاهی خاص نظیر SEM موردسنجش قرار می‌گیرند اما به این نکته توجه نمی‌شود که آیا دریافت پاسخ از یک روش، در تمام شرایط و اقلیم‌ها سودمند و مؤثر خواهد بود و به‌طورقطع به‌یقین می‌توان بدون در نظر گرفتن کاستی‌ها، یک ماده و روش را تجویز کرد؟ آنچه در پژوهش‌های انجام‌شده جای بحث و بررسی دارد و خلا محسوب می‌شود، عدم مطالعه در مورد نکات منفی و ایرادات استفاده از نانو مواد است که تقریباً در تمامی منابع، مثبت گزارش‌شده و به بررسی بیش‌تری از معایب این روش پرداخته نشده است. انتظار می‌رود با بررسی‌های بیشتر و انتقادات سازنده، این خلا دانشی موجود، مرتفع گردد.

### تشکر و قدردانی

این مقاله برگرفته از پایان نامه دانشجوی کارشناسی ارشد مرمت اشیا فرهنگی و تاریخی سرکار خانم لیلی نعمانی خیاوی با عنوان «ارزیابی نانو ذرات سیلیس برای استحکام بخشی سنگ‌های آزاره برج شیخ حیدر مشکین شهر» است که در دانشکده حفاظت آثار فرهنگی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز در حال انجام است که بدین وسیله از این دانشگاه برای در اختیار نهادن امکانات مادی و معنوی سپاسگزاری می‌گردد.

آب‌گریز نیز خصوصاً برای سنگ‌های توف به‌واسطه نقش مؤثر آب در تخریب آنها به‌تناوب توصیه‌شده و مورداستفاده قرارگرفته است اما درنهایت باید گفت تمامی این درمان‌ها در نوع خود پرهزینه هستند و هیچ‌کدام را نمی‌توان در ابعاد بزرگ بکار برد. عمده آنها در آزمایشگاه استفاده‌شده و هنگامی که این آزمایش‌ها در محل به کار گرفته‌شده‌اند، در عمل پاسخ مناسبی برای طولانی‌مدت به همراه نداشته‌اند. این مشکلات به‌علاوه در رابطه با ساختارهای توفی موجود در فضای باز دوچندان است ازاین‌روست که برخی معتقدند استفاده از مواد گوناگون در دوره‌های مختلف می‌تواند اثرات جبران‌ناپذیری را به بار آورد [۲۹] و توجه به درمان پذیری مجدد به عنوان یکی از گزینه‌های مهم قابل‌توجه بعد از فرآیند درمان بایستی محسوب گردیده و موردتوجه قرار گیرد.

### ۵- نتیجه‌گیری

با توجه به محدود بودن مطالعات و اقدامات عملی در این حوزه و اهمیت استحکام‌بخشی در روند حفاظت و مرمت و شناخت به ویژگی سنگ‌های تاریخی و شرایط اضطراری آن‌ها و با در نظر گرفتن خاصیت و پیشینه‌ی استفاده از نانو فناوری در حفاظت و مرمت، استفاده از این ماده می‌تواند مؤثر واقع‌شده و ضرورت این تحقیق را نشان دهد. محصولات استحکام‌بخش عموماً به دو دسته آلی و معدنی تقسیم می‌شوند که عبارتند از: استحکام بخش‌های معدنی مانند سیلیس و نانو ذرات و آلی شامل سیلیکون‌ها، رزین‌ها، مواد سنتزی و کامپوزیت‌ها. مواد آلی معمولاً با قلم‌مو اعمال‌شده و پس از نفوذ به داخل منافذ سنگ و تبخیر ماده حلال، استحکام‌بخشی خود را آغاز می‌کنند. محصولات معدنی، به‌صورت محلول در آب وارد ساختار سنگ شده و با تشکیل بلوره داخل بافت سنگ، باعث تحکیم آن می‌شوند ولی نمونه‌های موجود در بازار، چه آلی و چه غیرآلی، تمام ویژگی‌های لازم را ندارند. درمان‌های معدنی معمولاً نیاز به زمان بیشتری برای تحکیم دارند و به‌طورکلی سازگارتر و بادوام‌تر از مواد آلی است؛ در کوتاه‌مدت نشان‌دهنده یک رفتار خوب هستند و در طولانی‌مدت، مشکلات کمی از آن‌ها می‌بینیم. از دیگر خصوصیات این مواد، می‌توان به تغییر رنگ به خاطر انکسار نور و تأثیر بر

### ۶- مراجع

1. L. Dei, B. Salvadori, "Nanotechnology in cultural heritage conservation: nanometric slaked lime saves architectonic and artistic surfaces from decay", *J. Cult. Heritage*. 7, 110-115, 2006.
2. M. Drdácý, Z. Slížková, G. Ziegenbalg, "A nano approach to consolidation of degraded historic lime mortars", *J. Nano Res.* 8, 13-22, 2009.
3. م. رازانی، ل. نعمانی خیاوی، "استحکام بخشی سنگ افراشته‌های شهر یتری مشکین شهر با سه ماده پارالوئید b72، رزین اپوکسی و نانو ذرات"، کنفرانس بین‌المللی مطالعات میان‌رشته‌ای نانوفناوری، ۱۳۹۸.
4. G. Exadaktylos, P. Tiano, C. Filareto, "Validation of a model of rotary drilling of rocks with the drilling force measurement system", *Res. Build. Monuments*. 6, 307-340, 2000.
5. E. Sassoni, E. Franzoni, B. Pigino, G.W Scherer, S.Naidu. "Consolidation of calcareous and siliceous sandstones by hydroxyapatite: comparison with a TEOS-based consolidant", *J. Cult. Heritage*. 14, 103-108, 2013
6. ج. آموروسو، ج. فاسینا، "فروسودگی سنگ و حفاظت از آن، آلودگی جوی، تمیز کردن، استحکام‌بخشی و حفاظت"، مترجم: رسول وطن‌دوست، میراث فرهنگی، ۱۳۷۰.
7. M. Xarrié, *Glossary of conservation*, I. Balaam, 2005.
8. W. Ginell, D. Wessel, C. Searles, ASTM E2167-01 standard guide for selection and use of stone consolidants. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2001.
9. م. رتنر، "نانو فناوری"، مترجم: میثم تهرانی، سیمای دانش، ۱۳۸۴.

10. W.S. Ginell, D.Wessel, C. Searles, ASTM E2167-01 standard guide for selection and use of stone consolidants. West Conshohocken, PA: ASTM International, **2001**.
11. E. Franzoni, B. Pigino, A. Leemann, P. Lura, "Use of TEOS for fired-clay bricks consolidation. Mater. Struct. 47, 1175-84, **2014**.
12. G.W. Scherer, G.S. Wheeler, "Silicate consolidants for stone", *Key Eng. Mater.* 39, 11-25, **2009**.
13. G. Borsoi, B. Lubelli, R. van Hees, R. Veiga, A. S. Silva, "Optimization of nanolime solvent for the consolidation of coarse porous limestone", *Appl. Phys. A*. 122, 846, **2016**.
14. E. Franzoni, B. Pigino, C. Pistolesi, "Ethyl silicate for surface protection of concrete: performance in comparison with other inorganic surface treatments", *Cem. Concr. Compos.* 44, 69-76, **2013**.
15. C. A. Price, E. Doehne, "*Stone conservation: an overview of current research*", Getty publications, **2011**.
۱۶. م. فتحی، آ. حنیفی، "نانو بیوسرامیک ها"، انتشارات ارکان دانش، ۱۳۸۶.
17. C Price, C.A Doehne, E. "*Stone conservation: an overview of current research*", Getty Publications, **2011**.
۱۸. م. رازانی، م. ا. امامی، ع. باغبان، خ. مارتینز مایتینز، **مروری** بر روش های استحکام بخشی توفهای آتشفشانی در راستای ارتقاء درمانهای مبتنی بر حفاظت سطحی در معماری دستکند روستای کندوان. مجموعه مقالات دومین همایش معماری دستکند، ۱۸-۱، ۱۳۹۴.
19. C. A Price, "The consolidation of limestone using a lime poultice and limewater", Contributions to the 1984 IIC Congress, Paris, 160-162, **1984**.
20. M. J. Mosquera, D. M. de los Santos, A. Montes, L. Valdez-Castro, "New nanomaterials for consolidating stone", *Langmuir*. 24, 2772-2778, **2008**.
21. D. Chelazzi, R. Camerini, R. Giorgi, P. Baglioni, "Nanomaterials for the consolidation of stone artifacts", *Adv. Mater. for Conservation. Stone*. 151-173, **2018**.
22. J. OteroStarini, A.E. Charola, "Nanolime for the consolidation of lime mortars: A comparison of three available products", *Constr. Build. Mater.* 181, 394-407, **2018**.
23. E. Sassoni, S. Naidu, G.W. Scherer, "The use of hydroxyapatite as a new inorganic consolidant for damaged carbonate stones", *Constr. Build. Mater.* 12, 346-355, **2011**.
24. M. Matteini, S. Rescic, F. Fratini, G. Botticelli, "Ammonium phosphates as consolidating agents for carbonatic stone materials used in architecture and cultural heritage: preliminary research", *Int. J. Archit. Heritage*. 5, 717-736, **2011**.
25. B. Lubelli, R.P. van Hees, T.G. Nijland, J. Bolhuis, "A new method for making artificially weathered stone specimens for testing of conservation treatments", *J. Archit. Heritage*. 16, 698-704, **2015**.
26. P. L.S. López-Arcea, L. Gomez-Villalba, Pinhob, M.E. Fernández-Vallec, M. Álvarez de Buergoa, R. Fort. "Influence of porosity and relative humidity on consolidation of olostone with calcium hydroxide nanoparticles: Effectiveness assessment with non-destructive techniques", *Mater. Charact.* 61, 168-184, **2010**.
27. A. Baghbanan, "Consolidation of Rock in Rocky Architecture of Kandovan Village", *J. Hous. Built. Environ.* 38, 99-114, **2019**.
28. E.Sassoni, S. Naidu, G.W. Scherer, "The use of hydroxyapatite as a new inorganic consolidant for damaged carbonate stones", *J. Cult. Heritage*. 12, 346-355, 2011.
29. M. Cirillo, M. Laurenzi, W. Panarelli, J. Stamler, "Urinary sodium to potassium ratio and urinary stone disease", *Kidney int.* 46, 1133-1139, **1994**.