

مروری بر مواد مورد استفاده در استحکام بخشی آجرهای تاریخی: مقایسه بین مواد قدیمی و نوظهور

لیلی نعمانی خیایوی^{۱*}، حسین احمدی^۲، سید محمد امین امامی^۲

۱. دانشجوی دکتری مرمت اشیا فرهنگی، گروه مرمت و باستان سنجی، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران

l.nomani@tabriziau.ac.ir*

۲. استاد، دانشکده حفاظت و مرمت، گروه مرمت و باستان سنجی، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

حفاظت از آجرهای تاریخی یکی از جنبه‌های حیاتی حفاظت از میراث است که نیازمند روش‌های استحکام بخشی مؤثر برای اطمینان از یکپارچگی ساختاری و تداوم زیبایی شناختی است چراکه استحکام بخشی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اقدامات حفاظتی و مرمتی است که برای پایدارسازی آثار آسیب‌دیده به‌خصوص در یادمان‌های تاریخی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مقاله با تمرکز بر مواد معمول برای استحکام بخشی آجرهای تاریخی با رویکرد توصیفی-تحلیلی و با استفاده از منابع کتابخانه‌ای، انجام گرفته و راه‌حل‌های سنتی و نوآورانه را با بررسی مواد مختلف مرور نموده و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آجرهای تاریخی، چالش‌های ناشی از تخریب آن‌ها و تکامل شیوه‌های استحکام بخشی را بررسی کرده است. این بررسی، مواد استحکام بخش را به مواد مبتنی بر سیلیکات، پلیمر و مواد زیستی طبقه‌بندی و اثربخشی آن‌ها را از طریق مطالعات موردی و معیارهای عملکردی ارزیابی می‌کند. علاوه بر این، مسائل مربوط به سازگاری، اثرات زیست‌محیطی و ملاحظات زیبایی‌شناختی را مورد بحث قرار می‌دهد. این یافته‌ها نیاز به تحقیق و نوآوری مداوم در مواد استحکام بخش را برای افزایش تلاش‌های حفاظتی و در عین حال حفظ اصالت ساختارهای تاریخی نشان می‌دهد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۶/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۲/۱۷

تعداد صفحات: ۱۳

شناسه دیجیتال (doi): <https://10.66224/kcr.8.4.24>

فصلنامه علمی - پژوهشی دانش حفاظت و مرمت

شاپای الکترونیکی: ۳۰۶۰-۶۲۱۷

شاپای چاپی: ۲۵۳۸-۶۰۹۳



واژگان کلیدی: آجر، استحکام بخشی، استحکام بخش، حفاظت، مرمت، مصالح متخلخل.

۱. مقدمه

عمر مصالح تاریخی متخلخل یاری می‌رساند، زمانی ضرورت می‌یابد که یک اثر در معرض خطر از دست دادن انسجام به دلیل هوازگی و تخریب قرار گیرد. در چنین شرایطی، پایدارسازی وضعیت موجود، تقویت توان مکانیکی و افزایش عمر آثار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Doehne & Price, 2011). استحکام بخشی به‌عنوان یکی از راهکارهای مؤثر در این راستا مطرح می‌شود؛ با این حال، یکی از چالش‌های اصلی در این حوزه، کمبود اطلاعات کافی درباره مشکلات، اصول و مبانی تقویت ساختاری و همچنین کارایی واقعی مواد مورد استفاده است (Kumar Ginell, 1997; Leroux et al, 2000). بر طبق سخنان برندی، افزودن یک ماده به بافت را می‌توان با در نظر گرفتن استدلال‌های نظری و عملی توجیه کرد اما باید در نظر داشت که استحکام بخشی باعث

طی قرن‌ها، انواع مصالح در فرآیند ساخت و نگهداری بناهای تاریخی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و به دلیل قدمت این آثار، همواره با چالش‌های متعددی که موجب آسیب به آن‌ها می‌شود، مواجه بوده‌اند. دلیل پرداختن به مقوله‌ی تقویت ساختاری مصالح این است که طبیعی‌ترین مسئله‌ی جهان تخریب و فرسایش است و در صورت مقابله و جلوگیری از آن، بشر ناچار خواهد بود بر روی یک کره سنگی با مواد معدنی زندگی کند که دائماً در قبال تحول آن ایستاده است اما با این حال انسان در تلاش است تا در مقابله با نیروی طبیعت، آثاری که از نظر فرهنگی برای او ارزشمند است را حفاظت کند (Daniels, 2015). در این راستا آنچه در این پژوهش دنبال می‌شود، استحکام بخشی و زیرشاخه‌های مربوط به آن است. تقویت ساختاری که به حفظ و افزایش

این نشریه از قوانین Cope پیروی می‌کند. دسترسی به این مقاله برای همگان آزاد است. هرگونه استفاده غیرتجاری از آن در صورت ارجاع مناسب، مجاز شناخته می‌شود.

برطرف شدن عامل تخریب نمی‌شود بلکه تنها ظواهر و فرآورده‌های حاصل از تخریب را تا حدی کنترل می‌کند (Daniels, 2015). 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 از طریق وارد کردن ماده دیگری به جسم اعم از هر نوع آلی یا معدنی است که برای مقاوم‌سازی و استحکام دادن به ذرات، لایه‌های متخلخل، شکننده و فرسوده‌ای که تضعیف شده، دچار ریزترک شده و یا توسط دیگر مکانیزم‌های تخریبی و هوازگی از دست‌رفته‌اند (Xarrié, 2015, ASTM, 2008).

۲. زمینه تاریخی استحکام بخشی آجر

با این حال باید این مهم را مدنظر قرارداد که تصور از عمل استحکام‌بخشی، مداخله‌ای برگشت‌ناپذیر است (Pinto and Rodrigues, 2008). در رابطه با این مسئله، در برخورد با بافت‌های تخریب‌شده متخلخل همانند سنگ و یا آجر، منتقدانی مانند راسکین در گذشته تعویض را بهتر از تخریب نمی‌دانستند هرچند ورود مواد شیمیایی به داخل بافت را خدشه‌دار شدن اصالت اثر قلمداد می‌کردند، اما در قبال تعویض قابل توجیه می‌دانستند. اما همچنان بر این موضوع تأکید داشتند که ممکن است ورود ماده در قرون بعد از ۱۹۸۰ میلادی، همچنان به‌عنوان مداخله سنگین به‌شمار رود و با توجه به گسترده شدن استفاده از مواد استحکام‌بخش، وجود یک فلسفه و مبانی در به‌کار بردن آن ضروری بود و استفاده از آن تنها در صورتی مجاز دانسته می‌شد که مرحله‌ی بعد از اعمال ماده، تخریب کلی یا جایگزینی باشد (Pieper, 1987). اما اقدامی که درمان برگشت‌ناپذیر نامیده می‌شد، امروز نیاز به بازنگری در معنا دارد و «درمان» استحکام‌بخشی نتیجه اعمال یک محصول معین به دنبال یک پروتکل خاص است و باید با در نظر گرفتن تمام جنبه‌های مربوطه اعم از نوع و خواص بستر، ویژگی‌های ماده اعمال‌شده، رویه اعمال و شرایط محیطی تعریف شود (Pinto & Rodrigues 2008) و قابلیت درمان مجدد، باید جایگزین اصل برگشت‌پذیری شود چراکه هر ماده‌ای به‌مرور خاصیت خود را از دست‌داده و به‌علاوه خارج کردن آن از داخل یک بستر امری غیرقابل انجام است و آنچه اهمیت دارد، فراهم کردن شرایط درمان مجدد در آینده، برای اثر است (دوئن و پرایس، ۱۳۹۴).

جدول ۱. ترکیبات مختلف سازنده ی آجر (فرشاد، ۱۳۷۶)

ترکیب شیمیایی	حداقل درصد موجود در آجر	حداکثر درصد موجود در آجر
اکسید سیلیسیم	۴۰	۶۰
اکسید آلومینیوم	۹	۲۱
اکسید آهن	۳	۱۲
اکسید کلسیم	-	۱۷
اکسید منیزیم	-	۴

آجرهای تاریخی به‌دلیل نقش گسترده‌شان در معماری ایران در معرض مجموعه‌ای از عوامل مخرب قرار دارند: دما و تابش شدید، نوسانات رطوبت، محلول‌های نمکی، گازهای جوی، فعالیت‌های میکروبی و همچنین کیفیت مواد خام و دمای پخت. این عوامل می‌توانند موجب انقباض و انقباض، تبلور نمک، فرسایش، حملات کلیایی و سولفاتی، انحلال و خوردگی (در حضور آرماتور آهنی) و در نهایت افزایش تخلخل، ریزترک‌ها، حفره‌ها و از دست‌دادن استحکام شوند (حجازی و همکاران، ۱۳۹۴؛ El-Badry, 2015). توزیع نمک‌های مضر که در جدول ۲ آمده نمک‌های اولیه: $CaSO_4$ ، K ، Na ، Mg ؛ نمک‌های وارده: کلرید، نیترات‌ها؛ نمک‌های حاصل از استفاده: مواد یخ‌زدایی، آتروسول‌ها، کلریدهای انبار و آشپزخانه و نیترات‌ها در اصطلاحاً به‌عنوان محرک مهم تبلور نمک و تخریب شناخته می‌شوند (Watt, 2015).

در این مرحله باید این مهم را مدنظر قرارداد که تصور از عمل استحکام‌بخشی، مداخله‌ای برگشت‌ناپذیر است (Pinto and Rodrigues, 2008). در رابطه با این مسئله، در برخورد با بافت‌های تخریب‌شده متخلخل همانند سنگ و یا آجر، منتقدانی مانند راسکین در گذشته تعویض را بهتر از تخریب نمی‌دانستند هرچند ورود مواد شیمیایی به داخل بافت را خدشه‌دار شدن اصالت اثر قلمداد می‌کردند، اما در قبال تعویض قابل توجیه می‌دانستند. اما همچنان بر این موضوع تأکید داشتند که ممکن است ورود ماده در قرون بعد از ۱۹۸۰ میلادی، همچنان به‌عنوان مداخله سنگین به‌شمار رود و با توجه به گسترده شدن استفاده از مواد استحکام‌بخش، وجود یک فلسفه و مبانی در به‌کار بردن آن ضروری بود و استفاده از آن تنها در صورتی مجاز دانسته می‌شد که مرحله‌ی بعد از اعمال ماده، تخریب کلی یا جایگزینی باشد (Pieper, 1987). اما اقدامی که درمان برگشت‌ناپذیر نامیده می‌شد، امروز نیاز به بازنگری در معنا دارد و «درمان» استحکام‌بخشی نتیجه اعمال یک محصول معین به دنبال یک پروتکل خاص است و باید با در نظر گرفتن تمام جنبه‌های مربوطه اعم از نوع و خواص بستر، ویژگی‌های ماده اعمال‌شده، رویه اعمال و شرایط محیطی تعریف شود (Pinto & Rodrigues 2008) و قابلیت درمان مجدد، باید جایگزین اصل برگشت‌پذیری شود چراکه هر ماده‌ای به‌مرور خاصیت خود را از دست‌داده و به‌علاوه خارج کردن آن از داخل یک بستر امری غیرقابل انجام است و آنچه اهمیت دارد، فراهم کردن شرایط درمان مجدد در آینده، برای اثر است (دوئن و پرایس، ۱۳۹۴).

در توجیه این مسئله همچنین، بر طبق ماده ۱۰ منشور ونیز در مواردی که روش‌های سنتی پاسخگو نباشند، استحکام‌بخشی را می‌توان با استفاده از هر روش مدرنی که برای حفاظت به کار می‌رود و کارایی آن قابل‌سنجش با داده‌های علمی و تجربی زمان خود است، انجام داد (منشور ونیز: منشور بین‌المللی حفاظت و مرمت بناها و محوطه‌ها؛ دومین کنگره بین‌المللی معماران و تکنسین‌های بناهای تاریخی، ونیز، ۱۹۶۴. تصویب‌شده توسط ای‌کوموس، ۱۹۶۵). بنابراین مجوز، مواد استحکام‌بخش می‌توانند ابزار و روش مؤثری در حفظ یادمان‌های تاریخی به‌شمار آیند (Daniels, 2015) زیرا زمانی که تخریب کنترل‌نشده، منجر به فروپاشی کامل می‌شود، استحکام‌بخشی با مواد شیمیایی به کمترین مداخله مؤثر تبدیل می‌گردد، مداخله‌ای کمتر از جایگزینی و در نهایت شدیدتر از عدم اقدام (Pieper, 1987).

استحکام‌بخش‌ها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مواد در حفاظت و مرمت مصالح متخلخل، در صورت استفاده از استانداردهای بین‌المللی، می‌تواند بسیار مفید و قابل‌اعتماد باشد. به شرطی که هنگام استفاده، ویژگی‌های اثر و همچنین ماده، مدنظر قرار گیرد. مناسب‌ترین استحکام‌بخش باید 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. 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 شیء در حال درمان را تغییر نداده و جنبه‌ی

جدول ۲. نمک های محلول آسیب رسان به آجرهای تاریخی (Watt, 2015)

منبع یا مسیر ورود	یون های غالب	نوع نمک	دسته بندی نمک ها
منشا زمین شناسی مصالح ناخالصی اولیه یا محیط ساخت منشا معدنی مواد اولیه	Ca ²⁺ SO ²⁻ ₄ K ⁺ Cl ⁻ Na ⁺ Mg ²⁺	CaSO ₄ KCl NaCl, MgCl ₂	نمک های اولیه
رطوبت محیط، آب های آلوده و آئروسول های نمکی آلودگی های زیستی و کشاورزی	Cl ⁻ NO ³⁻	نمک های کلریدی نمک های نیتراته	نمک های وارده از محیط
مواد یخ زدایی معابر ذرات معلق حاوی نمک های محلول در هوا انبار نمک و آشپزخانه اصطبل ها، فضولات دامی و فعالیت های زیستی	Ca ²⁺ SO ²⁻ ₄ K ⁺ Cl ⁻ Na ⁺ Mg ²⁺ NO ³⁻	کلرید مورد استفاده برای یخ زدایی معابر نمک منتقل شده توسط برخی آئروسول ها کلریدهای خانگی، نیترات ها	نمک های حاصل از فعالیت های انسانی

به ویژه پس از منشور ونیز، استحکام بخشی و تزریق مواد به بافت در دوره ۱۲۱۵-۱۲۳۵ هـ.ق به عنوان رویکردی برای تقویت مصالح متخلخل مانند سنگ توسعه یافت و تلاش برای یافتن مواد مناسب آغاز شد (W. H. Gutt, 1973) با این حال، در ابتدا تنها موادی چون خمیر نشاسته، صمغ ها و رزین های گیاهی، چسب های پروتئینی یا آلبومین، موم زنبور عسل و چربی در دسترس بود.

با گسترش فناوری و تجارت، دامنه وسیع تری از رزین ها و همچنین روغن های خشک کن معرفی شد و این مواد طبیعی تا اواخر قرن نوزدهم رایج ترین گزینه های مرمتی باقی ماندند (Clifton, 1980) هر چند برخی از این مواد امروزه نیز به کار می روند، اما به دلیل ماهیت ساختاری معمولاً از اصل اثر قابل تشخیص نیستند. از سوی دیگر، به دلیل کمبود مطالعات دقیق درباره تاریخچه مرمت، بسیاری از مواد استفاده شده در حفاظت به طور کامل شناخته نشده و در گذر زمان به عنوان بخشی از بدنه اصلی آثار تلقی شده اند. امروزه مکانیزم استحکام بخشی دقیق تر شده و به نحوه توزیع ماده استحکام بخش، عمق نفوذ و سازوکار اثرگذاری آن بر بستر تخریب شده اشاره دارد و بسته به نوع آسیب تغییر می کند؛ برای نمونه، زمانی که تنها لایه سطحی تخریب شده است، ایجاد یک پوشش یکدست و نسبتاً نفوذناپذیر مؤثر است، اما در شرایط جدایش دانه ای لازم است ماده تا عمق ناحیه آسیب دیده نفوذ کرده و میان دانه ها پل ایجاد کند. به بیان دیگر، نوع ماده و شیوه اعمال آن تعیین کننده مکانیزم عملکرد است و استحکام بخش ها می توانند با ایجاد پیوند شیمیایی، پر کردن شکاف ها و درزها یا پوشاندن سطح خارجی عمل کنند (Ngoma, 2009). با وجود تنوع مواد استحکام بخش که در زیر معرفی شده اند، کارایی و پیامدهای حفاظتی آن ها نه صرفاً به ماهیت ماده، بلکه به مجموعه ای از متغیرهای اجرایی و فیزیکی وابسته است؛ از این رو در ادامه، متغیرهای مؤثر بر رفتار نفوذی و عملکرد استحکام بخشی به صورت نظام مند مورد بررسی قرار می گیرند.

۴. مواد استحکام بخشی و پارامترهای مؤثر بر عملکرد آن ها

در حفاظت مصالح متخلخل تاریخی، انتخاب ماده استحکام بخش همواره تابع چند متغیر بوده است: ماهیت ماده، سازوکار عملکردی آن، توانایی ماده برای نفوذ در ماتریس و ایجاد انسجام پایدار. مطالعه ادبیات نشان می دهد که با وجود صدها تجربه موردی، چالش مشترک تمام مداخلات همچنان نفوذ محدود، نفوذ نامتوازن یا عدم کنترل نفوذ است (رازانی و نعمانی خیاوی، ۱۳۹۹)؛ بنابراین بخشی از این پژوهش شامل بررسی مواد از جنبه سختش قابلیت نفوذ، سازگاری، پایداری و محدودیت های عملکردی هر دسته از آن ها است که در ادامه ذکر خواهد شد. مواد استحکام بخش متداول در مقاله حاضر در چهار طبقه اصلی مطالعه می شوند: روغن های طبیعی و بیو پلیمرها، پلیمرهای سنتزی (آکریلیک ها و سیلان ها)، استحکام بخش های معدنی و مواد نوظهور که در ادامه هر طبقه از نظر سازوکار، عملکرد، نقاط قوت و محدودیت ها با تمرکز خاص بر رفتار نفوذی بررسی می شود (Graziani, et al 2015; Graziani et al, 2015).

۵. روغن های طبیعی و بیو پلیمرها (گوار و زانتان)

در میان رویکردهای آلی و ترکیبی مورد استفاده در حفاظت مصالح متخلخل تاریخی، طیفی از مواد شامل ترکیبات آلی معدنی، بیوپلیمرهای پلی ساکاریدی، بیوتریتمنت ها و روغن های گیاهی مورد توجه قرار گرفته اند که به عنوان بخشی از رویکردهای نوین و سازگار با محیط زیست در حفاظت و استحکام بخشی آجرهای تاریخی مطرح شده اند که هر یک مکانیزم های عملکردی متفاوتی را ارائه می دهند. ترکیبات آلی و ترکیبی، از جمله سامانه های مبتنی بر کیتوزان و دی آمونیوم فسفات (DAP)، به ویژه در

علاوه بر آن، فقدان حفاظت و نگهداری صحیح عامل شایع تسریع فرسودگی است و معمولاً نقاطی چون سقف، ناودان و نما به دلیل نفوذ آب و چرخه یخ زدگی/گشایش یخ بیشترین آسیب را نشان می دهند (Binda et al., 1990) متأسفانه امروزه به دلیل سهولت تولید آجر، در مواجهه با آجرهای آسیب دیده ترجیح بر جایگزینی است که این رویه با اصول حفاظت میراث فرهنگی در تضاد است؛ بنابراین شناخت دقیق عوامل زوال و مکانیسم های فرسودگی و اولویت بخشی به اقدامات حداقل مداخله ای برای حفظ اصالت بنا ضروری است (El-Badry, 2015).

به طور خلاصه، آجر تاریخی در معرض فرایندهای پیچیده و چندعاملی تخریب قرار دارد که ترکیبی از عوامل فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک است و ضروری است مکانیسم های تخریب به دقت شناسایی شوند تا راهکارهای پیشگیری و مرمت (با تأکید بر حداقل مداخله و احترام به اصالت) انتخاب شوند؛ اقدام شتاب زده مانند جایگزینی بدون تشخیص علمی، هم ریسک از دست رفتن داده های تاریخی را بالا می برد و هم با اصول نظری حفاظت در تضاد است (Honeyborne 1999: 153 ; El-Badry, 2015). به این منظور در ادامه مجموعه اقداماتی که در مواجهه با آثار تاریخی آجری صورت می گیرد توضیح داده شده است:

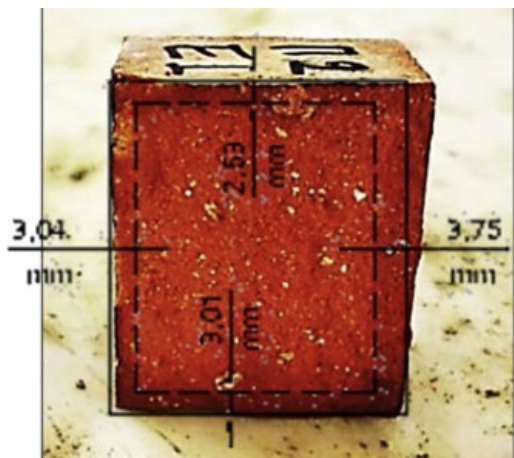
۳. روش های پیشین مرمت

روش های اولیه مرمت بر تکرار فنون و مصالحی استوار بود که در ساخت اثر استفاده شده بود؛ به طوری که اشیاء غالباً بدون توجه کافی به وضعیت اولیه و با روش جایگزینی مصالح مشابه بازسازی می شدند (Van Gemert, 1983; Williams, 2013; Horie, 2003; et al.). در مواردی که این روش ممکن نبود، از مواد و روش های روز بهره می گرفتند؛ برای مثال، در مرمت سفال های شکسته از پرچ استفاده می شد (Williams, 1983) با افزایش آگاهی نسبت به ارزش میراث تاریخی و مشاهده فرسایش و

(Nugent et al., 2009; Cultrone & Ibáñez Sánchez, 2018) چالش مهم دیگر، خطر رشد زیستی و فعالیت میکروارگانیسم‌ها در صورت استفاده نادرست یا عدم کنترل شرایط محیطی است؛ ماهیت آلی و قابلیت زیست‌تجزیه‌پذیری بیوپلیمرها می‌تواند در محیط‌های مرطوب و گرم، بستر مناسبی برای رشد قارچ‌ها و باکتری‌ها فراهم کند. این پدیده به‌ویژه در کاربردهای مبتنی بر نشاسته و پلی‌ساکاریدهای ساده‌تر گزارش شده است، اما در بیوپلیمرهای پیچیده‌تری مانند زانتان نیز، بسته به شرایط محیطی و غلظت مصرفی، بالقوه قابل وقوع است (Cultrone & Ibáñez Sánchez, 2018).

از منظر مکانیزم عملکرد، بیوپلیمرها بسته به ماهیت شیمیایی و بار الکتریکی خود رفتار متفاوتی در نفوذ و استحکام‌بخشی نشان می‌دهند. صمغ گوار، به‌عنوان یک پلی‌ساکارید خنثی، عمدتاً از طریق افزایش ویسکوزیته آب منفذی و تشکیل شبکه‌های فیزیکی مبتنی بر پیوندهای هیدروژنی میان ذرات رس عمل کرده و موجب افزایش ظرفیت نگه‌داشت آب، بهبود انسجام داخلی و افزایش حد مایع می‌شود؛ مکانیزمی که ماهیتاً فیزیکی بوده و وابستگی مستقیمی به بار سطحی کانی‌های رسی ندارد و از این رو رفتار نسبتاً پیش‌بینی‌پذیرتری از خود نشان می‌دهد (Nugent et al., 2009). در مقابل، زانتان به‌عنوان یک بیوپلیمر آنیونی، به‌واسطه وجود گروه‌های کربوکسیلات با بار منفی، وارد برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی فعال با سطوح باردار کانی‌های رسی می‌شود؛ ویژگی‌ای که سبب می‌گردد عملکرد نفوذی و استحکام‌بخشی آن به‌شدت وابسته به نوع رس، ترکیب یونی محیط و غلظت بیوپلیمر باشد و در برخی موارد منجر به نفوذ ناهمگن و کاهش کنترل‌پذیری فرآیند شود (Nugent et al., 2009). بازتاب این تفاوت‌های مکانیزمی در نتایج تجربی نیز مشاهده شده است؛ به‌گونه‌ای که الگوهای متفاوت نفوذ و رفتار رطوبتی نمونه‌های تیمار شده با گوار و زانتان در شکل‌های ۳ و ۴ گزارش شده‌اند (Cultrone & Ibáñez Sánchez, 2018).

در مجموع، اگرچه بیوپلیمرها و مواد زیستی به‌عنوان گزینه‌هایی سازگار با محیط‌زیست در حفاظت آجر تاریخی مطرح هستند و در برخی کاربردهای خاص - مانند مهار آسیب نمکی یا بهبود رفتار سطحی - عملکرد قابل‌قبولی از خود نشان داده‌اند، اما محدودیت‌های مرتبط با پایداری رطوبتی، خطر رشد زیستی و کنترل‌پذیری نفوذ نشان می‌دهد که این مواد، به‌ویژه در مقایسه با استحکام‌بخش‌های معدنی، باید با احتیاط و در چارچوب کاربردهای محدود، کوتاه‌مدت یا سطحی مورد استفاده قرار گیرند. تفاوت ماهیت شیمیایی بیوپلیمرها نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد نهایی آن‌ها دارد و نمی‌توان این مواد را به‌عنوان یک گروه همگن و بدون ریسک در حفاظت میراث معماری در نظر گرفت.



شکل ۱. مشاهده سه‌بعدی و میکروسکوپی سطح آجر تیمار شده با روغن بذر کتان پس از چرخه‌های ذوب و انجماد (Stefanidou & Karozou, 2016).

کاهش آسیب‌های ناشی از تبلور نمک‌ها نتایج امیدوارکننده‌ای نشان داده‌اند؛ با این حال، دوام و پایداری بلندمدت این مواد در برابر عوامل محیطی، تابش نور و فعالیت‌های بیولوژیکی هنوز به‌طور کامل مشخص نشده و نیازمند مطالعات میدانی بلندمدت است (Marrone & Franzoni, 2025; Pereira et al., 2021).

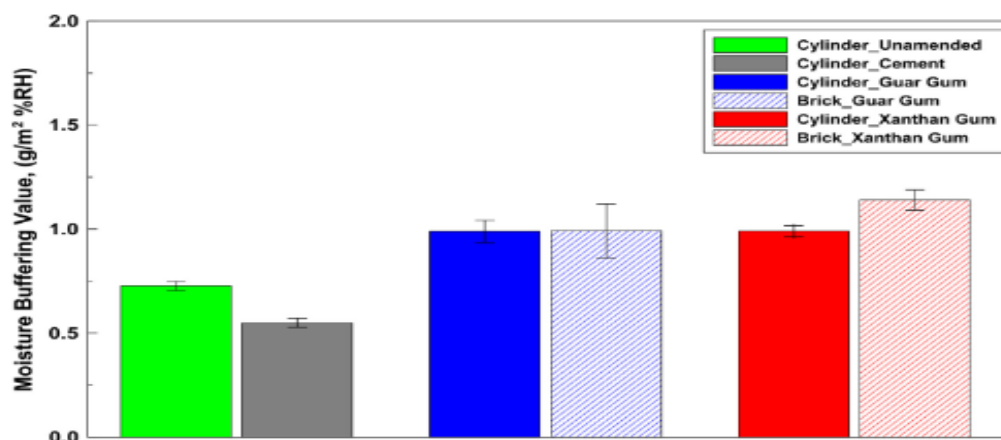
در همین چارچوب، بیوتریتمنت‌هایی نظیر روش‌های رسوب کربنات القاشده میکروبی (MICP) به‌عنوان رویکردهایی نوظهور، بهبودهایی در مقاومت در برابر جذب و انتقال آب نشان داده‌اند، اما به دلیل محدود بودن تجارب میدانی و عدم قطعیت در رفتار بلندمدت آن‌ها، در شرایط فعلی امکان توصیه گسترده آن‌ها در پروژه‌های حفاظت وجود ندارد (Pereira et al., 2021). در کنار این رویکردها، روغن‌های گیاهی به‌ویژه روغن بذر کتان به‌عنوان یکی از قدیمی‌ترین و شناخته‌شده‌ترین مواد آلی مورد استفاده در حفاظت، از طریق تشکیل یک لایه آب‌گریز سطحی و ایجاد پیوندهای اکسیداتیو، موجب انسداد نسبی منافذ و کاهش جذب موئینه آب می‌شوند (Stefanidou & Karozou, 2016). شواهد عملکردی این مواد شامل کاهش محسوس جذب آب سطحی، تشکیل یک لایه نازک و نسبتاً پیوسته آب‌گریز، انسداد جزئی مسیرهای سطحی منافذ و حفظ نسبی ظاهر و رنگ سطح (مطابق مشاهدات میکروسکوپی ارائه‌شده در شکل ۱) گزارش شده است. با این حال، محدودیت‌های ذاتی این دسته از مواد قابل چشم‌پوشی نیست؛ روغن‌های گیاهی مستعد اکسیداسیون سریع و شکست زنجیره‌های پیوندی هستند (ریموند و استوارت میلز، ۱۳۸۴) و به دلیل گرانبوی بالا، توان نفوذ عمقی محدودی دارند. افزون بر این، عملکرد آن‌ها عمدتاً کوتاه‌مدت، وابسته به شرایط اقلیمی و فاقد پایداری کافی در برابر چرخه‌های تهاجم نمک و انجماد-گشایش یخ است، امری که مانع از ایفای نقش مؤثر در تقویت سازه‌های ماتریس مصالح می‌شود. در نتیجه، مواد آلی (صرف‌نظر از تنوع شیمیایی) عمدتاً در نقش پوشش‌های سطحی قابل ارزیابی‌اند و از منظر کنترل‌پذیری نفوذ و استحکام‌بخشی عمقی، در ادبیات حفاظت به‌عنوان گزینه‌هایی ناکارآمد تلقی شده و برای تقویت عمقی مصالح تاریخی توصیه نمی‌شوند.

در مورد کاربرد بیوپلیمرها نیز ثابت شده است در استحکام‌بخشی مصالح رسی تاریخی با محدودیت‌ها و چالش‌های مشخصی همراه است که ماهیت و شدت آن‌ها به نوع بیوپلیمر و ساختار شیمیایی آن وابسته است. یکی از مهم‌ترین چالش‌های گزارش‌شده، حساسیت بالا به رطوبت محیطی است؛ به‌گونه‌ای که افزایش رطوبت نسبی می‌تواند منجر به جذب مجدد آب، کاهش مقاومت مکانیکی و افت پایداری بلندمدت شود. این رفتار به‌طور گسترده در مورد نشاسته و مشتقات آن گزارش شده و ناشی از ماهیت شدیداً آب‌دوست و ساختار غیرشبکه‌ای آن است، اما در بیوپلیمرهای پلی‌ساکاریدی دیگر نظیر گوار و زانتان نیز - هرچند با شدت کمتر - مشاهده شده است.





شکل ۲. شرایط آجرها بلافاصله پس از خارج کردن از آب. این تصویر می‌تواند به وضوح تفاوت‌های ظاهری و وضعیت فیزیکی آجرها را پس از قرارگیری در معرض آب نشان دهد که به ارزیابی عملکرد آن‌ها در برابر رطوبت کمک می‌کند. شکل چپ: نمونه درمان نشده. وسط: صمغ گوار و راست: صمغ زانتان (Muguda-Viswanath, 2019)



شکل ۳. مقادیر جذب رطوبت برای تمام نمونه‌ها (Muguda-Viswanath, 2019)

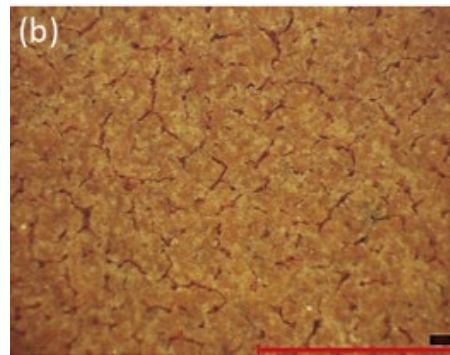
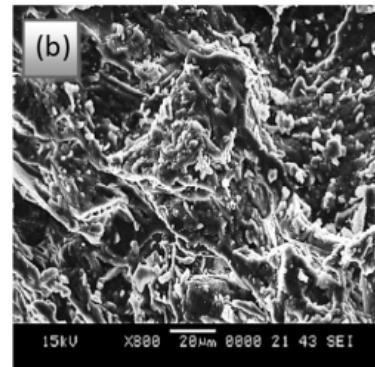
حفظ نسبی تخلخل و هم‌خوانی بهتر با بسترهای معدنی را فراهم می‌کنند (Stefanidou & Karozou, 2016).
با این حال، عملکرد سیلان‌ها به شدت تحت تأثیر شرایط اولیه بستر، از جمله رطوبت، pH و میزان تخلخل است و عدم کنترل این عوامل می‌تواند به پلیمریزاسیون ناهمگن، تغییرات موضعی در میزان نفوذ و در برخی روش‌های اعمال (مانند غوطه‌وری) بروز تغییر رنگ منجر شود (Vacchiano et al., 2008). مطالعات اخیر بر روی پلیمرهای آکریلاتی اصلاح شده، از جمله پلی‌فلوئوروسیلیکون آکریلات‌ها، عملکرد حفاظتی و نفوذی مطلوبی را در آزمون‌های آزمایشگاهی کوتاه مدت گزارش کرده‌اند (Hao et al., 2021); با این وجود، این مطالعات به‌طور صریح به پایداری بلندمدت نفوذ، رفتار ماده

۶. پلیمرهای سنتزی (B-72 و آلکوکسی سیلان‌ها)
این دسته از مواد شامل دو گروه با سازوکار و عملکرد متمایز است. آکریلیک‌های کلاسیک نظیر Paraloid B-72 عمدتاً با تشکیل یک لایه محافظ سطحی آب‌گریز، موجب کاهش جذب آب و بهبود نسبی انسجام سطح می‌شوند؛ با این حال، نفوذ آن‌ها به عمق بستر بسیار محدود بوده و کاربرد آن‌ها اساساً به حفاظت سطحی محدود می‌شود (Vaz et al., 2008; Constâncio et al., 2010; Muguda-Viswanath, 2019; Xu et al., 2019). در مقابل، سیلان‌ها و آلکوکسی سیلان‌ها با قابلیت نفوذ به درون ماتریس متخلخل، پلیمریزاسیون در حضور رطوبت و تشکیل ژل‌ها و پیوندهای سیلیکاتی زیرسطحی، امکان کاهش جذب آب همراه با

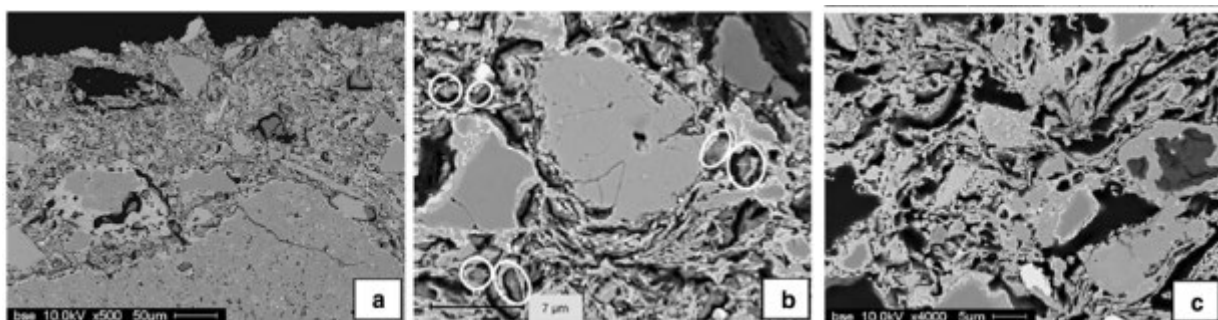
۷. مواد معدنی

تترااتیل ارتوسیلیکات (TEOS) و دیگر اتوکسی سیلان‌ها به‌عنوان یکی از شناخته‌شده‌ترین استحکام‌بخش‌های معدنی برای آجرهای تاریخی شناخته می‌شوند؛ پس از نفوذ به ماتریس متخلخل، TEOS هیدرولیز شده و به سیلانول تبدیل می‌گردد که از طریق پلیمریزاسیون متوالی ژل سیلیکا تشکیل می‌دهد. این ژل در ریزمنافذ رسوب کرده و سبب پُرشدگی موضعی، افزایش انسجام ساختاری و بهبود مقاومت سطحی می‌شود؛ شواهد ریزساختاری از تصاویر ESEM نشان می‌دهد که ژل سیلیکا عمدتاً در نواحی نزدیک سطح و در ریزمنافذ تجمع می‌یابد (تصاویر a و b در شکل ۶) در عمق حدود ۱۰ میلی‌متر حضور پراکنده و غیرپیوسته دارد (c-e) و در عمق حدود ۱۶ میلی‌متر تقریباً حضور ندارد (f)، که دلالت بر عمق نفوذ محدود و ناهمگن TEOS دارد (Franzoni et al., 2014; Salazar-Hernandez et al., 2019; Zhao et al., 2020). از منظر عملکرد ماکروسکوپی، این تمرکز سطحی معمولاً با افزایش مقاومت فشاری و کاهش جذب آب سطحی همراه است؛ با این حال یافته‌های ریزساختاری نشان می‌دهد که این بهبودها غالباً موضعی بوده و نمی‌توان آن‌ها را معادل استحکام‌بخشی یکنواخت کل مقطع در نظر گرفت. از طرف دیگر، حساسیت فرآیند به رطوبت اولیه، خطر انسداد منافذ در غلظت‌های بالا و احتمال ایجاد ناهمگنی عمقی در صورت کنترل ناکافی پلیمریزاسیون، از محدودیت‌های عملی TEOS هستند و آزمایش‌های محلی پیشین برای تعیین شرایط بهینه اجرا ضروری‌اند (Franzoni et al., 2014). در کنار اتوکسی سیلان‌ها، دسته‌ای از درمان‌های کلسیمی نوظهور مانند کلسیم هیدروکسی‌گلی‌کولات معرفی شده‌اند که به‌واسطه واکنش کنترل‌شده با دی‌اکسید کربن و سیلیکای فعال آجر، تشکیل فازهای کلسیمی-سیلیسی را تسهیل می‌کنند؛ شواهد آزمایشگاهی نشان می‌دهد که این ترکیبات می‌توانند نفوذ، مقاومت مکانیکی و دوام را بهبود بخشند بدون کاهش قابل‌توجه نفوذپذیری بخار آب-ویژگی‌ای که برای حفظ «تنفس» مصالح متخلخل حیاتی است (Öztürk, 1992; Yang et al., 2025). همچنین گزارش‌هایی درباره استفاده از هیدروکسید باریم و مشتقات آن برای پرکردن ترک‌ها و تولید سیلیکات/کربنات باریم و افزایش دوام وجود دارد، هرچند این حوزه نیازمند مطالعات بیشتر و بررسی اثرات ثانویه شیمیایی بر ماتریس آجر است (Guo et al., 2024; Martinez et al., 2016; Zárrega et al., 2010; Zhao et al., 2013).

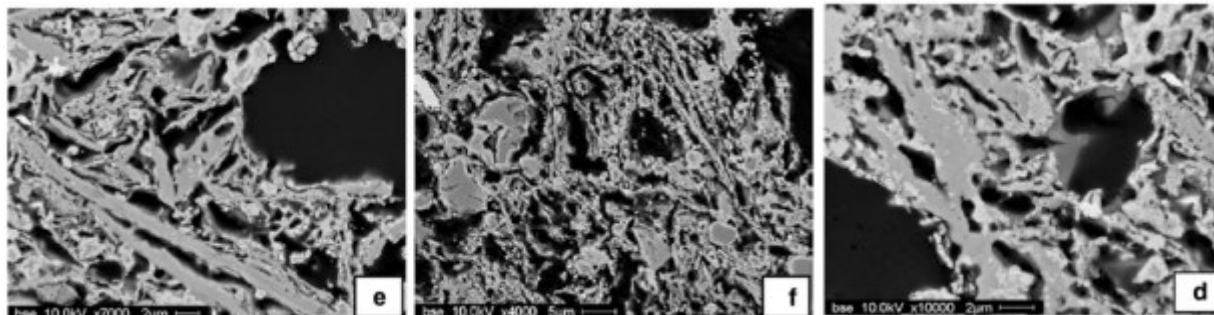
در مقیاس‌های زمانی طولانی، یا مسائل مرتبط با برگشت‌پذیری و سازگاری با مداخلات حفاظتی آینده نمی‌پردازند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که حتی مواد پرکاربرد و نوین، علی‌رغم عملکرد آزمایشگاهی مناسب، همچنان با عدم قطعیت‌هایی در زمینه پیش‌بینی‌پذیری رفتار درازمدت در شرایط واقعی آثار تاریخی مواجه‌اند.



شکل ۴. مشاهده سه بعدی نمونه تیمار شده با سیلان (پس از چرخه‌های ذوب و انجماد و تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از همان نمونه) SN (تصویر b) ساختار سطح و تغییرات ناشی از تیمار را نشان می‌دهد. (Stefanidou & Karozou, 2016)



شکل ۵. مشاهده ESEM از نمونه‌های استحکام‌بخشی شده. تصویر a: سطح مقطع نزدیک به سطح خارجی؛ مناطق خاکستری تیره شامل ژل سیلیکا رسوب‌شده در داخل منافذ (عمدتاً منافذ کوچک) هستند. تصویر b: نمای سطح خارجی استحکام‌بخشی شده. نقاط ۱-۶ (با دایره سفید مشخص شده‌اند) رسوبات سیلیکا را که توسط EDS تجزیه و تحلیل شده‌اند، نشان می‌دهند. تصویر c, d و e: تصاویر گرفته‌شده در عمق حدود ۱۰ میلی‌متری از سطح خارجی، جایی که هنوز وجود ژل سیلیکا تشخیص داده می‌شود. تصویر f: تصویر گرفته‌شده در عمق حدود ۱۶ میلی‌متری، جایی که ژل سیلیکا تقریباً وجود ندارد (Franzoni et al., 2014).



شکل ۵. مشاهده ESEM از نمونه‌های استحکام بخشی شده. تصویر a: سطح مقطع نزدیک به سطح خارجی؛ مناطق خاکستری تیره شامل ژل سیلیکا رسوب شده در داخل منافذ (عمدتاً منافذ کوچک) هستند. تصویر b: نمای سطح خارجی استحکام بخشی شده. نقاط ۱-۶ (با دایره سفید مشخص شده اند) رسوبات سیلیکا را که توسط EDS تجزیه و تحلیل شده اند، نشان می دهند. تصویر c، d و e: تصاویر گرفته شده در عمق حدود ۱۰ میلی متری از سطح خارجی، جایی که هنوز وجود ژل سیلیکا تشخیص داده می شود. تصویر f: تصویر گرفته شده در عمق حدود ۱۶ میلی متری، جایی که ژل سیلیکا تقریباً وجود ندارد (Franzoni et al., 2014).

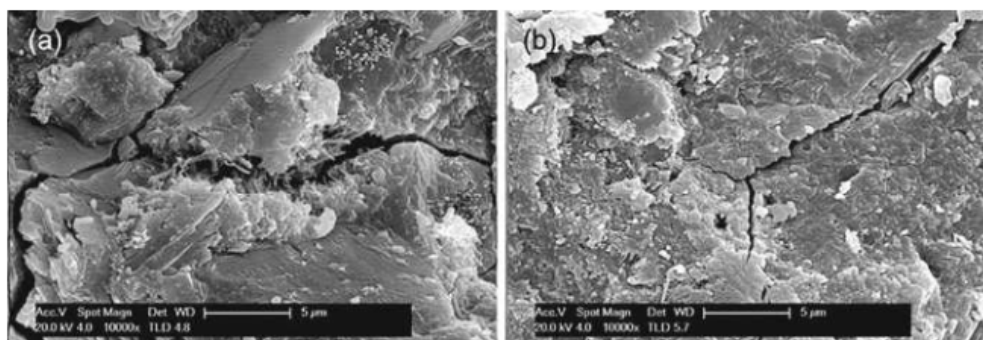
بهبود پراکنش GO شده و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها را به دنبال دارد (Lin et al., 2016). تصاویر SEM ارائه شده در شکل ۷ نشان می‌دهد که در مراحل ابتدایی اعمال، GO به صورت ناپیوسته روی سطح قرار می‌گیرد، در حالی که پس از ۲۸ روز، توزیع یکنواخت‌تر و پرشدن شکاف‌ها و ریزترک‌ها قابل مشاهده است (Faria et al., 2017). از نظر مکانیزم برهم‌کنش، اگرچه گروه‌های عاملی اکسیژنی GO امکان برهم‌کنش‌های فیزیکی و الکترواستاتیکی با فاز معدنی را فراهم می‌کنند، نتایج FTIR نشان می‌دهد که در مراحل اولیه درمان، پیوند شیمیایی کووالانسی پایدار میان GO و بستر معدنی تشکیل نمی‌شود. بنابراین، نقش اصلی این گروه‌های عاملی در بهبود آب‌دوستی، پراکنش بهتر و ایجاد چسبندگی فیزیکی است، نه ایجاد اتصال شیمیایی دائمی (Faria et al., 2017). همچنین، بار منفی ناشی از این گروه‌ها می‌تواند به دفع یون‌های کلرید کمک کرده و نفوذ نمک‌ها به درون بافت را کاهش دهد، که این عملکرد به صورت شماتیک در شکل ۸ نشان داده شده است.

کاربرد GO در حفاظت مصالح تاریخی، از جمله آجرهای تاریخی، نتایج امیدوارکننده‌ای در بهبود خواص مکانیکی و دوام نشان داده است. مطالعات میدانی بر روی مقبره‌های آجری در اسوان مصر و همچنین فرمولاسیون ملاط‌های آهکی اصلاح شده با GO حاکی از افزایش مقاومت فشاری و بهبود رفتار دوام است (Bheel et al., 2023; Faria et al., 2017). با این حال، عملکرد نهایی GO به شدت وابسته به نوع حامل، روش اعمال (قلم‌مو یا اسپری)، غلظت و شرایط محیطی است؛ به گونه‌ای که در مقادیر بالا، تشکیل لایه‌های ضخیم سطحی می‌تواند خطر ترک خوردگی یا جداسازی پوشش را افزایش دهد (Rescic et al., 2023; Korayem et al., 2020).

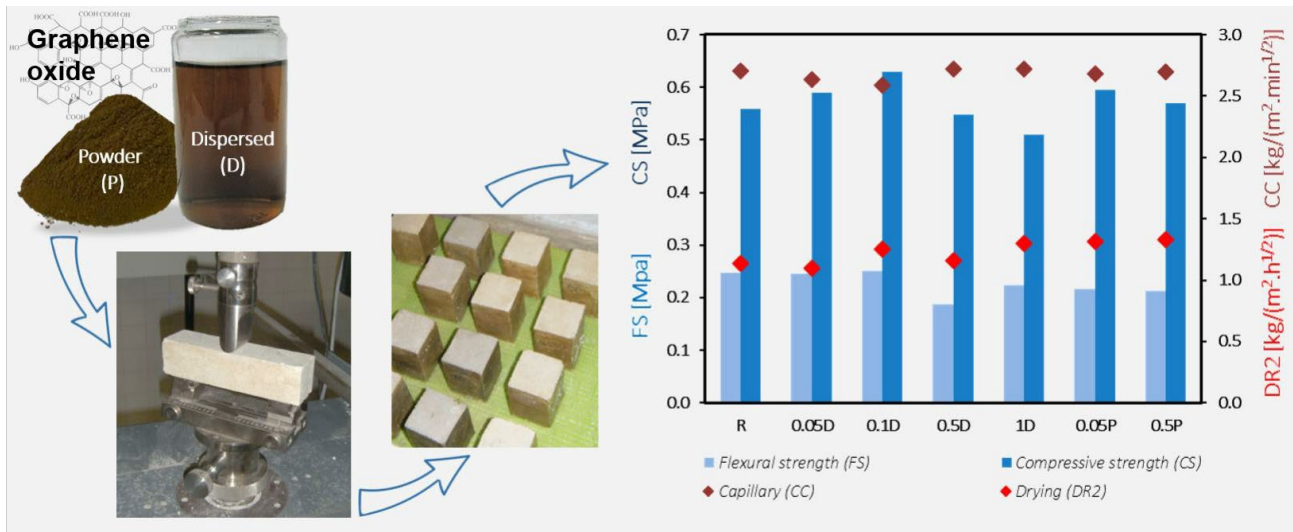
۸. گرافن اکسید

گرافن اکسید (GO) یک نانوماده کربنی دوبعدی و ترکیب معدنی محسوب نمی‌شود، بلکه از اکسیداسیون شیمیایی گرافن یا گرافیت به دست می‌آید. ساختار GO شامل صفحات شش‌ضلعی کربنی است که در طی فرآیند اکسیداسیون، گروه‌های عاملی اکسیژنی شامل هیدروکسیل (OH-)، اپوکسی (O-) و کربوکسیل (COOH-) بر سطح و لبه‌های آن ایجاد می‌شود. این گروه‌های عاملی ناشی از فرآیند اکسیداسیون، نظم بلوری اولیه گرافن را تا حدی مختل کرده و رسانایی الکتریکی و حرارتی آن را کاهش می‌دهند، اما هم‌زمان باعث افزایش آب‌دوستی و قابلیت پراکنش GO در محیط‌های آبی و معدنی می‌شوند (Faria et al., 2017). مطالعات اخیر نشان داده‌اند که اعمال لایه‌های نازک GO بر سطح مصالح متخلخل تاریخی می‌تواند جذب آب و جذب مویرگی را به ترتیب تا حدود ۴۰٪ و ۵۷٪ کاهش دهد؛ به گونه‌ای که با افزایش مقدار GO، شدت این اثر افزایش می‌یابد. این عملکرد عمدتاً ناشی از نقش پوششی و سدکنندگی فیزیکی نانورقه‌ها در مسیرهای انتقال رطوبت و یون‌ها است و نه ایجاد پیوند شیمیایی مستقیم با بستر (Faria et al., 2017). به همین دلیل، GO معمولاً به عنوان یک ماده مناسب برای استحکام بخشی سطحی معرفی می‌شود، زیرا نفوذپذیری بخار آب را به طور محسوس کاهش نمی‌دهد و مانع تنفس مصالح نمی‌شود.

Lin و همکاران (۲۰۱۶) رفتار پراکنش GO را در محلول‌های شبیه‌سازی شده منافذ بررسی کردند و نشان دادند که حضور یون‌های کلسیم دوظرفیتی موجب تجمع و فلوکولاسیون نانورقه‌های GO می‌شود. این پدیده می‌تواند توزیع ناهمگن GO را در بسترهای معدنی تشدید کند. با این حال، افزودن مواد سیلیسی مکمل (مانند silica fume) باعث



شکل ۶. تصویر SEM از نمونه تحت درمان سمت چپ: اعمال در مرحله ابتدایی و سمت راست: درمان با اکسید گرافن پس از ۲۸ روز از گیرش (Faria et al., 2017)



شکل ۷. خلاصه‌ای از عملکرد ذرات گرافن اکسید در درمان مصالح تاریخی (Faria et al., 2017)

تماس، به‌طور محسوسی گزارش شده است (Salazar-Hernández et al., 2009). این یافته‌ها نشان می‌دهد که کاهش قطبیت حامل به‌تنهایی تضمین‌کننده حذف کامل پدیده تورم نیست و ارزیابی رفتار حامل - بستر باید به‌صورت مستقل و موردی انجام گیرد.

در این چارچوب، بررسی حامل‌های آلی غیرقطبی اهمیت ویژه‌ای یافته است. برخی پژوهش‌ها گزارش کرده‌اند که حلال‌هایی مانند هگزان، به‌دلیل عدم ایجاد برهم‌کنش تورمی با ذرات رس و فقدان تحریک ساختار بین‌لایه‌ای، می‌توانند به‌عنوان حامل‌های بالقوه برای انتقال مواد استحکام‌بخش آلی یا آلی-معدنی مورد توجه قرار گیرند (Martinez et al., 2016; Cultrone & Ibáñez Sánchez, 2018; González-Sánchez et al., 2023). استفاده از چنین حامل‌هایی می‌تواند خطر انسداد منافذ، ناهمگنی نفوذ و افت کارایی عمقی را به‌طور معناداری کاهش دهد، هرچند محدودیت‌های ایمنی، زیست‌محیطی و عملیاتی آن‌ها نیز باید هم‌زمان مدنظر قرار گیرد (Erdogan et al., 2023). بنابراین، محدودیت‌های گزارش شده در برخی کاربردهای استحکام‌بخش‌های سیلیکاتی نظیر تترااتیل‌ارتوسیلیکات (TEOS)، لزوماً به ذات این مواد مربوط نمی‌شود، بلکه در بسیاری موارد ناشی از انتخاب نامناسب حامل و عدم انطباق آن با ویژگی‌های مینرالوژیک بستر است. این موضوع به‌ویژه در بستری غنی از رس اهمیت دوچندان می‌یابد، جایی که تورم، انسداد منافذ و ناهمگنی عمقی می‌تواند کل فرآیند استحکام‌بخشی را تحت‌الشعاع قرار دهد.

در نتیجه، انتخاب سامانه استحکام‌بخش باید به‌صورت یک سیستم یکپارچه شامل ماده، حامل و بستر در نظر گرفته شود. تمرکز صرف بر خواص مکانیکی یا شیمیایی ماده استحکام‌بخش، بدون تحلیل رفتار حامل در تماس با بستر، رویکردی ناقص و بالقوه گمراه‌کننده است. طراحی آگاهانه فرآیند، مستلزم آزمون‌های پیشین نفوذ، بررسی تورم رس‌ها و تحلیل ریزساختاری پس از اعمال درمان است تا از دستیابی به استحکام‌بخشی مؤثر، پایدار و سازگار با اصول حفاظت میراث فرهنگی اطمینان حاصل شود (Cultrone & Ibáñez Sánchez, 2018; Salazar-Hernández et al., 2009; González-Sánchez et al., 2023).

با وجود مزایای ذکرشده، GO بازدارنده مؤثری در برابر عبور بخار آب نیست و نفوذپذیری بخار را به‌طور قابل‌توجهی کاهش نمی‌دهد؛ از این رو در شرایطی که کنترل انتقال بخار اهمیت بالایی دارد، این ویژگی می‌تواند محدودیت تلقی شود. همچنین، عدم تشکیل پیوند شیمیایی پایدار با بستر معدنی، پایداری بلندمدت پوشش GO را در شرایط محیطی سخت (نوسانات رطوبت و دما) با تردید مواجه می‌کند. علاوه بر این، وابستگی شدید عملکرد GO به شرایط اعمال و سازگاری با مصالح تاریخی نشان می‌دهد که استفاده از این نانوماده نیازمند کنترل دقیق فرآیند و آزمون‌های پیشین است و نمی‌توان آن را به‌عنوان یک راهکار عمومی و بدون ارزیابی موردی توصیه کرد.

۹. نقش نوع حامل در انتقال، نفوذ و توزیع ماده استحکام‌بخش در ماتریس مصالح متخلخل

استحکام‌بخشی مصالح متخلخل تاریخی نظیر آجر، صرفاً به انتخاب نوع ماده استحکام‌بخش محدود نمی‌شود، بلکه به‌طور بنیادین تحت‌تأثیر نوع حامل و برهم‌کنش آن با بستر قرار دارد. بخش قابل‌توجهی از ترکیبات سازنده آجرهای تاریخی شامل فازهای سیلیکاتی و کانی‌های رسی است که رفتار فیزیکوشیمیایی آن‌ها در تماس با حامل‌های مختلف، به‌ویژه حامل‌های قطبی، می‌تواند به‌طور مستقیم بر نفوذ، توزیع و کارایی نهایی فرآیند استحکام‌بخشی اثر بگذارد (Cultrone & Ibáñez Sánchez, 2018).

در سامانه‌های مبتنی بر حامل‌های آبی، نفوذ آب به درون منافذ غنی از رس، که عمدتاً تحت تأثیر نیروهای مویرگی هدایت می‌شود، می‌تواند منجر به هیدراتاسیون کاتیون‌های بین‌لایه‌ای در رس‌های منبسط‌شونده گردد. این فرآیند به تورم ساختاری، انبساط موضعی و در نهایت انسداد منافذ منجر می‌شود؛ پدیده‌ای که نه‌تنها نفوذ بیشتر ماده استحکام‌بخش را محدود می‌کند، بلکه موجب ناهمگنی عمقی و کاهش کارایی کلی درمان می‌گردد. در چنین شرایطی، کاهش عمق نفوذ الزاماً ناشی از ناکارآمدی ماده استحکام‌بخش نیست، بلکه نتیجه ناسازگاری حامل با ویژگی‌های مینرالوژیک بستر است.

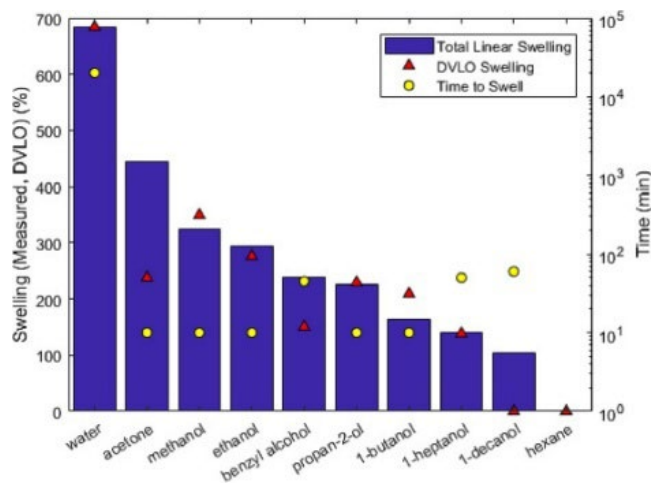
مطالعات تجربی نشان داده‌اند که اگرچه میزان تورم کانی‌های رسی در حامل‌هایی نظیر اتانول نسبت به آب به‌طور قابل‌توجهی کمتر است، اما این مقدار صفر نبوده و همچنان می‌تواند در بازه‌های زمانی کوتاه افزایش یابد؛ به‌گونه‌ای که تورم رس‌های منبسط‌شونده در اتانول پس از چند دقیقه

۱.۱ جمع بندی

در جمع بندی عملی برای کاربرد در پروژه های مرمتی آجر تاریخی، شواهد نشان می دهد که درمان های معدنی کنترل شده (اتوکسی سیلان ها با طراحی مناسب، ترکیبات کلسیمی نوین و ملاط های آهکی/پوزولانی) در بسیاری از موارد ترکیب مطلوبی از نفوذ پذیری قابل کنترل، پایداری طولانی مدت و سازگاری فیزیکی شیمیایی با آجر ارائه می دهند؛ در مقابل، مواد آلی و بیوتریتمنت ها می توانند راه حل های هدفمند و سازگار با محیط برای مسائل خاصی مانند کنترل نمک یا درمان های سطحی فراهم آورند، اما نگرانی هایی درباره پایداری رطوبتی، رشد زیستی، اکسیداسیون و کنترل پذیری نفوذ آن ها وجود دارد که استفاده گسترده آن ها را بدون آزمون های میدانی و طراحی شرایط اعمال به طرز معناداری محدود می سازد (Pereira et al., 2021; Marrone & Franzoni, 2025; Nugent et al., 2009; Cultrone & Ibáñez Sánchez, 2018).

در نتیجه، تصمیم گیری مناسب باید مبتنی بر آزمون های نفوذ، ارزیابی ریزساختاری (SEM/ESEM) و سناریوهای اقلیمی-محلی باشد؛ برای تقویت های سطحی و کنترل نمک می توان گزینه های آلی یا بیوتریتمنت های مشخص را در نظر گرفت؛ اما برای اهدافی که نیاز به استحکام بخشی عمیق و دوام بلندمدت دارند، ترکیبات معدنی کنترل شده و ملاط های هماهنگ با ماتریس (به ویژه آهک هیدرولیک و پوزولان ها) اولویت منطقی تری دارند، مگر آن که نتایج مطالعات میدانی بلندمدت خلاف آن را نشان دهد. ملاط های سنتی، به ویژه آهک هیدرولیک همراه با اضافات پوزولانی مانند silica fume یا metakaolin، همچنان به عنوان درمان هایی با سازگاری شیمیایی و فیزیکی مطلوب با آجر تاریخی مطرح اند؛ این ملاط ها به دلیل حفظ نسبت بهتری از خواص حرارتی و رطوبتی نسبت به ملاط های سیمانی، در بلندمدت انعطاف پذیری و دوام بیشتری نشان می دهند و اغلب به عنوان گزینه مرجح در پروژه های عملی مرمت توصیه می شوند (Conserv®; Yang et al., 2025).

به طور کلی، دسته معدنی تمایل دارد سازگاری بلندمدت و قابلیت کنترل شیمیایی بهتری ارائه دهد، اما هر ترکیب معدنی نیز مستلزم آزمون های نفوذی، بررسی واکنش های ثانویه و تحلیل ریزساختاری پیش از کاربرد در محل است.



شکل ۸. نمودار میزان تورم اتفاق افتاده در ذرات رس موجود داخل آجر در مقابل حامل های مختلف (Erdogan et al., 2023).

۱.۰ پارامترهای فیزیکی و جریان پذیری ماده و تأثیر آن ها بر نفوذ پذیری

مطالعات نشان می دهد که کاهش غلظت و گرانیوی ماده استحکام بخش معمولاً موجب افزایش قابلیت نفوذ آن می شود؛ با این حال این افزایش نفوذ الزاماً به معنای افزایش کارایی نیست. کاهش بیش از حد غلظت می تواند به افت میزان اثرگذاری و انسجام بخشی منجر شود. در مقابل، نفوذ ماده با غلظت بالا تا عمق مشخصی از سنگ ممکن است موجب انسجام بیش از حد در بافت گردد که در صورت عدم نیاز واقعی بستر، پیامدهای نامطلوبی نظیر انسداد منافذ، حبس رطوبت، افزایش ناهمگونی مقاومت مکانیکی و تشدید آسیب های ثانویه را به همراه دارد.

در این میان، اندازهی ذرات یا مولکول های مؤثر ماده نیز نقش مهمی در عبور از شبکهی منافذ ایفا می کند؛ به گونه ای که عدم تطابق اندازهی ذرات با توزیع منافذ می تواند منجر به توقف حرکت ماده، تجمع در سطح یا لایه های کم عمق و در نهایت توزیع ناهمگن شود.

جدول ۳. مقایسه بین دسته های مختلف مواد استحکام بخش

Stefanidou & Karozou, 2016; Vaz et al., 2008; Constâncio et al., 2010; Muguda-Viswanath, 2019; Xu et al., 2019; Hao et al., 2021; Vacchiano et al., 2008; Nugent et al., 2009; Cultrone & Ibáñez Sánchez, 2018; Franzoni et al., 2014; Martinez et al., 2016; Erdogan et al., 2023; ریوند و استوارت میلز، ۱۳۸۴

مزایا	معایب	برگشت پذیری	قابلیت نفوذ	نوع ماده
چسبندگی بالا، انعطاف پذیری	احتمال ناسازگاری، برگشت ناپذیری	پایین	متوسط	آلی
سازگاری معدنی با بستر، دوام بالا	CO ₂ / تأثیر کند، نیاز به رطوبت	متوسط	کم تا متوسط	معدنی
زیست پذیری، تجزیه پذیر	پایداری پایین، نیاز به بررسی بیشتر	بالا	کم	بیوپلیمر
نفوذ پذیری بالا، عملکرد هدفمند	اطمینان پایین، داده های بلندمدت محدود	متغیر	بالا	نوظهور

جدول ۴. مهم ترین ویژگی های استحکام بخش های موجود در حوزه حفاظت و مرمت مصالح متخلخل

تناسب با ساختار سنگ	ارزیابی عمق نفوذ	مکانیسم عمل	میزان اثربخشی	سایر موارد
تناسب بین ماده ی مصرفی و سنگ هدف از نظر نوع مواد تشکیل شده و ویژگی های فیزیکی و شیمیایی تا رفتار و واکنش آن بعد از درمان قابل پیش بینی باشد.	دارای اندازه ی ذرات ریز باشد تا بتواند در عمق بیش تری از سنگ نفوذ کرده و پاسخ گوی ترک ها و سایر آسیب های موجود باشد.	خنثی باشد و با ساختارهای سنگ وارد واکنش نگردد. باعث توقف رشد میکروارگانیسم ها شده و با تشکیل فیلم داخل ساختار سنگ، یک لایه ی محافظ ایجاد کند.	از نظر طول درمان و مدت زمان مصونیت سنگ در حد مطلوب باشد و طول عمر بالایی نیز داشته باشد تا به آسانی از ساختار سنگ خارج نشده و بقای اثر را تا مدت زمان بیشتری تضمین کند.	آسیب رسان به محیط نباشد. دچار تغییر رنگ نگردد. در سطح سنگ رسوب نکند، به راحتی تغییر ساختار ندهد.

بررسی ادبیات علمی و تجربیات میدانی نشان می دهد که پژوهش های آکادمیک منتشر شده در ایران که به طور مشخص و نظام مند به استحکام بخشی آجر تاریخی پرداخته باشند، همچنان محدود است. اگرچه مطالعات داخلی متعددی بر ضرورت ارتقای پایداری مکانیکی، کاهش تخریب و مدیریت رطوبت در مصالح متخلخل تاریخی تأکید کرده اند، اما داده های تجربی منتشر شده درباره عملکرد بلندمدت مواد استحکام بخش مشخص، به ویژه در قالب مقالات داوری شده، اندک و پراکنده است. بخش عمده این دانش در گزارش های فنی، پایان نامه ها و اسناد اجرایی باقی مانده و کمتر به ادبیات علمی رسمی راه یافته است.

در عمل، پروژه های مرمتی در ایران عمدتاً بر استفاده از ملاط های سنتی آهکی، آهک هیدرولیک طبیعی و افزودنی های پوزولانی متکی بوده اند. این انتخاب بیش از آن که ناشی از فقدان گزینه های فناورانه باشد، ریشه در سازگاری شیمیایی و فیزیکی این مواد با آجر تاریخی، حفظ نفوذپذیری بخار آب و رفتار نسبتاً پایدار آن ها در گذر زمان دارد. شواهد میدانی حاصل از مرمت دیوارها و سازه های تاریخی در شهرهایی مانند یزد و اصفهان نشان می دهد که این رویکرد، در صورت اجرای صحیح، می تواند عملکرد قابل قبولی در بازه های زمانی چندده ساله ارائه دهد.

در مقابل، کاربرد مستقیم استحکام بخش های سیلیکاتی معدنی نظیر TEOS یا مواد آلی و بیوپلیمری در پروژه های مرمت تاریخی ایران، به صورت گسترده و مستند گزارش نشده است. موارد استفاده محدود کارگاهی یا آزمایشی، در برخی شرایط - به ویژه در محیط های با رطوبت بالا - با چالش هایی نظیر نفوذ نامگن، تمرکز سطحی ژل سیلیکا، یا کاهش نفوذپذیری بخار همراه بوده اند که در مواردی به جدایش یا ناپایداری پوشش انجامیده است. استفاده تجربی از پوشش های پلیمری تجاری نیز، هر چند با هدف افزایش مقاومت مکانیکی صورت گرفته، اغلب منجر به اختلال در چرخه رطوبتی مصالح و تشدید آسیب های ثانویه شده است.

تحلیل این چالش ها نشان می دهد که مشکلات موجود الزاماً ناشی از ذات مواد نیست، بلکه ترکیبی از عوامل زمینه ای شامل شرایط اقلیمی ایران، نوسانات شدید رطوبتی خشک-مرطوب، اجرای مداخلات بدون پیش آزمون های سازگاری، و کمبود داده های میدانی بلندمدت در پایش عملکرد مواد استحکام بخش است. در چنین بستری، انتخاب ماده بدون در نظر گرفتن بستر، حامل، روش اعمال و رفتار زمانی، رویکردی پرریسک تلقی می شود.

از منظر حفاظتی، انتخاب گزینه مناسب برای ایران مستلزم رویکردی محتاطانه و چندمعیاره است. آهک هیدرولیک طبیعی همراه با افزودنی های سیلیسی ملایم، به عنوان گزینه ای با سازگاری بالا، حفظ نفوذپذیری بخار و پایداری زمانی مناسب، همچنان قابل اعتمادترین راهکار برای بسیاری از

بسترهای آجری تاریخی محسوب می شود. سیلیکات های معدنی کنترل شده، نظیر TEOS در غلظت های بهینه و با انتخاب دقیق حامل، می توانند در اقلیم های خشک تا نیمه خشک عملکرد قابل قبولی داشته باشند، مشروط بر آن که آزمون های نفوذ، سازگاری و پایش پس از اجرا به طور نظام مند انجام شود. ترکیبات نوظهور نظیر بیوپلیمرهای اصلاح شده یا سامانه های ترکیبی آلی-معدنی نیز تنها در چارچوب مطالعات کارگاهی، پایلوت های میدانی و ارزیابی بلندمدت قابل توصیه اند و نمی توان آن ها را به عنوان راهکارهای عمومی تلقی کرد.

در فرآیند حفاظت، انتخاب ماده استحکام بخش، حامل مناسب و شرایط اعمال، نقشی تعیین کننده در موفقیت مداخله دارد. مصالح تاریخی به دلیل بافت متخلخل، ناهمگنی ساختاری و تنوع ترکیبات معدنی، واکنش های متفاوتی نسبت به تیمارهای شیمیایی و طبیعی نشان می دهند؛ از این رو، ارزیابی علمی عملکرد مواد از جنبه های فنی، زیست محیطی و مرمتی ضرورتی انکارناپذیر است. تدوین پروتکل های استاندارد پیش آزمون شامل ثبت شرایط محیطی، ویژگی های نمونه، نوع حامل، ویسکوزیته، روش اعمال و زمان بندی، برای کنترل عمق و یکنواختی نفوذ امری کلیدی محسوب می شود. همچنین، انتخاب روش اعمال باید بر اساس یک ماتریس تصمیم گیری متناسب با تخلخل، حساسیت تزئینی و ابعاد بستر انجام شده و سپس در قالب پایلوت میدانی ارزیابی گردد.

از سوی دیگر، هرگونه مداخله حفاظتی باید مبتنی بر شناخت دقیق ساختار ماده، آسیب شناسی و مکانیسم های تخریب باشد. تخریب در مصالح متخلخل، چه در مقیاس ماکرو و چه میکرو، حاصل برهم کنش عوامل ذاتی، ساختاری، محیطی و انسانی است و تخمین میزان پیشرفت هوازگی، نقشی کلیدی در تصمیم گیری درباره ضرورت و نوع استحکام بخشی دارد. این ارزیابی می تواند از طریق شاخص های شیمیایی، فیزیکی، مکانیکی، مطالعات کانی شناسی و آزمون های میدانی کمی و کیفی انجام گیرد.

در نهایت، بررسی تطبیقی مواد استحکام بخش نشان می دهد که دسته بندی آن ها صرفاً بر اساس منشأ طبیعی یا مصنوعی، رویکردی ساده انگارانه است. آنچه عملکرد، دوام و ریسک حفاظتی یک ماده را تعیین می کند، ماهیت شیمیایی، مکانیزم برهم کنش با بستر و رفتار آن در محیط متخلخل است. استحکام بخش های آلی رزینی، علی رغم بهبود سریع مقاومت، با چالش های برگشتناپذیری و ناسازگاری زمانی مواجه اند؛ مواد معدنی واکنشی از منظر سازگاری مزیت دارند اما کنترل پذیری آن ها حساس است؛ بیوپلیمرها برای کاربردهای محدود قابل بررسی اند؛ و مواد نانومقیاس، علی رغم پتانسیل بالا، همچنان نیازمند داده های بلندمدت هستند.

بر این اساس، انتخاب ماده استحکام بخش باید در چارچوب یک رویکرد سیستماتیک و چندمعیاره انجام شود که هم زمان ویژگی های شیمیایی

منابع / References

- Anupama, V. A., Sassoni, E., & Santhanam, M. (2024). Consolidants in Salt-Weathered Masonry: Retention and Efficiency of DAP and TEOS. *RILEM Technical Letters*, 9, 76-86.
- Baghbanan, Alireza. Bakhshi, Mehran. Mohammadi, Hashem Al-Husseini. (2019). Investigation of different improvers on the properties of weak rocks. *Scientific-Research Journal of Marine Engineering*, 2018 10;13(26):35-45. (In Persian)
- [باغبانان، علیرضا. بخشی، مهران. محمدی، هاشم الحسینی. (۱۳۹۸). بررسی بهبود دهنده های مختلف بر روی خواص سنگ های ضعیف. مجله علمی-پژوهشی مهندسی دریا. ۲۰۱۸. ۱۰(۲۶):۳۵-۴۵.]
- Bheel, N. Mohammed, B. S. Liew, M. S. & Zawawi, N. A. W. A. (2023). Effect of graphene oxide as a nanomaterial on the durability behaviors of engineered cementitious composites by applying RSM modelling and optimization. *Buildings*, 13(8), 2026.
- Borsoi, G. Lubelli, B. van Hees, R. Veiga, R. & Silva, A. S. (2016). Optimization of nanolime solvent for the consolidation of coarse porous limestone. *Applied Physics A*, 122, 1-10.
- Borsoi, G. Lubelli, B. van Hees, R. Veiga, R. & Silva, A. S. (2016). Understanding the transport of nanolime consolidants within Maastricht limestone. *Journal of Cultural Heritage*, 18, 242-249.
- Cultrone, G. V. & Ibáñez Sánchez, P. V. (2018). Consolidation with ethyl silicate: how the amount of product alters the physical properties of the bricks and affects their durability.
- Daniels, C. (2015). *Stone restoration handbook: A practical guide to the conservation repair of stone and masonry*. Crowood.
- Drdácký, Miloš. a, Zuzana Slížková^{1,b} and Gerald Ziegenbalg. 2009. A Nano Approach to Consolidation of Degraded Historic Lime Mortars. *Journal of Nano Research Online*. 13-22
- El-Badry, A. (2019). Deterioration mechanisms affecting the bricks used in the building of the water wells at karnak temples, luxor, egypt. *Egyptian Journal of Archaeological and Restoration Studies*, 9(1), 13-25.
- Elert, K. Bel-Anzué, P. Monasterio-Guillot, L. & Pardo, S. (2019). Performance of alkaline activation for the consolidation of earthen architecture. *Journal of Cultural Heritage*, 39, 93-102.
- Erdogan, A. R. Whitford, A. C. Underwood, T. R. Sellick, C. Patel, R. Skipper, N. T. & Greenwell, H. C. (2023). Swelling of compacted bentonite in organic solvents: Correlation of rate and extent of swelling with solvent properties. *Applied Clay Science*, 107000, 241.
- Faria, P. Duarte, P. Barbosa, D. & Ferreira, I. (2017). New composite of natural hydraulic lime mortar with graphene oxide. *Construction and Building Materials*,

ماده، خصوصیات بستر، شرایط محیطی، اصول نظری حفاظت و پیامدهای بلندمدت مداخله را در نظر گیرد؛ رویکردی که برای زمینه های تاریخی ایران، نه یک انتخاب، بلکه یک ضرورت علمی و اخلاقی محسوب می شود.

۱۲. نتیجه گیری

استفاده از استحکام بخش های طبیعی و نوظهور در درمان آجرهای تاریخی هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارند. استحکام بخش های طبیعی معمولاً با هزینه کمتر و زیست سازگاری بالا همراه هستند، اما ممکن است دوام کمتری داشته باشند. از سوی دیگر، مواد نوظهور مانند اکسید گرافن خواص مکانیکی بسیار بهتری ارائه می دهند، اما هزینه تولید بالاتری دارند بنابراین نکات می توان گفت در حوزه ی مرمت و به ویژه استحکام بخشی هیچ ماده ای وجود ندارد که درمان همه جانبه و مفید باشد و تمام نیازهای آثار را از تمامی جوانب پوشش دهد و هر کدام از مواد معرفی شده دارای مزایا و معایبی هستند که با توجه به تعدد و تنوع مواد معمول در استحکام بخشی در آثار آجری، برای حفاظت گران، چالش بزرگی را ایجاد کرده است که در پی آن، ضرورت معرفی و مقایسه هر یک از مواد موجود مشخص می شود. علاوه بر آن متخصصان همواره به دنبال راهی برای حصول بهترین و کارآمدترین نتیجه هستند. مهم ترین معیار در انتخاب یک ماده برای درمان موفق نفوذپذیری و غیر مخرب بودن آن است. بر طبق معرفی و تشریح های انجام شده از هر ماده، به نظر می رسد می توان با در نظر داشتن عمق نفوذ ماده استحکام بخش، عدم تغییر وزن و رنگ، افزایش مقاومت فیزیکی و مقاومتی و همچنین پایداری و سازگاری ماده و بافت، کمک شایانی به حفاظت از این میراث گونه فرهنگی در راستای اولویت بندی حفاظتی نمود زیرا عدم دقت بر این موارد و نبود چنین اولویت هایی موجب بروز ایرادات و مشکلات بسیاری در امر حفاظت و مرمت خواهد گردید. در نهایت پیشنهاد می شود انتخاب مواد استحکام بخش در یادمان های متخلخل، در بحث عملی و تئوری مطالعه ی بیشتری گردد و امکان موفقیت درمان در مقیاس عملی نیز مورد ارزیابی بیشتری قرار گیرد. در نهایت، انتخاب بهترین ماده بستگی به شرایط خاص پروژه، نیازهای حفاظتی، بودجه و نوع آجر تاریخی مورد استفاده دارد. ترکیب این مواد نیز می تواند راه حلی مؤثر برای دستیابی به خواص مطلوب باشد.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از رساله دکتری خانم لیلی نعمانی خیابوی با راهنمایی جناب آقای دکتر حسین احمدی و جناب آقای دکتر سید محمد امین امامی دفاع شده در دانشگاه هنر اصفهان است. لذا از دانشگاه مربوطه به جهت حمایت های مادی و معنوی قدردانی می گردد.

حامیان مالی

وجود ندارد
تضاد منافع
وجود ندارد

- K. Bayer, Moz'nosti hodnocení efektivity konsolidace poréznych anorganický ch materiálu°, in: Padesát let používání organokřemíčitánu° na území České republiky, Proceedings of ICOMOS (in Czech), Národní muzeum, Národní památkový ústav, Duben 16, Praha, 2008, pp. 35–42.
- Korayem, A. H. Ghoddousi, P. Javid, A. S. Oraie, M. A. & Ashegh, H. (2020). Graphene oxide for surface treatment of concrete: A novel method to protect concrete. *Construction and Building Materials*, 243, 118229.
- 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>.
- La Russa, M. F. Rovella, N. Ruffolo, S. A. Scarciglia, F. Macchia, A. Licchelli, M. ... & Randazzo, L. (2019). Consolidation of earthen building materials: a comparative study. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 11, 4643-4652.
- Leroux L, Vergès-Belmin V, Costa D, Delgado Rodrigues J, Tiano P, Snethlage R, Singer B, Massey S, De Wi E. 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).
- Li, T. Fan, Y. Wang, K. Song, S. Liu, X. Bu, N. ... & Bashir, S. (2021). Methyl-modified silica hybrid fluorinated Paraloid B72- as hydrophobic coatings for the conservation of ancient bricks. *Construction and Building Materials*, 299, 123906.
- Lin, C. Wei, W. & Hu, Y. H. (2016). Catalytic behavior of graphene oxide for cement hydration process. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 89, 128-133.
- Marrone, C., & Franzoni, E. (2025). Enhancing the durability of historic brick masonry: The role of diammonium phosphate and chitosan in reducing salt-induced damage. *Journal of Cultural Heritage*, 73, 150-157.
- Martinez, P. Soto, M. Zunino, F. Stuckrath, C. & Lopez, M. (2016). Effectiveness of tetra-ethyl-ortho-silicate (TEOS) consolidation of fired-clay bricks manufactured with different calcination temperatures. *Construction and Building Materials*, 106, 209-217.
- Mostafavi, Seyyed Mohammad Taqi (1979). A look at the art of Iranian architecture, Tehran Cement Joint Stock Company, North Cement Joint Stock Company, Tehran (In Persian)
- [مصطفوی، سیدمحمدتقی (۱۳۵۹). نگاهی به هنر معماری ایران، شرکت سهامی سیمان تهران، شرکت سهامی سیمان شمال، تهران.]
- Muguda-Viswanath, S. (2019). Biopolymer stabilised earthen construction materials (Doctoral dissertation, Durham University).
- 156, 1150-1157.
- Farshad, Mehdi. 1997. History of Engineering in Iran. Third edition Tehran: Balkh affiliated to the Neyshabur Foundation. (In Persian)
- [فرشاد، مهدی. ۱۳۷۶. تاریخ مهندسی در ایران. چاپ سوم تهران: بلخ وابسته به بنیاد نیشابور]
- Franzoni E, Pigino B, Leemann A, Lura P. Use of TEOS for fired-clay bricks consolidation. *Materials and structures*. 2014 Jul 1;47(7):1175-84.
- Franzoni, E., Sassoni, E., Piagnani, G., & Schueremans, L. (2014). Use of TEOS for fired-clay bricks consolidation. *Materials and Structures*, 47, 1683–1694. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0120-7>.
- Ginell, W. S. D. Wessel, And C. Searles. ASTM Standard E2167 - 01(2008) Standard Guide for Selection and Use of Stone Consolidants. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008, DOI: 10.1520/E2167-01R08
- González-Sánchez, B. Sandoval-Castro, K. Navarro-Ezquerria, A. Ramírez-Casas, J. Sanchez-Calvillo, A. Alonso-Guzmán, E. M. & Navarro-Mendoza, E. G. (2023). Development and intervention proposal with earthen refurbishments with vegetal origin gel (VOG) for the preservation of traditional adobe buildings. *Heritage*, 6(3), 3025-3042.
- Graziani, G. Sassoni, E. Franzoni, E. 2015. Consolidation of porous carbonate stones by an innovative phosphate treatment: mechanical strengthening and physical-microstructural compatibility in comparison with TEOS-based treatments. *Heritage Science*. 2015, Vol. 3, 1, pp. 1-6.
- Graziani, G. Sassoni, E. Franzoni, E. 2015. Experimental study on the salt weathering resistance of fired clay bricks consolidated by ethyl silicate. *Materials and Structures*. 2015, Vol. 49, 7, pp. 2525–2533.
- Guo, S., Yan, J., Chen, W., Yang, F., Liu, Y., Zhang, K., ... & Li, Y. (2024). Conservation of the weathering bricks in historical buildings using the alcoholic solution of barium hydroxide. *Construction and Building Materials*, 452, 138887.
- Hao, J. Yu, L. Cui, Y. Wan, W. & Huang, J. (2021). Novel micron-thick brick cladding of polyfluorosilicone acrylates, a case study of conservation of historic brick wall in Hongcun village. *RSC advances*, 11(28), 17399-17407.
- Hejazi, M. Hejazi, B; and Hejazi, S. (2015). The evolution of traditional Iranian architecture throughout history. *Journal of Architecture and Urban Planning*, 39(3), 188-207.(In Persian)
- [حجازی، م. حجازی، ب؛ و حجازی، س. (۱۳۹۴). سیر تحول معماری سنتی ایرانی در طول تاریخ مجله معماری و شهرسازی، ۳۹(۳)، ۱۸۸–۲۰۷]
- Jokilehto J. History of architectural conservation. Routledge; 2007 Jun 7.



- Stefanidou, M. & Karozou, A. (2016). Testing the effectiveness of protective coatings on traditional bricks. *Construction and Building Materials*, 111, 482-487.
- Vacchiano, C. D. Incarnato, L. Scarfato, P. & Acierno, D. (2008). Conservation of tuff-stone with polymeric resins. *Construction and Building Materials*, 22(5), 855-865.
- Van Gemert, D. Filip Van Rickstal, K. U. Ignoul, B. S. Triconsult, N. V. & Toumbakari, B. E. E. (2003, September). Structural consolidation and strengthening of masonry: historical overview and evolution. In VI International Conference Materials Science and Restoration, Karlsruhe (pp. 1-20).
- W. H. Gutt, Conservation of Stone. The Next Steps, Stone Industries (London), May-June (1973).
- Watt, D. (2015). *Surveying historic buildings*. Routledge.
- Xarrié i Poveda, Mireia. "El llenguatge de la conservació-restauració d'obres d'art." (2015).
- Yang, H., Wang, L., Wang, Z., Huang, G., Xing, Y., Liu, Y., ... & Wang, Z. (2025). Conservation of the weathered bricks in ancient constructions using a novel protectant of calcium hydroxy glycolate. *npj Heritage Science*, 13(1), 81.
- Zárraga, R., Cervantes, J., Salazar-Hernandez, C., & Wheeler, G. (2010). Effect of the addition of hydroxyl-terminated polydimethylsiloxane to TEOS-based stone consolidants. *Journal of Cultural Heritage*, 11(2), 138-144.
- Zhang, H. Liu, Q. Liu, T. & Zhang, B. (2013). The preservation damage of hydrophobic polymer coating materials in conservation of stone relics. *Progress in Organic Coatings*, 76(7-8), 1127-1134.
- Zhao, J., Luo, H., Wang, L., Li, W., Zhou, T., & Rong, B. (2013). TEOS/PDMS-OH hybrid material for the consolidation of damaged pottery. *Heritage Science*, 1(1), 12.
- Nugent, R. A. Zhang, G. & Gambrell, R. P. (2009). Effect of exopolymers on the liquid limit of clays and its engineering implications. *Transportation Research Record*, 2101(1), 34-43.
- Öztürk, I. (1992). Alkoxysilanes consolidation of stone and earthen building materials (Doctoral dissertation, University of Pennsylvania).
- Pereira, A. S., Oliveira, A., Lemos, P. C., Guerra, J. P., Candeias, A., & Faria, P. (2021). Biotreatment of ceramic bricks: The impact of the application method of an innovative bioproduct on biomineralization. *Construction and Building Materials*, 300, 124050.
- Pieper, R. (1987). *The Preservation of Stone Today: Technology Awaits Philosophy*.
- Pinto AF, Rodrigues JD. Stone consolidation: The role of treatment procedures. *Journal of Cultural heritage*. 2008 Jan 1;9(1):38-53. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2007.06.004>.
- 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.
- Razani, Mehdi and Leili Nomani Khiawi. (2019). A review of strengthening stone using nanotechnology. *Studies in the World of Color*, 10(3), 55-64. (In Persian)
- رازانی مهدی و لیلی نعمانی خیاوی. (۱۳۹۹). مروری بر استحکام بخشی سنگ با استفاده از فناوری نانو. *مطالعات در دنیای رنگ*, ۱۰(۳), ۵۵-۶۴.
- Rescic, S. Mattone, M. Fratini, F. & Luvidi, L. (2023). Conservation of Earthen Bricks in Architecture: An Experimental Campaign to Test Different Treatments on Vernacular Built Heritage. *Heritage*, 6(2), 1541-1566.
- Riederer, J. (1971). Stone preservation in Germany. *Studies in Conservation*, 16(sup1), 125-134.
- Rodrigues, J. D. Basic steps in conservation interventions Multidisciplinary and interdisciplinary requirements, CHARISMA international course in stone conservation Lisbon, May 7th- 18th, 2012.
- Salazar-Hernández, C., Alquiza, M. J. P., Salgado, P., & Cervantes, J. (2010). TEOS-colloidal silica-PDMS-OH hybrid formulation used for stone consolidation. *Applied Organometallic Chemistry*, 24(6), 481-488.
- Salazar-Hernández, C., Zárraga, R., Alonso, S., Sugita, S., Calixto, S., & Cervantes, J. (2009). Effect of solvent type on polycondensation of TEOS catalyzed by DBTL as used for stone consolidation. *Journal of sol-gel science and technology*, 49(3), 301-310.
- Scherer, G. W. & Wheeler, G. S. (2009). Silicate consolidants for stone. In *Key Engineering Materials* (Vol. 391, pp. 1-25). Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.391.1>.



reversibility and long-term stability; mineral consolidants and lime–pozzolan systems provide the best balance among penetration depth, chemical compatibility, durability, and vapor permeability (Franzoni et al., 2014; Yang et al., 2025); and emerging nanomaterials, despite their promising potential, still lack sufficient long-term performance data (Faria et al., 2017).

The Situation in Iran and Implementation Challenges

Studies indicate that systematic research on historic brick consolidation in Iran remains limited, with much of the available knowledge confined to technical reports and academic theses. In practice, lime-based mortars, natural hydraulic lime, and pozzolanic additives remain the most common and compatible conservation approach, whereas the widespread application of modern polymeric and silicate-based materials faces challenges such as uneven penetration, reduced vapor permeability, and insufficient long-term performance data.

Conclusion

Ultimately, no single consolidant material can fulfill all conservation requirements for historic brick. The selection of a consolidant must be based on a multi-criteria decision-making framework, incorporating penetration testing, microstructural analysis, long-term monitoring, and adherence to conservation theory and ethical principles. Under current conditions, controlled mineral-based treatments and lime–pozzolan systems represent the most rational choice for deep and durable consolidation, while organic materials, biopolymers, and nanomaterials should be applied cautiously and within limited, well-controlled contexts.

Acknowledgements

This article is an extract from Ms. Leyli Nomani Khiawi's doctoral thesis, defended under the guidance of Dr. Hossein Ahmadi and Dr. Seyyed Mohammad Amin Emami at Isfahan University of Arts. Therefore, the relevant university is grateful for its material and moral support.

Sponsors

None

Conflicts of Interest

None

Keywords: Bricks, consolidation, consolidation materials, Conservation, restoration, porous materials.

the adoption of the Venice Charter-the conservation approach shifted from replacement toward in situ strengthening and minimum intervention (Pieper, 1987). According to contemporary perspectives, consolidation should be understood as a process based on the interaction among the substrate, consolidant material, environmental conditions, and retreatability, since absolute reversibility is often impractical and has been largely replaced by the principle of retreatability (Pinto & Rodrigues, 2008; Doehne & Price, 2015).

Classification of Consolidation Materials and Performance Analysis

Organic Materials, Natural Oils, and Biopolymers

Organic materials such as linseed oil, starch, guar gum, and xanthan gum are among the oldest substances used in the conservation of porous materials. Vegetable oils reduce capillary water absorption and partially block pores by forming hydrophobic surface layers and oxidative bonding networks (Stefanidou & Karozou, 2016). However, due to rapid oxidation, limited penetration depth, high viscosity, and short-term durability, these materials are generally considered unsuitable for deep structural consolidation (Raymond & Stewart Mills, 2005). Polysaccharide-based biopolymers such as guar and xanthan gums can, under certain conditions, temporarily enhance strength by increasing physical cohesion among particles and interacting with clay minerals. Nonetheless, their high sensitivity to moisture, susceptibility to biological growth, water reabsorption, and limited long-term stability remain major constraints (Nugent et al., 2009; Cultrone & Ibáñez Sánchez, 2018). Consequently, these materials are primarily recommended for short-term, surface-level treatments or salt-control applications (Pereira et al., 2021).

Synthetic Polymers (Acrylics and Silanes)

Acrylic resins such as Paraloid B72- create hydrophobic surface films that reduce water absorption and moderately enhance surface cohesion; however, their penetration into the brick matrix is limited, and their function remains largely superficial (Vaz et al., 2008; Constâncio et al., 2010; Muguda-Viswanath, 2019). In contrast, alkoxysilanes and silanes are capable of penetrating pore networks and increasing internal cohesion through polymerization and the formation of subsurface silicate bonds (Stefanidou & Karozou, 2016). Nevertheless, their performance is highly dependent on initial substrate moisture, pH, porosity, and application method, and improper control may result in uneven penetration, pore blockage, or color alteration (Vacchiano et al., 2008; Hao et al., 2021).

Mineral-Based Consolidants

Tetraethyl orthosilicate (TEOS) is among the most widely used mineral consolidants. After penetrating

porous substrates, it undergoes hydrolysis and forms silica gel deposits within micropores, thereby enhancing cohesion and surface resistance (Franzoni et al., 2014). Microstructural studies indicate that silica gel accumulation predominantly occurs near the surface, with limited and heterogeneous penetration depth (Salazar-Hernandez et al., 2019; Zhao et al., 2020). Alongside TEOS, emerging calcium-based compounds-such as calcium hydroxyglycolate-and lime-pozzolan systems have been proposed as alternatives with greater chemical compatibility, improved vapor permeability, and superior long-term durability (Yang et al., 2025; Öztürk, 1992). Lime-pozzolan mortars, particularly in Iranian conservation projects, have demonstrated satisfactory long-term performance over several decades (Conserve).

Emerging Materials and Nanomaterials (Graphene Oxide)

Graphene oxide (GO), as a two-dimensional nanomaterial, can reduce capillary water absorption by up to approximately 57% through lowering water uptake and creating a physical barrier against moisture and ionic penetration (Faria et al., 2017). GO primarily functions through physical obstruction and electrostatic interactions and does not form stable chemical bonds with mineral substrates (Lin et al., 2016). Although preliminary laboratory and field studies indicate improvements in compressive strength and durability (Bheel et al., 2023), GO performance is highly dependent on application method, concentration, carrier type, and environmental conditions, and excessive concentrations may lead to cracking or coating delamination (Rescic et al., 2023; Korayem et al., 2020).

The Role of Carrier Type, Penetration, and Physical Parameters

One of the key findings of this research is that the success of consolidation depends not only on the consolidant material itself, but also on carrier type, substrate behavior, and mineralogical characteristics (Cultrone & Ibáñez Sánchez, 2018). Water-based carriers may induce clay mineral swelling, pore blockage, and reduced penetration, whereas non-polar organic carriers can, in certain cases, provide more uniform penetration (Martinez et al., 2016; González-Sánchez et al., 2023). Furthermore, the viscosity, concentration, and particle size of consolidants must be compatible with the pore network of the substrate to prevent surface accumulation and uneven penetration (Salazar-Hernández et al., 2009).

Comparative Summary

Scientific evidence indicates that organic materials and biopolymers are suitable primarily for short-term and surface-level applications but exhibit limited durability; synthetic polymers offer rapid performance but limited



An Overview of The Materials Used In The Consolidation of Historical Bricks: Comparison Between Old and New Materials

Leyli Nemani Khiyavi^{1*}; Hossein Ahmadi²; Seyed Mohammad Amin Emami²

1. PhD student of restoration of cultural and historical objects, Department of Restoration and Archaeology, Isfahan Art University, Iran

lnomani@tabriziau.ac.ir*

2. Professor, Faculty of Conservation and Restoration, Department of Restoration and Archaeology, Isfahan University of Arts, Isfahan, Iran

Received: 2025.09.09

Accepted: 2026.05.07

doi: <https://10.66224/kcr.8.4.24>



Knowledge of Conservation and Restoration

pISSN: 2538-6093 eISSN: 3060-6217

This journal adheres to COPE guidelines.

Access to this article is free for all. Any non-commercial use of it is permitted, provided appropriate attribution is given.

The conservation of historic bricks is considered one of the fundamental components in safeguarding architectural heritage, as brick, one of the predominant materials in Iran's historic architecture is exposed to a wide range of complex weathering and deterioration processes. Consolidation, as one of the most important conservation interventions, is employed to enhance structural cohesion, reduce vulnerability, stabilize decay, and improve the durability of porous materials (Doehne & Price, 2011). Nevertheless, although consolidation can mitigate the effects of deterioration, it does not necessarily eliminate the root causes of decay, and when improperly applied, it may result in undesirable secondary and long-term consequences (Daniels, 2015; Kumar Ginell, 1997).

The Necessity of Consolidation in the Conservation of Historic Brick

Historic bricks, due to their specific mineralogical composition, high porosity, variability in raw material quality, and firing conditions, are vulnerable to numerous agents such as temperature fluctuations, moisture, soluble

salts, atmospheric pollution, corrosive gases, biological activity, and freeze-thaw cycles (El-Badry, 2015; Watt, 2015). These factors can lead to increased porosity, microcrack development, salt crystallization, dissolution of mineral phases, sulfate attacks, and ultimately the reduction of mechanical strength and gradual structural disintegration (Hejazi et al., 2015; El-Badry, 2019). Within this context, consolidation becomes necessary when the cohesion of the material matrix is critically threatened by weathering and erosion, and when stabilizing the existing condition, extending service life, and enhancing mechanical performance are prioritized as conservation objectives (Doehne & Price, 2011).

Conceptual and Historical Evolution of Consolidation

In the early periods of restoration, interventions were largely based on material replacement or the use of traditional substances such as gums, starch, protein-based adhesives, beeswax, and vegetable oils (Clifton, 1980; Williams, 1983). With growing awareness of the value of cultural heritage and the development of conservation theory-particularly following