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

لیلی نعمانی خیاوی[۱*]، حسین احمدی[۲]، سید محمدامین 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

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: ۶۲۱۷-۳۰۶۰

شاپای چاپی: ۶۰۹۳-۲۵۳۸

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

چکیده

حفاظت از آجرهای تاریخی یکی از جنبه های حیاتی حفاظت از میراث است که نیازمند روش های استحکام‌بخشی مؤثر برای اطمینان از یکپارچگی ساختاری و تداوم زیبایی‌شناختی است چراکه استحکام‌بخشی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اقدامات حفاظتی و مرمتی است که برای پایدارسازی آثار آسیب‌دیده به خصوص در یادمان های تاریخی، مورداستفاده قرار می‌گیرد. این مقاله با تمرکز بر مواد معمول برای استحکام‌بخشی آجرهای تاریخی با رویکرد توصیفی-تحلیلی و با استفاده از منابع کتابخانه‌ای، انجام‌گرفته و راه‌حل‌های سنتی و نوآورانه را با بررسی مواد مختلف مرور نموده و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آجرهای تاریخی، چالش‌های ناشی از تخریب آن ها و تکامل شیوه‌های استحکام‌بخشی را بررسی کرده است. این بررسی، مواد استحکام‌بخش را به مواد مبتنی بر سیلیکات، پلیمر و مواد زیستی طبقه‌بندی و اثربخشی آن ها را از طریق مطالعات موردی و معیارهای عملکردی ارزیابی می کند. علاوه بر این، مسائل مربوط به سازگاری، اثرات زیست‌محیطی و ملاحظات زیبایی‌شناختی را موردبحث قرار می دهد. این یافته‌ها نیاز به تحقیق و نوآوری مداوم در مواد استحکام‌بخش را برای افزایش تلاش‌های حفاظتی و در عین‌حال حفظ اصالت ساختارهای تاریخی نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: آجر، استحکام‌بخشی، استحکام‌بخش، حفاظت، مرمت، مصالح متخلخل.

۱. مقدمه

طی قرن‌ها، انواع مصالح در فرآیند ساخت و نگهداری بناهای تاریخی مورداستفاده قرار گرفته‌اند و به‌دلیل قدمت این آثار، همواره با چالش‌های متعددی که موجب آسیب به آن ها 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 این‌حال 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، استحکام‌بخشی و زیرشاخه‌های مربوط به آن است. تقویت ساختاری که به حفظ و افزایش عمر مصالح تاریخی متخلخل یاری می‌رساند، زمانی ضرورت می‌یابد که یک اثر در معرض خطر از دست دادن انسجام به‌دلیل هوازدگی 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. p.10). استحکام‌بخشی به‌عنوان یکی از راهکارهای مؤثر در این راستا مطرح می‌شود؛ با این‌حال، 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 استحکام‌بخشی باعث

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/kcr.8.4.24]

برطرف شدن عامل تخریب نمی‌شود بلکه تنها ظواهر و فراورده‌های حاصل از تخریب را تا حدی کنترل می کند (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 تضعیف‌شده، دچار ریزترک شده و یا توسط دیگر مکانیزم‌های تخریبی و هوازدگی از دست‌رفته‌اند (Xarrié, 2015, ASTM, 2008).

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 متخلخلی 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 به شمار 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 روش های 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 به شمار آیند (Daniels, 2015) زیرا زمانی که تخریبِ 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 بین المللی، می تواند بسیار مفید و قابل‌اعتماد باشد. به شرطی که هنگام استفاده، ویژگی های اثر و همچنین ماده، مدنظر قرار گیرد. مناسب ترین استحکام‌بخش باید از نظر ساختار و ترکیب مشابه بافت درمان شده باشد و برای نیاز کنونی یک اثر تجویزشده و خطرات احتمالی آینده را نیز پوشش دهد. دارای عمق نفوذ مناسبی بوده و علاوه بر سطح، لایه های 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 جنبه ی بصری آن را نیز تحت تأثیر قرار ندهد. علاوه برآن دارای طول عمر مناسب بوده و اثربخشی خود را به‌سرعت از دست نداده و راه را برای درمان های حفاظتی آینده مسدود نسازد ضمناً در یک نقطه از اثر تجمع پیدا نکرده و تمام سطح داخلی را پوشش دهد (Franzoni et al, 2014, Drdácký et al, 2009, W. Scherer et al 2009; Borsoi et al, 2016; Borsoi et al, 2016; Al-Dosari, 2017، باغبانان و همکاران، ۱۳۹۸). با در نظر داشتن این مقدمه، در ادامه ی پژوهش به‌طور مفصل به مسائل مربوط به استحکام بخشی آجرهای تاریخی پرداخته خواهد شد.

۲. زمینه تاریخی استحکام بخشی آجر

آجر در فرهنگ تصویری معماری، به‌عنوان نوعی واحد بنایی از جنس رس که در حالت خمیری به شکل یک مکعب درآمده و با خشک شدن در آفتاب و یا پختن در کوره سخت می شود (مصطفوی به نقل از چینگ، ۱۳۷۹: ۴). طبق بررسی های میکروسکوپی (LOM) انجام‌شده بر روی نمونه‌های آجری، نشان داده‌اند که آجر شامل اجزای مختلفی ازجمله: قطعات سفال، سنگ‌آهک و قطعات آجر قرمز، به‌علاوه مواد آلی مانند؛ نی خردشده و فضولات حیوانات است (El-Badry, 2019) که در جدول ۱ نیز به آن اشاره‌شده است.

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 انبساط و انقباض، تبلور نمک، فرسایش، حملات قلیایی 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، آئروسل‌ها، کلریدهای انبار و آشپزخانه و نیترات‌ها در اصطبل‌ها به‌عنوان محرک مهم تبلور نمک و تخریب شناخته می‌شوند (Watt, 2015).

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/kcr.8.4.24]

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

دسته بندی نمک ها	نوع نمک	یون های غالب	منبع یا مسیر ورود
نمک های اولیه	$CaSO_4$ KCl NaCl, $MgCl_2$	Ca^{2+} SO^{2-}_4 K^+ Cl^- Na^+ Mg^{2+}	منشا زمین شناسی مصالح ناخالصی اولیه یا محیط ساخت منشا معدنی مواد اولیه
نمک های وارده از محیط	نمک های کلریدی نمک های نیتراته	Cl^- NO^{3-}	رطوبت محیط، آب های آلوده و آئروسل های نمکی آلودگی های زیستی و کشاورزی
نمک های حاصل از فعالیت های انسانی	کلرید مورد استفاده برای یخزدایی معابر نمک منتقل شده توسط برخی آئروسل‌ها کلریدهای خانگی، نیترات ها	Ca^{2+} SO^{2-}_4 K^+ Cl^- Na^+ Mg^{2+} NO^{3-}	مواد یخزدایی معابر ذرات معلق حاوی نمک های محلول در هوا انبار نمک و آشپزخانه اصطبل ها، فضولات دامی و فعالیت های زیستی

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

به‌طور خلاصه، آجر تاریخی در معرض فرایندهای پیچیده و چندعاملی تخریب قرار دارد که ترکیبی از عوامل فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک است و ضروری است مکانیسم‌های تخریب به‌دقت شناسایی شوند تا راهکارهای پیشگیری و مرمت (با تأکید بر حداقل مداخله و احترام به اصالت) انتخاب شوند؛ اقدام شتاب‌زده مانند جایگزینی بدون تشخیص علمی، هم ریسک از دست‌رفتن داده‌های تاریخی را بالا می‌برد 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 می‌شدند (Van Gemert et al., 2003; Horie, 2013; Williams, 1983). در مواردی که این روش ممکن نبود، از مواد و روش های روز بهره می‌گرفتند؛ برای مثال، در مرمت سفال‌های شکسته از پرچ استفاده می‌شد (Williams, 1983) با افزایش آگاهی نسبت به ارزش میراث تاریخی و مشاهده فرسایش و به‌ویژه پس از منشور ونیز، استحکام‌بخشی و تزریق مواد به بافت در دوره ۱۲۱۵–۱۲۳۵هـ‌ق به‌عنوان رویکردی برای تقویت مصالح متخلخل مانند سنگ توسعه یافت و تلاش برای یافتن مواد مناسب آغاز شد (W. H. Gutt, 1973) با این‌حال، در ابتدا تنها موادی چون خمیر نشاسته، صمغ‌ها و رزین‌های گیاهی، چسب‌های پروتئینی یا آلبومین، موم زنبورعسل و چربی در دسترس بود.

با گسترش فناوری و تجارت، دامنه وسیع‌تری از رزین‌ها و همچنین روغن‌های خشک‌کن معرفی شد و این مواد طبیعی تا اواخر قرن نوزدهم رایج‌ترین گزینه‌های مرمتی باقی ماندند (Clifton, 1980) هرچند برخی از این مواد امروزه نیز به‌کار می‌روند، اما به دلیل ماهیت ساختاری معمولاً از اصل اثر قابل تشخیص نیستند. از سوی دیگر، به‌دلیل کمبود مطالعات دقیق درباره تاریخچه مرمت، بسیاری از مواد استفاده‌شده در حفاظت به‌طور کامل شناخته نشده و در گذر زمان به‌عنوان بخشی از بدنه اصلی آثار تلقی شده‌اند. امروزه مکانیزم استحکام‌بخشی دقیق‌تر شده و به نحوه توزیع ماده استحکام‌بخش، عمق نفوذ و سازوکار اثرگذاری آن بر بستر تخریب‌شده اشاره دارد و بسته به نوع آسیب تغییر می کند؛ برای نمونه، زمانی‌که تنها لایه سطحی تخریب شده است، ایجاد یک پوشش یکدست و نسبتاً نفوذناپذیر مؤثر است، اما در شرایط جدایش دانه‌ای لازم است ماده تا عمق ناحیه آسیب‌دیده نفوذ کرده و میان دانه‌ها پل ایجاد کند. به بیان دیگر، نوع ماده و شیوه اعمال آن تعیین‌کننده مکانیزم عملکرد است و استحکام‌بخش‌ها می‌توانند با ایجاد پیوند شیمیایی، پرکردن شکاف‌ها و درزها یا پوشاندن سطح خارجی عمل کنند (Ngoma, 2009). با وجود تنوع مواد استحکام‌بخش که در زیر معرفی شده‌اند، کارایی و پیامدهای حفاظتی آن ها نه صرفاً به ماهیت ماده، بلکه به مجموعه‌ای از متغیرهای اجرایی و فیزیکی وابسته است؛ از این‌رو در ادامه، متغیرهای مؤثر بر رفتار نفوذی و عملکرد استحکام‌بخشی به‌صورت نظام‌مند مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۴. مواد استحکام‌بخش و پارامترهای مؤثر بر عملکرد آن ها

در حفاظت مصالح متخلخل تاریخی، انتخاب ماده استحکام‌بخش همواره تابع چند متغیر بوده است: ماهیت ماده، سازوکار عملکردی آن، توانایی ماده برای نفوذ در ماتریس و ایجاد انسجام پایدار. مطالعه ادبیات نشان می‌دهد که باوجود 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 سنجش قابلیت نفوذ، سازگاری، پایداری و محدودیت‌های عملکردی هر دسته از آن ها است که در ادامه ذکر خواهد شد، مواد استحکام‌بخش متداول در مقاله حاضر در چهار طبقه اصلی مطالعه می‌شوند: روغن‌های طبیعی و بیو پلیمرها، پلیمرهای سنتزی (آکریلیک‌ها و سیلان‌ها)، استحکام‌بخش‌های معدنی و مواد نوظهور که در ادامه هر طبقه ازنظر سازوکار، عملکرد، نقاط قوت و محدودیت‌ها با تمرکز خاص بر رفتار نفوذی بررسی می‌شود (Graziani, et al 2015; Graziani et al, 2015).

۵. روغن‌های 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 پلی‌ساکاریدی، بیوتریتمنت‌ها و روغن‌های گیاهی مورد توجه قرار گرفته‌اند که به‌عنوان بخشی از رویکردهای نوین و سازگار با محیط‌زیست در حفاظت و استحکام‌بخشی آجرهای تاریخی مطرح شده‌اند که هر یک مکانیزم‌های عملکردی متفاوتی را ارائه می دهند. ترکیبات آلی و ترکیبی، از جمله سامانه‌های مبتنی بر کیتوزان و دی‌آمونیوم فسفات (DAP)، به‌ویژه در

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/kcr.8.4.24]

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).

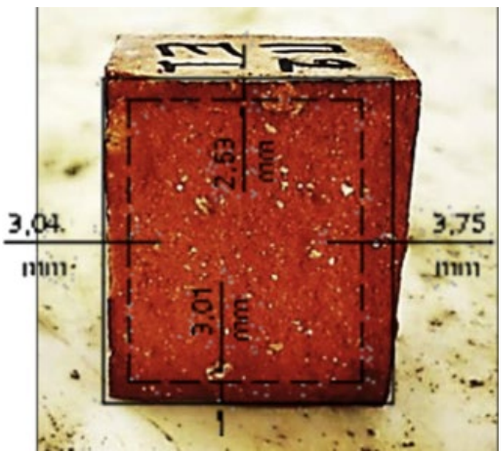
در همین چارچوب، بیوتریتمنت‌هایی نظیر روش های رسوب کربنات القاشده میکروبی (MICP) به‌عنوان رویکردهایی نوظهور، بهبودهایی در مقاومت در برابر جذب و انتقال آب نشان داده‌اند، اما به دلیل محدود بودن تجارب میدانی و عدم قطعیت در رفتار بلندمدت آن ها، در شرایط فعلی امکان توصیه گسترده آن ها در پروژه‌های حفاظت وجود 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 گرانروی بالا، توان نفوذ عمقی محدودی دارند. افزون بر این، عملکرد آن ها 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 سازه‌ای 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 آن ها 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 (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 می دهند. 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 نگه داشت 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 این‌رو 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 تیمارشده 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 آن ها دارد و نمی‌توان این مواد را به‌عنوان یک گروه همگن و بدون ریسک در حفاظت میراث معماری در نظر گرفت.





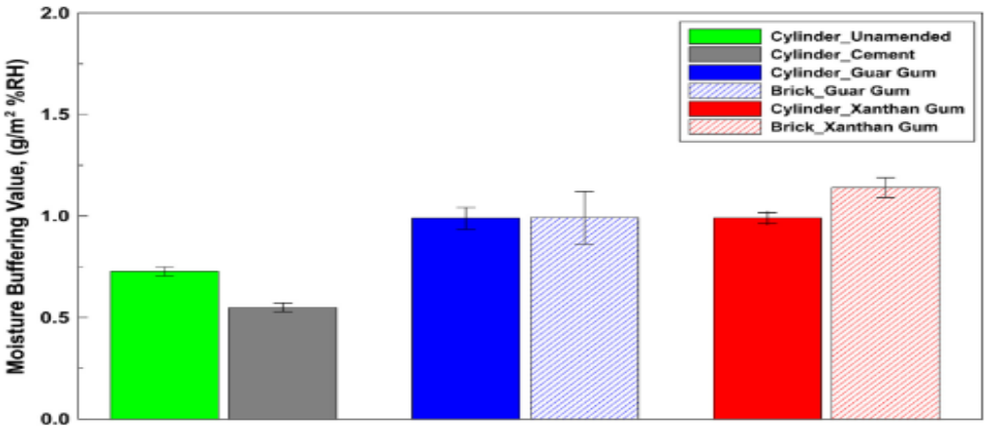
شکل ۱. مشاهده سه‌بعدی و مایکروسکوپی سطح آجر تیمارشده با روغن بذر کتان پس از چرخه‌های ذوب و انجماد (Stefanidou & Karozou, 2016).

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/kcr.8.4.24]



شکل ۲. شرایط آجرها بلافاصله پس از خارج کردن از آب. این تصویر می‌تواند به‌وضوح 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 درمان‌نشده. وسط: صمغ گوار و راست: صمغ زانتان (Muguda-Viswanath, 2019)



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

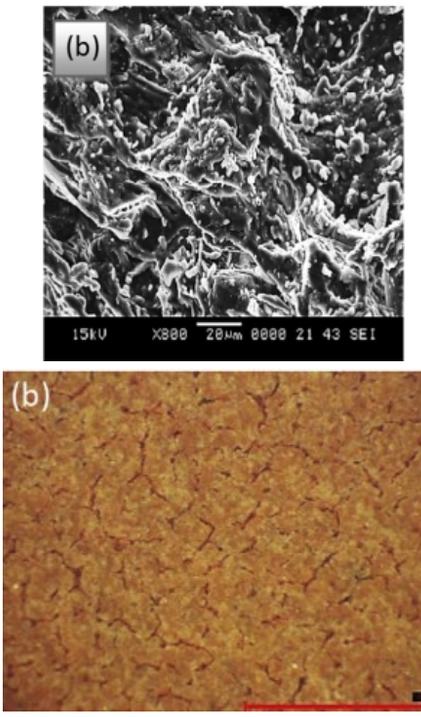
۶. پلیمرهای سنتزی (B-72 و آلکوکسی‌سیلان‌ها)

این دسته از مواد شامل دو گروه با سازوکار و عملکرد متمایز است. اکریلیک‌های 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 آلکوکسی‌سیلان‌ها با قابلیت نفوذ به درون ماتریس متخلخل، پلیمریزاسیون در حضور رطوبت و تشکیل ژل‌ها و پیوندهای سیلیکاتی زیرسطحی، امکان کاهش جذب آب همراه با حفظ نسبی تخلخل و هم‌خوانی بهتر با بسترهای معدنی را فراهم می‌کنند (Stefanidou & Karozou, 2016).

با این حال، عملکرد سیلان‌ها به‌شدت 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 اکریلاتی اصلاح‌شده، از جمله پلی‌فلوئوروسیلیکون آکریلات‌ها، عملکرد حفاظتی و نفوذی مطلوبی را در آزمون‌های آزمایشگاهی کوتاه‌مدت گزارش کرده‌اند (Hao et al., 2021)؛ با این وجود، این مطالعات به‌طور صریح به پایداری بلندمدت نفوذ، رفتار ماده

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/kcr.8.4.24]

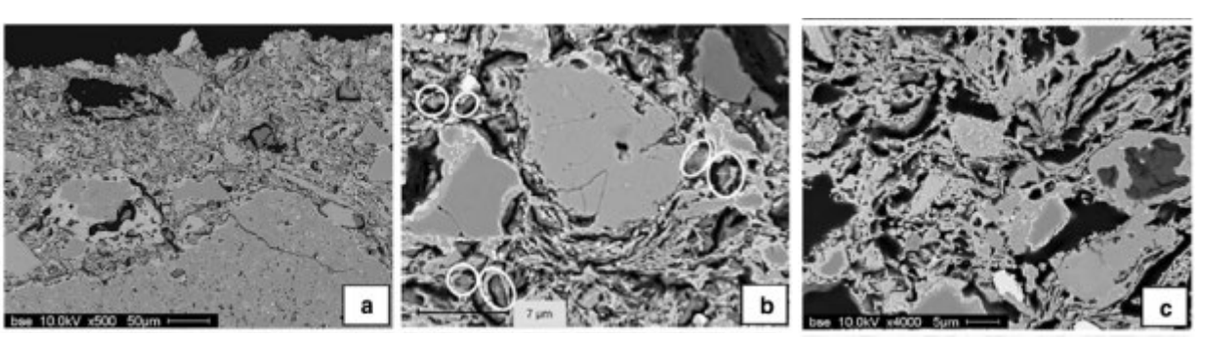
در مقیاس‌های زمانی طولانی، یا مسائل مرتبط با برگشت‌پذیری و سازگاری با مداخلات حفاظتی آینده نمی‌پردازند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که حتی مواد پرکاربرد و نوین، علی‌رغم عملکرد آزمایشگاهی مناسب، همچنان با عدم قطعیت‌هایی در زمینه پیش بینی‌پذیری رفتار درازمدت در شرایط واقعی آثار تاریخی مواجه‌اند.



شکل ۴. مشاهده سه بعدی نمونه تیمارشده 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)

۷. مواد معدنی

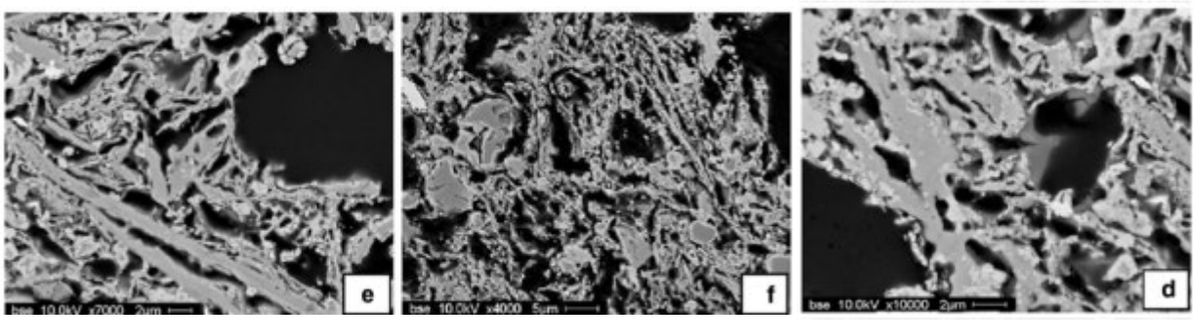
تترااتیل‌ارتوسیلیکات (TEOS) و دیگر اتوکسی سیلان‌ها به‌عنوان یکی از شناخته‌شده‌ترین استحکام‌بخش‌های معدنی برای آجرهای تاریخی شناخته می‌شوند؛ پس از نفوذ به ماتریس متخلخل، TEOS هیدرولیز شده و به سیلانول تبدیل می‌گردد که از طریق پلیمریزاسیون متوالی ژل سیلیکا تشکیل می‌دهد. این ژل در ریزمنافذ رسوب کرده و سبب 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 عمق‌نفوذ محدود و ناهمگن TEOS دارد (Franzoni et al., 2014; Salazar-Hernandez et al., 2019; Zhao et al., 2020). از منظر عملکرد ماکروسکوپیک، 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 یکنواختِ 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 دی‌اکسیدکربن 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 ; Zárraga et al, 2010 ; Zhao et al 2013;



شکل ۵. مشاهده ESEM از نمونه‌های استحکام بخشی 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 استحکام بخشی شده. نقاط ۱–۶ (با دایره سفید مشخص‌شده‌اند) رسوبات سیلیکا را که توسط EDS تجزیه و تحلیل شده‌اند، نشان می دهند. تصویر c، d و e : تصاویر گرفته‌شده در عمق حدود ۱۰ میلی‌متری از سطح خارجی، جایی که هنوز وجود ژل سیلیکا تشخیص داده می شود. تصویر f : تصویر گرفته‌شده در عمق حدود ۱۶ میلی‌متری، جایی که ژل سیلیکا تقریبا وجود ندارد (Franzoni et al., 2014).

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/kcr.8.4.24]



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 مشخص‌شده‌اند) رسوبات سیلیکا را که توسط EDS تجزیه و تحلیل شده‌اند، نشان می دهند.
تصویر c، d و e : تصاویر گرفته‌شده در عمق حدود ۱۰ میلی‌متری از سطح خارجی، جایی که هنوز وجود ژل سیلیکا تشخیص داده می شود. تصویر f : تصویر گرفته‌شده در عمق حدود ۱۶ میلی‌متری، جایی که ژل سیلیکا تقریبا وجود ندارد (Franzoni et al., 2014).

۸. گرافن اکسید

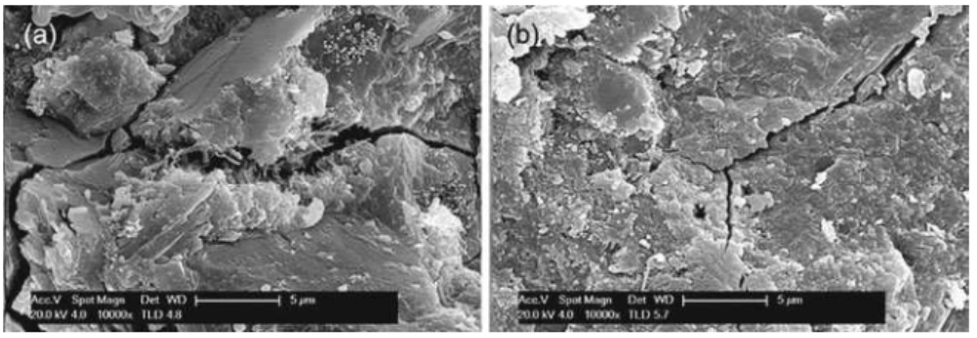
گرافن اکسید (GO) یک نانوماده کربنی دوبعدی و ترکیب معدنی محسوب نمی‌شود، بلکه از اکسیداسیون شیمیایی گرافن یا گرافیت به‌دست می‌آید. ساختار GO شامل صفحات شش‌ضلعی کربنی است که در طی فرآیند اکسیداسیون، گروه‌های عاملی اکسیژنی شامل هیدروکسیل (–OH)، اپوکسی (–O–) و کربوکسیل (–COOH) بر سطح و لبه‌های آن ایجاد می‌شود. این گروه‌های عاملی ناشی از فرآیند اکسیداسیون، نظم بلوری اولیه گرافن را تا حدی مختل کرده و رسانایی الکتریکی و حرارتی آن را کاهش می دهند، 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 به‌ترتیب تا حدود ۴۰٪ و ۵۷٪ کاهش دهد؛ به‌گونه‌ای که با افزایش مقدار GO، شدت این اثر افزایش می‌یابد. این عملکرد عمدتاً ناشی از نقش پوششی و سدکنندگی فیزیکی نانوورقه‌ها در مسیرهای انتقال رطوبت و یون‌ها است و نه ایجاد پیوند شیمیایی مستقیم با بستر (Faria et al., 2017). به همین دلیل، GO معمولاً به‌عنوان یک ماده مناسب برای استحکام‌بخشی سطحی معرفی می‌شود، زیرا نفوذپذیری بخارآب را به‌طور محسوسی کاهش نمی‌دهد و مانع تنفس مصالح نمی‌شود.

Lin و همکاران (۲۰۱۶) رفتار پراکنش GO را در محلول‌های شبیه‌سازی‌شده منافذ بررسی کردند و نشان دادند که حضور یون‌های کلسیم دوظرفیتی موجب تجمع و فلوکولاسیون نانوورقه‌های 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 بهبود پراکنش GO شده و درنتیجه افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها را به دنبال دارد (Lin et al., 2016). تصاویر SEM ارائه‌شده در شکل ۷ نشان می‌دهد که در مراحل ابتدایی اعمال، GO به‌صورت 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).

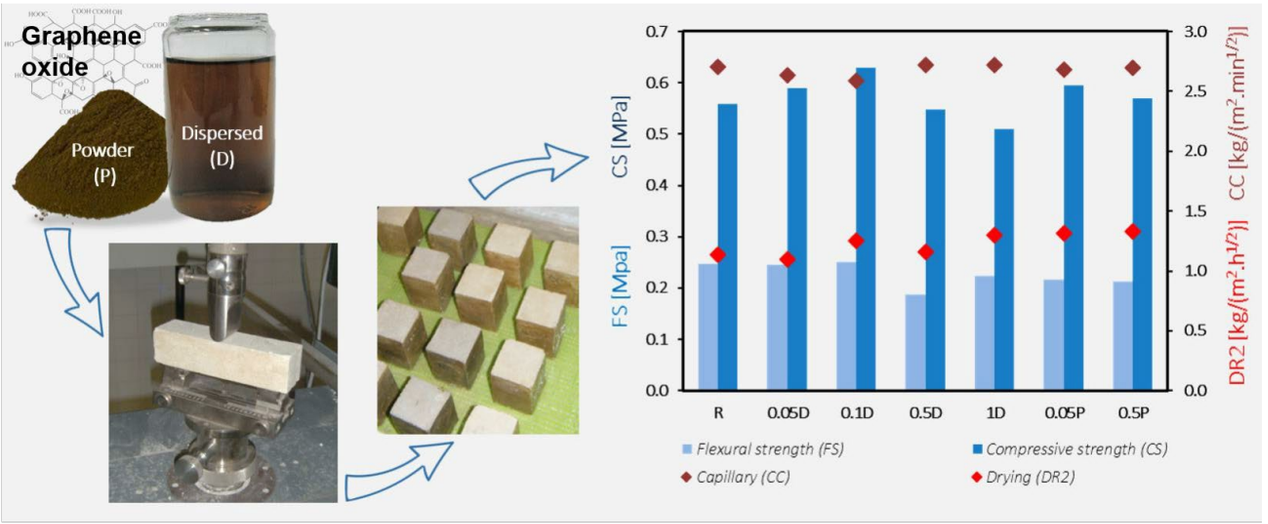
از نظر مکانیزم برهم‌کنش، اگرچه گروه‌های عاملی اکسیژنی GO امکان برهم‌کنش‌های فیزیکی و الکترواستاتیکی با فاز معدنی را فراهم می‌کنند، نتایج FTIR نشان می‌دهد که در مراحل اولیه درمان، پیوند شیمیایی کووالانسی پایدار میان GO و بستر معدنی تشکیل نمی‌شود. بنابراین، نقش اصلی این گروه‌های عاملی در بهبود آب‌دوستی، 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 به‌صورت 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 اصلاح‌شده 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 به‌شدت وابسته به نوع حامل، روش اعمال (قلم‌مو یا اسپری)، غلظت و شرایط محیطی است؛ به‌گونه‌ای که در مقادیر بالا، تشکیل لایه‌های ضخیم سطحی می‌تواند خطر ترک‌خوردگی یا جداشدگی پوشش را افزایش دهد (Rescic et al., 2023; Korayem et al., 2020).



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)

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/kcr.8.4.24]



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

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 می کند. 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).

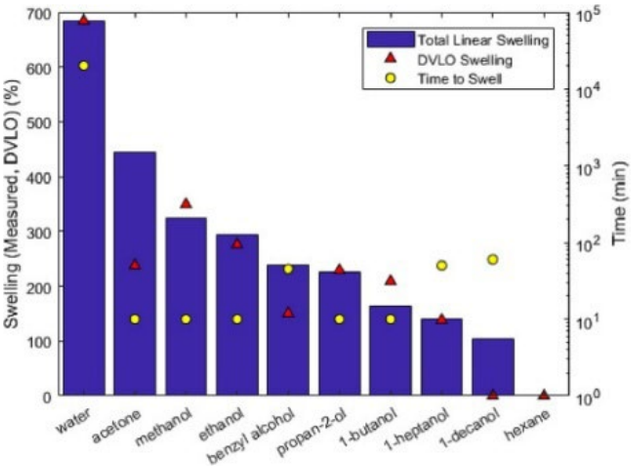
در سامانه‌های مبتنی بر حامل‌های آبی، نفوذ آب به درون منافذ غنی از رس، که عمدتاً تحت تأثیر نیروهای مویرگی هدایت می‌شود، می‌تواند منجر به هیدراتاسیون کاتیون‌های بین‌لایه‌ای در رس‌های منبسط‌شونده گردد. این فرآیند به تورم ساختاری، انبساط موضعی و در نهایت انسداد منافذ منجر می‌شود؛ پدیده‌ای که نه‌تنها نفوذ بیشتر ماده استحکام‌بخش را محدود می کند، 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 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 (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 گزارش‌شده در برخی کاربردهای استحکام‌بخش‌های سیلیکاتی نظیر تتراتیل‌ارتوسیلیکات (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 بسترهای 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).

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/kcr.8.4.24]



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

۱۰. پارامترهای فیزیکی و جریان‌پذیری ماده و تأثیر آن ها بر نفوذپذیری

مطالعات نشان می‌دهد که کاهش غلظت و گرانروی ماده‌ی استحکام‌بخش معمولاً موجب افزایش قابلیت نفوذ آن می‌شود؛ با این حال این افزایش نفوذ الزاماً به معنای افزایش کارایی نیست. کاهش بیش از حد غلظت می‌تواند به افت میزان اثرگذاری و انسجام‌بخشی 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 آسیب‌های ثانویه را به همراه دارد.

در این میان، اندازه‌ی ذرات یا مولکول‌های مؤثر ماده نیز نقش مهمی در عبور از شبکه‌ی منافذ ایفا می کند؛ به‌گونه‌ای که عدم تطابق اندازه‌ی ذرات با توزیع منافذ می‌تواند منجر به توقف حرکت ماده، تجمع در سطح یا لایه‌های کم‌عمق و در نهایت توزیع ناهمگن شود.

۱۱. جمع بندی

در جمع‌بندی عملی برای کاربرد در پروژه‌های مرمتی آجر تاریخی، شواهد نشان می‌دهد که درمان‌های معدنی کنترل‌شده (اتوکسی‌سیلان‌ها با طراحی مناسب، ترکیبات کلسیمی نوین و ملاط‌های آهکی/پوزولانی) در بسیاری از موارد ترکیب مطلوبی از نفوذپذیری قابل‌کنترل، پایداری طولانی‌مدت و سازگاری فیزیکوشیمیایی با آجر ارائه می دهند؛ در مقابل، مواد آلی و بیوتریتمنت‌ها می‌توانند راه‌حل‌های هدفمند و سازگار با محیط برای مسائل خاصی مانند کنترل نمک یا درمان‌های سطحی فراهم آورند، اما نگرانی‌هایی درباره پایداری رطوبتی، رشد زیستی، اکسیداسیون و کنترل‌پذیری نفوذ آن ها وجود دارد که استفاده گسترده آن ها را بدون آزمون‌های میدانی و طراحی شرایط اعمال به‌طرز معناداری محدود می‌سازد (Pereira et al., 2021; Marrone & Franzoni, 2025; Nugent et al., 2009; Cultrone & Ibáñez Sánchez, 2018).

در نتیجه، تصمیم‌گیری مناسب باید مبتنی بر آزمون‌های نفوذ، ارزیابی ریزساختاری (SEM/ESEM) و سناریوهای اقلیمی–محلی باشد: برای تقویت‌های سطحی و کنترل نمک می‌توان گزینه‌های آلی یا بیوتریتمنت‌های مشخص را در نظر گرفت؛ اما برای اهدافی که نیاز به استحکام‌بخشی عمیق و دوام بلندمدت دارند، ترکیبات معدنی کنترل‌شده و ملاط‌های هماهنگ با ماتریس (به‌ویژه آهک هیدرولیک و پوزولان‌ها) اولویت منطقی‌تری دارند، مگر آن‌که نتایج مطالعات میدانی بلندمدت خلاف آن را نشان دهد. ملاط‌های سنتی، به‌ویژه آهک هیدرولیک همراه با اضافات پوزولانی مانند silica fume یا metakaolin، همچنان به‌عنوان درمان‌هایی با سازگاری شیمیایی و فیزیکی مطلوب با آجر تاریخی مطرح‌اند؛ این ملاط‌ها به‌دلیل حفظ نسبت بهتری از خواص حرارتی و رطوبتی نسبت به ملاط‌های سیمانی، در بلندمدت انعطاف‌پذیری و دوام بیشتری نشان می دهند و اغلب به‌عنوان گزینه مرجح در پروژه‌های عملی مرمت توصیه می‌شوند (Conserv®; Yang et al., 2025).

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

جدول ۳. مقایسه بین دسته های مختلف مواد استحکام‌بخش

(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; ریموند و استووارت میلز، ۱۳۸۴)

نوع ماده	قابلیت نفوذ	برگشت‌پذیری	معایب	مزایا
آلی	متوسط	پایین	احتمال ناسازگاری، برگشت‌ناپذیری	چسبندگی بالا، انعطاف‌پذیری
معدنی	کم تا متوسط	متوسط	تأثیر کند، نیاز به CO_2/ رطوبت	سازگاری معدنی با بستر، دوام بالا
بیوپلیمر	کم	بالا	پایداری پایین، نیاز به بررسی بیشتر	زیست پذیری، تجزیه‌پذیر
نوظهور	بالا	متغیر	اطمینان پایین، داده های بلندمدت محدود	نفوذپذیری بالا، عملکرد هدفمند

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/kcr.8.4.24]

جدول ۴. مهم‌ترین ویژگی‌های استحکام‌بخش‌های موجود در حوزه حفاظت و مرمت مصالح متخلخل

تناسب با ساختار سنگ	ارزیابی عمق نفوذ	مکانیسم عمل	میزان اثربخشی	سایر موارد
تناسب بین ماده‌ی مصرفی و سنگ هدف از نظر نوع مواد تشکیل‌شده 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، به‌راحتی تغییر ساختار ندهد.

بررسی ادبیات علمی و تجربیات میدانی نشان می‌دهد که پژوهش‌های آکادمیک منتشرشده در ایران که به‌طور مشخص و نظام‌مند به استحکام‌بخشی 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 کرده‌اند، اما داده‌های تجربی منتشرشده درباره عملکرد بلندمدت مواد استحکام‌بخش مشخص، به‌ویژه در قالب مقالات داوری‌شده، اندک و پراکنده است. بخش عمده این دانش در گزارش‌های فنی، پایان‌نامه‌ها و اسناد اجرایی باقی مانده و کمتر به ادبیات علمی رسمی راه یافته است.

در عمل، پروژه‌های مرمتی در ایران عمدتاً بر استفاده از ملاط‌های سنتی آهکی، آهک هیدرولیک طبیعی و افزودنی‌های پوزولانی متکی بوده‌اند. این انتخاب بیش از آن‌که ناشی از فقدان گزینه‌های فناورانه باشد، ریشه در سازگاری شیمیایی و فیزیکی این مواد با آجر تاریخی، حفظ نفوذپذیری بخار آب و رفتار نسبتاً پایدار آن‌ها در گذر زمان دارد. شواهد میدانی حاصل از مرمت دیوارها و سازه‌های تاریخی در شهرهایی مانند یزد و اصفهان نشان می‌دهد که این رویکرد، در صورت اجرای صحیح، می‌تواند عملکرد قابل‌قبولی در بازه‌های زمانی چنددهساله ارائه دهد.

در مقابل، کاربرد مستقیم استحکام‌بخش‌های سیلیکاتی معدنی نظیر TEOS یا مواد آلی و بیوپلیمری در پروژه‌های مرمت تاریخی ایران، به‌صورت گسترده و مستند گزارش نشده است. موارد استفاده محدود کارگاهی یا آزمایشی، در برخی شرایط- به‌ویژه در محیط‌های با رطوبت بالا- با چالش‌هایی نظیر نفوذ ناهمگن، تمرکز سطحی ژل سیلیکا، یا کاهش نفوذپذیری بخار همراه بوده‌اند که در مواردی به جدایش یا ناپایداری پوشش انجامیده است. استفاده تجربی از پوشش‌های پلیمری تجاری نیز، هرچند با هدف افزایش مقاومت مکانیکی صورت گرفته، اغلب منجر به اختلال در چرخه رطوبتی مصالح و تشدید آسیب‌های ثانویه شده است.

تحلیل این چالش‌ها نشان می‌دهد که مشکلات موجود الزاماً ناشی از ذات مواد نیست، بلکه ترکیبی از عوامل زمینه‌ای شامل شرایط اقلیمی ایران، نوسانات شدید رطوبتی خشک-مرطوب، اجرای مداخلات بدون پیش‌آزمون‌های سازگاری، و کمبود داده‌های میدانی بلندمدت در پایش عملکرد مواد استحکام‌بخش است. در چنین بستری، انتخاب ماده بدون درنظرگرفتن بستر، حامل، روش اعمال و رفتار زمانی، رویکردی پرریسک تلقی می‌شود.

از منظر حفاظتی، انتخاب گزینه مناسب برای ایران مستلزم رویکردی محتاطانه و چندمعیاره است. آهک هیدرولیک طبیعی همراه با افزودنی‌های سیلیسی ملایم، به‌عنوان گزینه‌ای با سازگاری بالا، حفظ نفوذپذیری بخار و پایداری زمانی مناسب، همچنان قابل‌اعتمادترین راهکار برای بسیاری از بسترهای آجری تاریخی محسوب می‌شود. سیلیکات‌های معدنی کنترل‌شده، نظیر TEOS در غلظت‌های بهینه و با انتخاب دقیق حامل، می‌توانند در اقلیم‌های خشک تا نیمه‌خشک عملکرد قابل‌قبولی داشته باشند، مشروط بر آن‌که آزمون‌های نفوذ، سازگاری و پایش پس از اجرا به‌طور نظام‌مند انجام شود. ترکیبات نوظهور نظیر بیوپلیمرهای اصلاح‌شده یا سامانه‌های ترکیبی آلی-معدنی نیز تنها در چارچوب مطالعات کارگاهی، پایلوت‌های میدانی و ارزیابی بلندمدت قابل توصیه‌اند و نمی‌توان آن‌ها را به‌عنوان راهکارهای عمومی تلقی کرد.

در فرآیند حفاظت، انتخاب ماده استحکام‌بخش، حامل مناسب و شرایط اعمال، نقشی تعیین‌کننده در موفقیت مداخله دارد. مصالح تاریخی به‌دلیل بافت متخلخل، ناهمگنی ساختاری و تنوع ترکیبات معدنی، واکنش‌های متفاوتی نسبت به تیمارهای شیمیایی و طبیعی نشان می‌دهند؛ از این رو، ارزیابی علمی عملکرد مواد از جنبه‌های فنی، زیست‌محیطی و مرمتی ضرورتی انکارناپذیر است. تدوین پروتکل‌های استاندارد پیش‌آزمون شامل ثبت شرایط محیطی، ویژگی‌های نمونه، نوع حامل، ویسکوزیته، روش اعمال و زمان‌بندی، برای کنترل عمق و یکنواختی نفوذ امری کلیدی محسوب می‌شود. همچنین، انتخاب روش اعمال باید بر اساس یک ماتریس تصمیم‌گیری 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، آسیب‌شناسی و مکانیسم‌های تخریب باشد. تخریب در مصالح متخلخل، چه در مقیاس ماکرو و چه میکرو، حاصل برهم‌کنش عوامل ذاتی، ساختاری، محیطی و انسانی است و تخمین میزان پیشرفت هوازدگی، نقشی کلیدی در تصمیم‌گیری درباره ضرورت و نوع استحکام‌بخشی دارد. این ارزیابی می‌تواند از طریق شاخص‌های شیمیایی، فیزیکی، مکانیکی، مطالعات کانی‌شناسی و آزمون‌های میدانی کمی و کیفی انجام گیرد.

در نهایت، بررسی تطبیقی مواد استحکام‌بخش نشان می‌دهد که دسته‌بندی آن‌ها صرفاً بر اساس منشأ طبیعی یا مصنوعی، رویکردی ساده‌انگارانه است. آنچه عملکرد، دوام و ریسک حفاظتی یک ماده را تعیین می‌کند، ماهیت شیمیایی، مکانیزم برهم‌کنش با بستر و رفتار آن در محیط متخلخل است. استحکام‌بخش‌های آلی رزینی، علی‌رغم بهبود سریع مقاومت، با چالش‌های برگشت‌ناپذیری و ناسازگاری زمانی مواجه‌اند؛ مواد معدنی واکنشی از منظر سازگاری مزیت دارند اما کنترل‌پذیری آن‌ها حساس است؛ بیوپلیمرها برای کاربردهای محدود قابل بررسی‌اند؛ و مواد نانومقیاس، علی‌رغم پتانسیل بالا، همچنان نیازمند داده‌های بلندمدت هستند.

بر این اساس، انتخاب ماده استحکام‌بخش باید در چارچوب یک رویکرد سیستماتیک و چندمعیاره انجام شود که هم‌زمان ویژگی‌های شیمیایی

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/kcr.8.4.24]

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

۱۲. نتیجه‌گیری

استفاده از استحکام‌بخش‌های طبیعی و نوظهور در درمان آجرهای تاریخی هرکدام مزایا و معایب خاص خود را دارند. استحکام‌بخش‌های 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 حوزه‌ی مرمت و به‌ویژه استحکام‌بخشی هیچ ماده‌ای وجود ندارد که درمان همه‌جانبه و مفید باشد و تمام نیازهای آثار را از تمامی جوانب پوشش دهد و هرکدام از مواد معرفی‌شده دارای مزایا و معایبی هستند که با توجه به تعدد و تنوع مواد معمول در استحکام‌بخشی 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 می‌شود. علاوه بر آن متخصصان همواره به دنبال راهی برای حصول بهترین و کارآمدترین نتیجه هستند. مهم‌ترین معیار در انتخاب یک مواد برای درمان موفق نفوذپذیری و غیر مخرب بودن آن است. بر طبق معرفی و تشریح های انجام‌شده از هر ماده، به نظر می رسد می توان با در نظر داشتن عمق نفوذ ماده استحکام‌بخش، عدم‌تغییر 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 اولویت‌بندی 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. درنهایت پیشنهاد می شود انتخاب مواد استحکام‌بخش 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. درنهایت، انتخاب بهترین ماده بستگی به شرایط خاص پروژه، نیازهای حفاظتی، بودجه و نوع آجر تاریخی مورداستفاده دارد. ترکیب این مواد نیز می‌تواند راه‌حلی مؤثر برای دستیابی به خواص مطلوب باشد.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از رساله دکتری خانم لیلی نعمانی خیاوی با راهنمایی جناب آقای دکتر حسین احمدی و جناب آقای دکتر سیدمحمد 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

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 سنگ‌های ضعیف. مجله علمی-پژوهشی مهندسی دریا. ۲۰۱۸ ۱۰;۱۳(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 Slížková1,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,

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/kcr.8.4.24]

K. Bayer, Mozˇnosti hodnocení efektivity konsolidace porézních anorganicky´ ch materiáluº, in: Padesát let pouˇzívání organokrˇemicˇitanuº na území ˇCeské republiky, Proceedings of ICOMOS (in Czech), Národní muzeum, Národní památkovy´ 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. InProceedings 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-Ezquerra, 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.

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/kcr.8.4.24]

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 Sym-posium 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 استحکام‌بخشی 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.

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/kcr.8.4.24]

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

Leyli Nemani Khiyavi[1*]; Hossein Ahmadi[2]; Seyyed Mohammad Amin Emami[2]

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

l.nomani@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.

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/kcr.8.4.24]

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

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–pozzolanic 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

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/kcr.8.4.24]

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.

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/kcr.8.4.24]