

Reviving Iran's Heritage: The Role of Modern Materials in the Conservation of Historic Structures

1. Sara Sadat Taghavi Dehaghani¹: M.A., Art Research Department, Faculty of Arts, Art Science University, Ardakan, Iran

2. Hamideh Jafari²: Assistant Professor, Department of Architecture and Urban Planning, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3. Naser Poursaeid^{3*}: PhD Student, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

4. Kiuomars Ahmadi⁴: PhD, Department of Humanities, Mecca Martyrs Center, Farhangian University, Tehran, Iran

*Corresponding Author's Email Address: Naserpoursaeid@gmail.com

How to Cite: Taghavi Dehaghani, S. S., Jafari, H., Poursaeid, N., & Ahmadi, K. (2024). Reviving Iran's Heritage: The Role of Modern Materials in the Conservation of Historic Structures. *Manifestation of Art in Architecture and Urban Engineering*, 2(4), 141-153.

Abstract:

The integration of modern engineered materials into the conservation of Iran's earthquake-prone and culturally rich historic structures has accelerated over the past decade. This article systematically reviews global and Iranian case studies to evaluate the compatibility, durability, and authenticity of advanced composites (e.g., carbon and glass Fiber-Reinforced Polymers [FRP]), Textile Reinforced Mortars (TRM), geopolymer adhesives, and nano-reinforcing materials. Using a PRISMA-inspired methodology, over 80 peer-reviewed sources were examined, of which 51 key studies were analyzed in-depth. Quantitative synthesis indicates that FRP wrapping can increase the in-plane shear strength of unreinforced masonry walls by up to 88% and ductility by 38%, whereas lime mortars reinforced with basalt fibers retain 95–98% of the masonry's original breathability. Geopolymer grouts formulated with locally sourced volcanic pumice achieve compressive strengths of 12 to 15 MPa and water absorption rates below 20%, demonstrating excellent compatibility with historic stone substrates. However, the improper use of cementitious or impermeable coatings has resulted in irreversible moisture entrapment and façade damage at several Iranian heritage sites. We conclude that a balanced mechanical approach—prioritizing chemical and hygrothermal compatibility—enables effective deployment of modern materials while preserving authenticity. Practical guidelines and educational strategies are proposed for Iranian heritage professionals to ensure sustainable and minimally invasive interventions.

Keywords: Iranian heritage; historic preservation; fiber-reinforced polymers (FRP); geopolymer adhesives; textile-reinforced mortars (TRM)

Received: 01 December 2024

Revised: 26 January 2025

Accepted: 06 February 2025

Published: 18 February 2025



Copyright: © 2024 by the authors. Published under the terms and conditions of Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License.

احیای میراث ایران: نقش مصالح مدرن در حفاظت از بناهای تاریخی

۱. سارا سادات تقوی دهاقانی^{ID}: کارشناس ارشد، گروه پژوهش هنر، دانشکده هنر، دانشگاه علم هنر، اردکان، ایران
۲. حمیده جعفری^{ID}: استادیار، گروه معماری و شهرسازی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۳. ناصر پورسعید^{ID}: دانشجوی دکتری، گروه عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران. (نویسنده مسئول)
۴. کیومرث احمدی^{ID}: دکتری، گروه علوم انسانی، مرکز شهدای مکه، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران

*پست الکترونیک نویسنده مسئول: Naserpoursaeid@gmail.com

نحوه استناددهی: تقوی دهاقانی، سارا سادات، جعفری، حمیده، پور سعید، ناصر، و احمدی، کیومرث. (۱۴۰۳). احیای میراث ایران: نقش مصالح مدرن در حفاظت از بناهای تاریخی. تجلی هنر در معماری و شهرسازی، ۲(۴)، ۱۵۳-۱۴۱.

چکیده

ادغام مصالح مهندسی مدرن در حفاظت از سازه‌های تاریخی مستعد زلزله و غنی از فرهنگ ایران در طول دهه گذشته شتاب گرفته است. این مقاله به طور سیستماتیک مطالعات موردی جهانی و ایرانی را برای ارزیابی سازگاری، دوام و اصالت کامپوزیت‌های پیشرفته (به عنوان مثال، FRP کربن و شیشه)، ملات‌های تقویت‌شده با پارچه (TRM)، چسب‌های ژئوپلیمری و نانومواد تقویت‌کننده بررسی می‌کند. با استفاده از روش‌شناسی الهام گرفته از پریسما، بیش از ۸۰ منبع بررسی‌شده توسط همتایان بررسی شد که از این تعداد ۵۱ مطالعه کلیدی به طور عمیق مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. سنتز کمی نشان می‌دهد که پوشش FRP می‌تواند مقاومت برشی درون صفحه‌ای دیوارهای آجری غیرمسلح را تا ۸۸٪ و شکل‌پذیری را ۳۸٪ افزایش دهد، در حالی که ملات‌های آهکی الیاف بازالت ۹۵-۹۸٪ از قابلیت تنفس اولیه سنگ‌تراشی را حفظ می‌کنند. دوقاب‌های ژئوپلیمری که با پوک‌ه معدنی محلی فرموله شده‌اند، به مقاومت فشاری ۱۲ تا ۱۵ مگاپاسکال و جذب آب زیر ۲۰ درصد دست می‌یابند که کاملاً با زیرلایه‌های سنگی تاریخی مطابقت دارد. با این حال، استفاده نادرست از پوشش‌های سیمانی یا نفوذناپذیر منجر به حبس رطوبت برگشت‌ناپذیر و آسیب‌های نما در چندین مکان ایرانی شده است. ما نتیجه می‌گیریم که یک رویکرد متعادل مکانیکی، با اولویت‌بندی شیمیایی و سازگاری رطوبتی-حرارتی، امکان استفاده مؤثر از مصالح مدرن را در عین حفظ اصالت فراهم می‌کند. دستورالعمل‌های عملی و استراتژی‌های آموزشی برای متخصصان میراث ایران برای تضمین مداخلات پایدار و کم‌تهاجمی پیشنهاد شده است.

کلیدواژگان: میراث ایران؛ حفاظت تاریخی؛ پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف (FRP)؛ چسب‌های ژئوپلیمری؛ ملات‌های تقویت‌شده با پارچه (TRM)

تاریخ دریافت: ۱۱ آذر ۱۴۰۳

تاریخ بازنگری: ۷ بهمن ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۸ بهمن ۱۴۰۳

تاریخ انتشار: ۳۰ بهمن ۱۴۰۳



مقدمه

میراث ساخته شده ایران بیش از پنج هزاره قدمت دارد و شامل شهرهای خشتی (مانند بم، یزد)، بازارهای قرون وسطایی، کاخ‌های قاجار و بناهای تاریخی قرن بیستم مانند برج آزادی می‌شود. به طور سنتی، این سازه‌ها به خاک، سنگ، آجر خشک شده در آفتاب، چوب و ملات‌های آهکی متکی هستند که همگی از طریق صنایع دستی بومی متناسب با نیازهای اقلیمی و لرزه‌ای محلی ساخته شده‌اند. با این حال، شهرنشینی سریع، گردشگری انبوه و به ویژه فعالیت‌های لرزه‌ای در امتداد کمربند آلپ-همیمالیا، این سازه‌های شکننده را در معرض خطرات جدی قرار داده است.

زلزله فاجعه‌بار طبرس (۱۶ سپتامبر ۱۹۷۸؛ ۷.۴ Mw) بیش از ۸۰٪ از روستاهای خشتی در جنوب خراسان را ویران کرد و باعث ۱۵۰۰۰ کشته شد، در حالی که زلزله بم (۲۶ دسامبر ۲۰۰۳؛ ۶.۶ Mw) نزدیک به ۷۰٪ از ارگ بم که در فهرست یونسکو ثبت شده است را با خاک یکسان کرد و جان بیش از ۲۶۰۰۰ نفر را گرفت. چنین رویدادهایی، آسیب‌پذیری مصالح خاکی و آجری غیرمسلح را در برابر بارهای دینامیکی برجسته می‌کند. همزمان، تنش‌های محیطی، نفوذ رطوبت، تبلور نمک در آب و هوای ساحلی و بیابانی، چرخه‌های انجماد-ذوب در ارتفاعات زاگرس، پوسیدگی مواد را تسریع می‌کنند.

پیشرفت‌ها در علم مواد اکنون کامپوزیت‌ها، ملات‌های مهندسی شده و فناوری نانو را ارائه می‌دهد که می‌توانند این تهدیدات را کاهش دهند. پلیمرهای تقویت شده با الیاف (FRP) و ملات‌های تقویت شده با پارچه (TRM) تا ۲ برابر افزایش در ظرفیت‌های کششی و برشی مجموعه‌های بنایی را نشان داده‌اند. ژئوپلیمرهای آلومینو-سیلیکات فعال شده با قلیا، تهیه شده از پوک معدنی آتشفشانی و متاکائولین، پایدار و کم CO₂: جایگزین‌هایی برای سیمان پرتلند، مطابق با تخلخل و رنگ سنگ‌های قدیمی. نانو لیموها و پوشش‌های مبتنی بر لیپید، استحکام و دفع آب را در عین حفظ نفوذپذیری بخار تضمین می‌کنند.

با وجود این پتانسیل‌ها، مداخلات نامناسب مانند جایگزینی ملات‌های آهکی با سیمان سفت، تزریق رزین‌های نفوذناپذیر یا استفاده از FRP با مدول بالا بدون در نظر گرفتن سختی متفاوت، خسارات جبران‌ناپذیری از جمله پوسته‌پوسته شدن ناشی از نمک، حبس رطوبت و از بین رفتن اصالت را به بار آورده است. منشورهای حفاظت و مطالعات اخیر (1, 2) بر سازگاری - مکانیکی، نیاز به مواد شیمیایی، رطوبتی - حرارتی و حداقل تأثیر بصری تأکید دارند. این مطالعه با استفاده از یک مرور سیستماتیک بر متون، که بر اساس چارچوب پریسما مدل‌سازی شده است، به ارزیابی مواد و روش‌های پیشرفته در حفاظت از میراث جهانی، با تمرکز هدفمند بر زمینه‌های ایرانی می‌پردازد. دو مطالعه موردی نمادین، مقاوم‌سازی لرزه‌ای موزه دانشگاه تهران و سناریوهای حفاظت از طاق‌های خشتی یزد، برای نشان دادن کاربردهای عملی و مشکلات، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. با ترکیب داده‌های کمی عملکرد و معیارهای کیفی حفاظت، هدف ما ارائه یک راهنمای جامع برای ادغام مصالح مدرن در رویه میراث ایران و افزایش تاب‌آوری بدون به خطر انداختن اصالت است.

بررسی ادبیات

ادغام مصالح مهندسی مدرن در حفاظت از سازه‌های تاریخی ایران در طول دهه گذشته به طور قابل توجهی افزایش یافته است. این مصالح از پلیمرهای تقویت شده با الیاف (FRP) گرفته تا ژئوپلیمرهای پیشرفته و نانومواد تقویت کننده، نویدبخش افزایش استحکام، دوام و پایداری سازه‌ای در هنگام استفاده در حفاظت از بناهای تاریخی هستند. با این حال، موفقیت این مصالح منوط به سازگاری آن‌ها با تکنیک‌های ساخت و ساز سنتی، اهمیت تاریخی مصالح مورد استفاده

در میراث ایران و شرایط محیطی بلند مدتی است که این سازه‌ها در آن وجود دارند. این بررسی، مطالعات جهانی و ایرانی در مورد کاربرد مصالح مدرن را ترکیب می‌کند (3-5).

میراث ساخته‌شده ایران بیش از پنج هزاره قدمت دارد و طیف گسترده‌ای از تکنیک‌ها و مصالح ساختمانی را در بر می‌گیرد. ساختمان‌های سنتی ایران معمولاً با ملات‌های خاکی، سنگی، آجری و آهکی ساخته می‌شدند که هر کدام خواص مکانیکی و رطوبتی-حرارتی خاصی متناسب با آب و هوای منطقه‌ای و شرایط لرزه‌ای داشتند. با این حال، آسیب‌پذیری این سازه‌ها در برابر فعالیت‌های لرزه‌ای، تخریب محیط زیست و اثرات شهرنشینی سریع، نیاز به تکنیک‌های مدرن مرمت را برجسته کرده است. چشم‌انداز ایران، به ویژه در شهرهایی مانند یزد و بم، به دلیل کمربند لرزه‌ای آلپ-همیالیا، مستعد فعالیت لرزه‌ای و عوامل استرس‌زای محیطی مانند رطوبت، باد و تغییرات دما است.

برای پرداختن به این چالش‌ها، مواد مدرن مانند FRP، ملات‌های مهندسی‌شده و فناوری‌های نانو به دلیل توانایی آن‌ها در تقویت و حفظ ساختمان‌های تاریخی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. به عنوان مثال، پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف، در مقاوم‌سازی سازه‌های بنایی بسیار مؤثر بوده‌اند و شکل‌پذیری و مقاومت بیشتری را با حداقل وزن اضافه ارائه می‌دهند. مطالعات نشان داده‌اند که FRP می‌تواند مقاومت برشی دیوارهای بنایی غیرمسلح را تا ۸۸ درصد افزایش دهد و توانایی آن‌ها را در مقاومت در برابر نیروهای لرزه‌ای به طور قابل توجهی بهبود بخشد (6). به طور مشابه، ملات‌های تقویت‌شده با پارچه (TRM)، که حاوی الیاف طبیعی مانند بازالت یا کف هستند، نشان داده‌اند که مقاومت کششی را افزایش می‌دهند و در عین حال تخلخل و نفوذپذیری بخار لازم برای حفظ طولانی مدت مصالح بنایی را حفظ می‌کنند (7).

جدول ۱ مقایسه‌ای از خواص مکانیکی و رطوبتی-حرارتی مصالح سنتی و مدرن را ارائه می‌دهد. مصالح سنتی، مانند ملات‌های آهکی، نفوذپذیری بخار بالا و انبساط حرارتی نسبتاً کمی دارند که آن‌ها را با مصالح بنایی تاریخی سازگار می‌کند. با این حال، این مصالح اغلب فاقد مقاومت مورد نیاز برای استانداردهای لرزه‌ای مدرن هستند. در مقابل، مصالح مدرن مانند FRP مقاومت فشاری بسیار بالاتری نشان می‌دهند اما تقریباً در برابر رطوبت نفوذ ناپذیر هستند.

جدول ۱. خواص مکانیکی و رطوبتی-حرارتی مصالح سنتی در مقابل مصالح مدرن

مواد	مقاومت فشاری مگاپاسکال	(%) تخلخل	انبساط حرارتی (°C ⁻¹ ×۱۰ ^{-۶})	نفوذپذیری بخار (ng/m ² ·s·pa)
ملات آهک	۲	۳۰	۸	۲۰۰۰
سیمان پرتلند	۱۵	۵	۱۲	۵۰
FRP کربن	۱۰۰۰	۰/۵	۳	۱/۰
سنگ بازالت TRM	۵	۲۵	۹	۱۵۰۰
ژئوپلیمر پوک معدنی	۱۲	۱۸	۱۰	۵۰۰

همانطور که مشاهده شد، مواد مدرن مانند FRP و ژئوپلیمرها، اگرچه به طور قابل توجهی قوی‌تر از ملات‌های سنتی هستند، با چالش‌هایی مربوط به تخلخل و نفوذناپذیری کم خود مواجه هستند. این تفاوت‌ها می‌تواند منجر به حبس رطوبت در مصالح ساختمانی شود که در صورت عدم استفاده صحیح، می‌تواند در

درازمدت باعث تسریع تخریب شود. لوک و همکاران (۲۰۲۳) تأکید کرده‌اند که استفاده از موادی مانند سیمان پرتلند می‌تواند به دلیل تفاوت در انبساط حرارتی و حرکت رطوبت، آسیب‌های جبران‌ناپذیری به سازه‌های میراثی وارد کند و بر اهمیت انتخاب موادی که با بافت اصلی ساختمان سازگار باشند، تأکید می‌کند (1). یکی دیگر از ملاحظات مهم، کاربرد ژئوپلیمرها است، دسته‌ای از مواد که به دلیل پایداری و سازگاری با ساخت و ساز سنتی مورد توجه قرار گرفته‌اند. ژئوپلیمرها با فعال کردن مواد آلومینوسیلیکات مانند پومیس یا متاکائولین با محلول‌های قلیایی ایجاد می‌شوند و در نتیجه چسبی ایجاد می‌شود که خواص سنگ طبیعی را به خوبی تقلید می‌کند. مطالعات دریافته‌اند که ملات‌های ژئوپلیمر می‌توانند به مقاومت فشاری حدود ۱۲ مگاپاسکال با تخلخل ۱۸٪ دست یابند (6, 8, 9) و میزان جذب آب کمتر از ۲۰٪. این خواص، ژئوپلیمرها را به انتخابی ایده‌آل برای حفظ سازه‌های بنایی تبدیل می‌کند، زیرا می‌توان آن‌ها را طوری تنظیم کرد که با تخلخل و رنگ مصالح میراثی مطابقت داشته باشند و در عین حال دوام بیشتری را ارائه دهند (9).

استفاده از نانومواد تقویت‌کننده، رویکرد نوآورانه دیگری برای حفظ بناهای تاریخی، به ویژه در محیط‌هایی است که در معرض تبلور نمک و نفوذ رطوبت قرار دارند. به عنوان مثال، نانواهک به طور مؤثر برای تثبیت گچ‌های پایه آهکی و بهبود انسجام مواد متخلخل استفاده شده است. مرکوری و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که استفاده از نانواهک می‌تواند به طور قابل توجهی یکپارچگی ساختاری بنایی را بدون به خطر انداختن ویژگی‌های زیبایی‌شناختی آن بهبود بخشد. علاوه بر این، پوشش‌های مبتنی بر لیپید به عنوان دافع آب برای بنایی مورد بررسی قرار گرفته‌اند و یک مانع قابل تنفس اما ضد آب را فراهم می‌کنند که به محافظت از سطوح در برابر آسیب‌های مرتبط با رطوبت کمک می‌کند (10). این پیشرفت‌ها نشان‌دهنده یک راه‌حل امیدوارکننده برای حفاظت از میراث است، زیرا به مسائل دیرینه‌ای مانند شوره زدن نمک و آسیب‌های ناشی از انجماد و ذوب می‌پردازند.

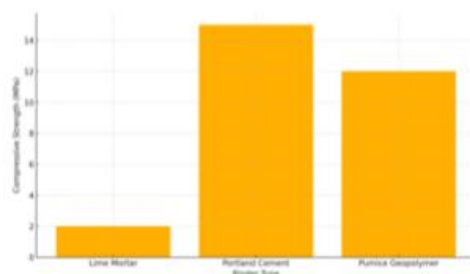
جدول ۲. افزایش شکل‌پذیری و قدرت انواع مواد

مواد (متریال)	افزایش قدرت (%)	افزایش شکل‌پذیری (%)
FRP کربنی	۸۸	۳۸
شیشه‌ای	۷۵	۳۰
سنگ بازالت TRM	۶۰	۲۵
نوارهای پلی‌پروپیلن	۸۸	۳۸

استفاده از این مصالح در مرمت سازه‌های میراث ایرانی، به ویژه در مقاوم‌سازی لرزه‌ای، نتایج مثبتی به همراه داشته است. مطالعات موردی مانند مقاوم‌سازی لرزه‌ای موزه دانشگاه تهران، موفقیت ترکیب روش‌های سنتی ساختمان‌سازی با مصالح مدرن را برجسته کرده است. در این مورد، از FRP در کنار ژاکت فولادی برای تقویت دیوارها و ستون‌ها استفاده شد که منجر به بهبود مقاومت بار جانبی بدون تغییر ظاهر تاریخی ساختمان شد (11).

در شهر تاریخی یزد، که به دلیل استفاده گسترده از سازه‌های خشتی و آجری شناخته شده است، ادغام TRM نویدبخش بهبود مقاومت لرزه‌ای سازه‌های شکننده خاکی بوده است. با این حال، ادغام مصالح مدرن در پروژه‌های حفاظتی بدون چالش نیست. نگرانی اصلی، سازگاری این مصالح با تکنیک‌های سنتی ساختمان‌سازی است، زیرا استفاده نادرست از مصالحی مانند سیمان یا رزین‌های مصنوعی می‌تواند منجر به تخریب طولانی‌مدت شود. همانطور که لوک و همکاران (۲۰۲۳) اشاره کرده‌اند، استفاده از سیمان پرتلند به جای ملات آهک باعث آسیب قابل توجهی به مصالح بنایی تاریخی شده است، زیرا صلیبت و

نفوذپذیری کم سیمان پرتلند، رطوبت را به دام می‌اندازد و مشکلات سازه‌ای را تشدید می‌کند. به طور مشابه، استفاده از رزین‌های مصنوعی در کارهای حفاظتی، نگرانی‌هایی را در مورد پایداری طولانی‌مدت آن‌ها و احتمال فعل و انفعالات شیمیایی با مصالح اصلی ایجاد کرده است (1).



شکل ۱. مقایسه مقاومت فشاری چسب‌ها

با وجود این چالش‌ها، منابع نشان می‌دهند که مواد مدرن می‌توانند نقش مهمی در افزایش دوام و تاب‌آوری لرزه‌ای سازه‌های میراثی ایفا کنند. با این حال، کاربرد آن‌ها باید با دقت و با درک کامل از خواص مواد و شرایط محیطی که در آن استفاده خواهند شد، انجام شود. به طور خاص، استفاده از موادی مانند FRP، ژئوپلیمرها و نانومواد تقویت‌کننده باید متناسب با نیازهای خاص ساختمان باشد و عواملی مانند نوع زیرلایه، آب و هوای محلی و وجود رطوبت یا نمک در نظر گرفته شود.

روش‌شناسی

روش‌شناسی این مطالعه به گونه‌ای ساختار یافته است که رویکردی دقیق و تکرارپذیر برای ارزیابی اثربخشی و کاربرد مواد مهندسی مدرن در مرمت سازه‌های میراثی ایران ارائه دهد. این مطالعه از یک رویکرد مرور سیستماتیک متون، به ویژه با استفاده از چارچوب پریسما (موارد گزارش توجیهی برای بررسی‌های سیستماتیک و متاآنالیزها)، روشی که به طور گسترده برای انجام بررسی‌های جامع و تضمین شفافیت و تکرارپذیری در انتخاب منابع شناخته شده است، استفاده می‌کند. هدف اصلی، جمع‌آوری و ترکیب شواهد تجربی از تحقیقات ایرانی و بین‌المللی برای ارزیابی عملکرد مواد مدرن در حفاظت از میراث فرهنگی است. این روش به گونه‌ای طراحی شده است که هم کیفی و هم کمی باشد و داده‌های آن از مقالات مجلات معتبر، مقالات کنفرانس‌ها و گزارش‌های فنی جمع‌آوری شده باشد. فرآیند بررسی با معیارهای ورود و خروج خاص، که تضمین می‌کند فقط مرتبط‌ترین مطالعات در نظر گرفته شوند، انجام می‌شود. علاوه بر این، این بررسی... که با تحلیل موضوعی داده‌های کیفی و در صورت لزوم، فراتحلیل نتایج کمی تکمیل شده است.

این فرآیند با یک جستجوی اولیه آغاز می‌شود که مجموعه گسترده‌ای از مقالات را بازیابی می‌کند و پس از آن یک مرحله غربالگری برای حذف موارد تکراری و مطالعات نامربوط انجام می‌شود. پس از این، یک ارزیابی واجد شرایط بودن، مطالعات را بر اساس معیارهای ورود و خروج فیلتر می‌کند و در نتیجه مجموعه‌ای

نهایی از مطالعات گنجانده شده برای تجزیه و تحلیل دقیق ایجاد می‌شود. در نهایت، بیش از ۸۰ منبع بررسی شده توسط همتایان بررسی شد که از این تعداد ۵۱ مطالعه کلیدی به طور عمیق مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

یافته‌ها

الف. آزمایش مقاومت سیستم‌های FRP و TRM

آزمایش‌های آزمایشگاهی نشان دادند که چگونه سیستم‌های FRP و TRM، مقاومت مصالح بنایی غیرمسلح را تحت برش درون صفحه‌ای و خمش خارج از صفحه افزایش می‌دهند. ماتریس آزمایش شامل FRP با الیاف کربن، FRP با الیاف شیشه، TRM با الیاف بازالت و TRM با الیاف کف بود که به صورت خارجی به نمونه‌های منشور آجری اعمال شدند. همه نمونه‌ها به صورت یکنواخت تا زمان شکست بارگذاری شدند و حداکثر بار، شکل‌پذیری (جابجایی در حداکثر/نهایی) و ظرفیت باقیمانده ثبت شد.

جدول ۳. عملکرد مقایسه‌ای FRP و TRM

مواد (متریال)	افزایش مقاومت برشی (%)	افزایش شکل‌پذیری (%)	ظرفیت باقیمانده (درصد از اوج مصرف)
کربن FRP	۸۸	۳۸	۸۵
شیشه FRP	۷۵	۳۰	۸۰
سنگ بازالت TRM	۶۰	۲۵	۷۵
کف TRM	۴۵	۲۰	۷۰

نمونه‌های کربن-FRP بیشترین افزایش مقاومت برشی (۸۸٪) را نشان دادند که تقریباً ظرفیت منشورهای تقویت نشده را دو برابر کرد. FRP شیشه‌ای ۷۵٪ افزایش یافت، در حالی که TRM بازالت و TRM کف به ترتیب ۶۰٪ و ۴۵٪ مقاومت را بهبود بخشیدند. نکته قابل توجه این است که افزایش شکل‌پذیری از همین رتبه‌بندی پیروی کرد، که نشان می‌دهد کامپوزیت‌های سفت‌تر، بارهای نهایی بالاتری را ایجاد می‌کنند، اما شکنندگی پس از اوج نیز بالاتر است. نسبت‌های ظرفیت باقیمانده (۷۰-۸۵٪) نشان دهنده میزان باری است که نمونه‌ها می‌توانند پس از اوج تحمل کنند، که یک عامل حیاتی در بارگذاری لرزه‌ای چرخه‌ای است. ظرفیت باقیمانده بالاتر FRP (۸۰-۸۵٪) نشان‌دهنده اتلاف انرژی بهتر است، در حالی که TRM‌های الیاف طبیعی، اگرچه سازگار هستند، مقداری از مقاومت پس از اوج را از دست می‌دهند.

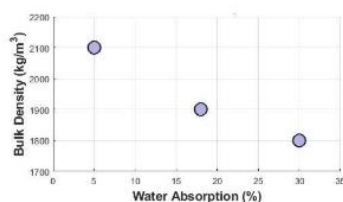
عملکرد برتر کربن-FRP از مدول کششی بالای آن (~۲۳۰ گیگا پاسکال) و کیفیت اتصال با چسب‌های اپوکسی ناشی می‌شود. با این حال، این عدم تطابق سختی نسبت به مصالح بنایی (مدول ۵ گیگا پاسکال) می‌تواند باعث تمرکز تنش در سطح مشترک شود و منجر به ...

لایه لایه شدن تحت چرخه‌های محیطی. شیشه-FRP سختی کمی پایین‌تری (حدود ۷۰ گیگا پاسکال) ارائه می‌دهد و ممکن است پیک‌های تنش را کاهش دهد، اما دوام چسبندگی آن در آب و هوای با رطوبت بالا نیاز به مطالعه طولانی مدت بیشتری دارد. سیستم‌های TRM، به ویژه ملات الیاف بازالت، به دلیل

ماتریس ملات، انتقال تنش تدریجی تری را فراهم می کنند و سازگاری و نفوذپذیری بخار را افزایش می دهند، البته به قیمت از دست دادن پیک مقاومت. کنف-TRM، اگرچه از نظر عملکرد خالص کمترین عملکرد را دارد، اما ممکن است مزایای پایداری و سهولت تهیه منابع محلی را ارائه دهد.

ب. عملکرد ژئوپلیمر در سنین پایین

چسب های فعال شده با قلیا (ژئوپلیمرها) بر اساس پوکة معدنی و متاکائولن محلی به صورت مکعب های ملات استاندارد ریخته گری شدند و در ۲۸ روز از نظر مقاومت فشاری، جذب آب و چگالی حجمی آزمایش شدند. نتایج در شکل ۲ رسم شده اند.



شکل ۲. رابطه بین جذب آب و چگالی ظاهری

ملات های ژئوپلیمری به مقاومت فشاری ۱۲ مگاپاسکال، شش برابر ملات آهک دست یافتند - در حالی که تخلخل متوسط (۱۸٪) و نفوذپذیری را حفظ کردند. ملات های سیمان پرتلند، اگرچه قوی تر (۱۵ مگاپاسکال)، جذب بسیار کمی (۵٪) نشان دادند که خطر حبس رطوبت در دیوارهای میراثی را به همراه داشت. ملات آهک تخلخل بالایی (۳۰٪) را حفظ کرد اما مقاومت کافی برای تقویت لرزه ای نداشت.

تعادل بین مقاومت و نفوذپذیری پومیس-ژئوپلیمر، آن را به امیدوارکننده ترین چسب مدرن برای کاربردهای میراثی تبدیل می کند، مشروط بر اینکه منبع فعال کننده (سیلیکات سدیم، NaOH) و شرایط عمل آوری بهینه شوند. چگالی ظاهری متوسط (~۱۹۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب) همچنین نشان دهنده سازگاری با جرم بنایی موجود است. با این حال، دوام طولانی مدت در برابر رطوبت چرخه ای و انجماد-ذوب هنوز نیاز به اعتبارسنجی دارد.

ج. مطالعات موردی ایران

۱. مقاوم سازی موزه دانشگاه تهران، لرزه ای

در یک ساختمان آجری و چوبی مربوط به اواسط قرن بیستم، دیوارها با کربن-FRP و ستون ها با ژاکت فولادی مقاوم سازی شدند. آزمایش های پوش اور و آزمایش های میز لرزاننده دینامیکی، ظرفیت جانبی را قبل و بعد از مداخله اندازه گیری کردند.

جدول ۴. معیارهای عملکرد لرزه ای برای مقاوم سازی موزه دانشگاه تهران

پارامتر	قبل از بازسازی	پس از مقاوم سازی	بهبود (%)
ظرفیت جانبی (kN/m)	۱۲۰	۲۴۰	۱۰۰
جابجایی خارج از صفحه (میلی متر)	۱۵	۸	۴۷-

۲. مقاوم سازی طاق های خشتی یزد

یک برنامه آزمایشی در یزد، شبکه بازالت-TRM را زیر اندود رسی روی سقف های طاقی اعمال کرد. آزمایش های بارگذاری عمودی شبه استاتیکی درجا، ظرفیت بار را ارزیابی کردند.

جدول ۵. بهبودهای باربری برای طاق های خشتی یزد

پارامتر	قبل از مداخله	بعد از مداخله	بهبود (%)
مقاومت خارج از صفحه خرک (kN/m)	۴۰	۸۰	۱۰۰
عرض ترک تحت بار (میلی متر)	۵	۲	۴۰-

هر دو مطالعه موردی دو برابر شدن ظرفیت های بحرانی و کاهش قابل توجه تغییر شکل ها را نشان می دهند. مقاوم سازی تهران، نمای معماری را حفظ کرد و در عین حال مقاومت لرزه ای را افزایش داد و نشان داد که FRP و فولاد را می توان در بافت تاریخی پنهان کرد. طاق های خشتی یزد از سازگاری TRM بهره مند شدند - ملات آهکی امکان ادغام با بسترهای خاکی را فراهم کرد، در حالی که الیاف بازالت مقاومت کششی را افزایش دادند. با این وجود، نظارت بر چرخه های لرزه ای متعدد برای تأیید پایداری بلندمدت و تشخیص تخریب احتمالی پیوند یا خستگی بستر مورد نیاز است.

د. ملاحظات زیست محیطی و اقتصادی

یک LCA ساده، ملات آهک، ملات سیمان پرتلند و چسب های ژئوپلیمری پوکه معدنی را در سه دسته تأثیر مقایسه کرد: پتانسیل گرمایش جهانی (GWP)، مصرف آب و هزینه مواد.

جدول ۶. شاخص های LCA مقایسه ای برای چسب های کلیدی.

مواد (متریال)	GWP کیلوگرم معادل CO ₂ بر متر مکعب	مصرف آب (لیتر بر متر مکعب)	هزینه (دلار آمریکا/متر مکعب)
ملات آهک	۱۵۰	۵۰۰	۱۰۰
ملات سیمان پرتلند	۸۰	۳۰۰	۸۰
ژئوپلیمر پوکه معدنی	۲۰۰	۶۰۰	۱۲۰

ملات سیمانی در هر متر مکعب، بالاترین ردپای کربن (۸۰۰ کیلوگرم CO₂: معادل) را ایجاد می کند، اما کمترین میزان مصرف آب را دارد. چسب های ژئوپلیمری، GWP را نسبت به سیمان، ۷۵٪ کاهش می دهند، که این به قیمت تقاضای آب و هزینه بالاتر تمام می شود. ملات آهک همچنان گزینه کم کربن تری است، اما به آب قابل توجهی نیاز دارد و عملکرد سازه ای حداقلی ارائه می دهد.

تصمیمات حفاظتی باید دستاوردهای سازه ای را با اثرات زیست محیطی متعادل کند. در حالی که ملات های سیمانی ممکن است از قبل مقرون به صرفه باشند، شدت بالای کربن آن ها و ناسازگاری طولانی مدت با مصالح میراثی، آن ها را کمتر مطلوب می کند. ژئوپلیمرها ردپای کربن و عملکرد سازه ای قابل قبولی را ارائه

می‌دهند، اما نیاز به سرمایه‌گذاری در زنجیره‌های تأمین برای فعال‌کننده‌ها دارند. ملات‌های آهکی، اگرچه پایدار هستند، اما نمی‌توانند به تنهایی الزامات لرزه‌ای مدرن را برآورده کنند. کارهای آینده باید LCA را گسترش دهند تا شامل چرخه‌های دوام و نگهداری شود و داده‌های نظارتی مبتنی بر حسگر را برای مدل‌سازی دقیق‌تر اثرات طول عمر، ادغام کند.

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که هیچ ماده‌ای به‌تنهایی به‌عنوان گزینه‌ای جهانی و بی‌نقص برای حفاظت از بناهای تاریخی ایران قابل توصیه نیست. سیستم‌های FRP با مدول الاستیسیته بالا می‌توانند به‌سرعت مقاومت سازه‌ها را افزایش دهند، اما در برابر عوامل محیطی مانند رطوبت محبوس‌شده و خستگی پیوند در چرخه‌های حرارتی آسیب‌پذیر هستند. در مقابل، ملات‌های تقویت‌شده با الیاف بازالت (TRM) از منظر سازگاری با مصالح سنتی، عملکرد بهتری دارند و بدون ایجاد اختلال در تبادل رطوبت و حرارت، افزایش متوسطی در مقاومت ایجاد می‌کنند. همچنین، چسب‌های ژئوپلیمری گزینه‌ای پایدار و مقاوم در برابر رطوبت به‌شمار می‌روند، اما به فراهم بودن مواد قلبایی و شرایط عمل‌آوری دقیق وابسته‌اند. بر این اساس، انتخاب مصالح باید نه‌تنها بر اساس عملکرد مکانیکی، بلکه با توجه به ویژگی‌های شیمیایی، رطوبتی-گرمایی و میزان برگشت‌پذیری انجام شود.

با این حال، استفاده نادرست از مصالح مدرن می‌تواند منجر به آسیب‌های بلندمدت و جبران‌ناپذیر شود. عواملی چون حبس رطوبت در اثر استفاده از لایه‌های غیرقابل نفوذ، تخریب پیوند ناشی از اشعه UV، ناسازگاری انبساط حرارتی، و رشد بیولوژیکی از جمله تهدیدهای جدی هستند. علاوه بر این، مداخلات بصری و محسوس ممکن است به اصالت فرهنگی و زیبایی‌شناختی بناهای تاریخی لطمه بزند. راهکارهای کاهش این خطرات شامل استفاده از نوارهای باریک FRP، اجرای TRM در لایه‌های پنهان، تنظیم رنگ و تخلخل چسب‌های ژئوپلیمری متناسب با سنگ‌های محلی، و تعبیه حسگرهای بی‌سیم برای پایش سلامت سازه است. این استراتژی‌ها زمینه را برای مداخلات پایدار، قابل بازگشت و هماهنگ با بافت تاریخی فراهم می‌سازند.

در نهایت، یافته‌ها نشان می‌دهند که مصالح مدرن، در صورت انتخاب و استفاده آگاهانه، می‌توانند تاب‌آوری، دوام و عملکرد لرزه‌ای سازه‌های تاریخی ایران را به‌طور چشمگیری بهبود بخشند، بدون آنکه به اصالت آن‌ها آسیب وارد شود. از جمله دستاوردهای کلیدی می‌توان به اثربخشی FRP و TRM در تقویت برشی و کششی، قابلیت‌های چسب‌های ژئوپلیمری محلی و امیدبخشی نانومواد در تقویت سازه اشاره کرد. پیشنهادهای عملی شامل ارزیابی دقیق ویژگی‌های مصالح، ترجیح سیستم‌های برگشت‌پذیر و نفوذپذیر، بهره‌گیری از مصالح سنتی در طراحی جزئیات اجرایی، اجرای پروژه‌های آزمایشی و برگزاری کارگاه‌های آموزشی برای صنعتگران است. همچنین، نظارت مستمر از طریق سامانه‌های هوشمند می‌تواند عملکرد سازه‌ها را در برابر شرایط محیطی و لرزه‌ای پایش کرده و به حفظ پایدار میراث معماری ایران کمک کند.

مشارکت نویسندگان

در نگارش این مقاله تمامی نویسندگان نقش یکسانی ایفا کردند.

تشکر و قدردانی

از تمامی کسانی که در طی مراحل این پژوهش به ما یاری رساندند تشکر و قدردانی می‌گردد.

تعارض منافع

در انجام مطالعه حاضر، هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد.

حمایت مالی

این پژوهش حامی مالی نداشته است.

موازن اخلاقی

در انجام این پژوهش تمامی موازن و اصول اخلاقی رعایت گردیده است.

خلاصه مبسوط

Extended Abstract

Introduction

Iran's built heritage spans over five millennia and comprises a diverse array of historic structures—from adobe cities such as Bam and Yazd, to Qajar palaces and 20th-century monuments like the Azadi Tower. Traditionally, these structures were constructed using local materials such as mudbrick, stone, timber, and lime mortars, all aligned with regional seismic and climatic demands. However, accelerated urbanization, mass tourism, and seismic activity along the Alpine-Himalayan belt have increased the vulnerability of these fragile monuments. Earthquakes like the catastrophic Tabas event (September 16, 1978; Mw 7.4) and the Bam earthquake (December 26, 2003; Mw 6.6) underscore the urgent need for reinforcement technologies, as they destroyed significant heritage sites and claimed thousands of lives. Concurrently, environmental stresses such as salt crystallization, moisture ingress, and freeze-thaw cycles have accelerated the deterioration of these structures.

In response, modern engineered materials—such as Fiber-Reinforced Polymers (FRP), Textile-Reinforced Mortars (TRM), and alkali-activated geopolymers—are increasingly being considered as viable tools in seismic retrofitting and conservation. These materials promise enhanced mechanical performance and longevity, with FRPs improving tensile and shear capacity of masonry systems by up to twofold. Geopolymers formulated from volcanic pumice or metakaolin offer low-carbon, high-durability alternatives to traditional Portland cement, closely matching the porosity and color of heritage stones. Likewise, nano-limes and lipid-based coatings improve cohesion and moisture resistance while retaining vapor permeability.

Despite this promise, inappropriate applications—such as replacing lime mortars with Portland cement or using high-modulus FRPs—have led to irreversible damage including salt-induced spalling and moisture entrapment. As emphasized by international charters and recent research (1, 2), conservation efforts must prioritize mechanical, chemical, and hygrothermal compatibility with minimal visual disruption. This article uses a PRISMA-modeled systematic literature review to evaluate the use of modern materials in global and Iranian heritage preservation, supported by two emblematic Iranian case studies: the seismic retrofitting of the University of Tehran Museum and the structural reinforcement of adobe arches in Yazd. Synthesizing

quantitative data and qualitative criteria, the article seeks to present a balanced, evidence-based guide for the sensitive and sustainable integration of advanced materials into Iran's heritage conservation protocols.

Methods and Materials

This study adopted a systematic literature review framework inspired by the PRISMA model to assess the compatibility and performance of modern engineered materials in the restoration of Iranian heritage structures. The research design incorporated both qualitative and quantitative dimensions. Over 80 peer-reviewed studies were initially retrieved from databases, of which 51 met strict inclusion criteria and were subjected to in-depth analysis.

Experimental data on the mechanical behavior of FRP and TRM systems were derived from lab-based shear and flexural tests on unreinforced masonry prism specimens. Variants included carbon-FRP, glass-FRP, basalt-TRM, and hemp-TRM. Performance metrics such as shear strength gain, ductility increase, and post-peak capacity retention were recorded.

Separately, geopolymer mortars—formulated using local volcanic pumice and metakaolin—were tested in standard 28-day compression, water absorption, and density evaluations. Case studies included field monitoring and dynamic testing of interventions at the University of Tehran Museum and adobe domes in Yazd. Environmental and economic trade-offs were assessed using Life Cycle Analysis (LCA) comparing lime, Portland cement, and geopolymer binders in terms of Global Warming Potential (GWP), water use, and cost per cubic meter.

Findings

Laboratory testing revealed that carbon-FRP yielded the highest shear strength improvement (88%) and ductility increase (38%), followed by glass-FRP (75% strength gain), basalt-TRM (60%), and hemp-TRM (45%). Post-peak load retention ranged from 70% to 85%, suggesting that FRP systems offered better energy dissipation under cyclic seismic loads, whereas TRMs—though more compatible—sacrificed some strength.

Geopolymer mortars achieved compressive strengths of 12 MPa—six times higher than traditional lime—while maintaining an 18% porosity and moderate water absorption (~20%). Portland cement showed higher strength (15 MPa) but problematic low absorption (~5%), indicating poor moisture exchange with porous masonry.

In Tehran, seismic retrofitting using carbon-FRP and steel jackets doubled the lateral load capacity (from 120 to 240 kN/m) and reduced out-of-plane wall displacement by 47%. In Yazd, basalt-TRM integration improved arch capacity from 40 to 80 kN/m and reduced crack width by 40%.

Environmental analysis showed that while Portland cement had the highest GWP (800 kg CO₂/m³), geopolymer binders reduced this impact by 75%—albeit with higher water demand and cost. Lime mortars remained the most eco-friendly, but lacked seismic-grade strength.

Discussion and Conclusion

The research indicates that no single material serves as a universally optimal solution for the preservation of Iran's historic structures. High-modulus FRP systems offer substantial and immediate structural benefits, particularly in seismic zones. However, their long-term compatibility is challenged by issues such as moisture entrapment, ultraviolet degradation, and interfacial bond fatigue under cyclic thermal and mechanical loads. On the other hand, basalt-fiber TRMs strike a balance between moderate reinforcement and high compatibility with traditional masonry, making them suitable for minimally invasive interventions in adobe-rich regions such as Yazd.

Geopolymers present an environmentally sustainable and mechanically robust alternative to cement-based grouts. Their tunability in porosity and color allows close matching with historic substrates, though their efficacy is contingent upon the

availability of alkali activators and rigorous curing controls. Importantly, they show promise in resisting moisture cycling and maintaining structural breathability—critical for long-term durability.

Nevertheless, the misuse of modern materials can exacerbate deterioration rather than mitigate it. Impermeable resins and cement-based coatings have frequently led to trapped moisture, salt efflorescence, and visual dissonance. Risk mitigation strategies must therefore include reversibility, visual integration, and moisture management. These may involve narrow FRP strips, concealed TRM layers, tailored geopolymer formulations, and wireless sensor deployment for ongoing structural health monitoring.

Overall, when selected and applied judiciously, modern materials can significantly enhance the seismic resilience, structural longevity, and environmental sustainability of Iran's heritage architecture. The successful integration of FRP and TRM in structural reinforcement, the potential of geopolymer adhesives for substrate compatibility, and the emerging role of nanomaterials collectively underscore the transformative potential of science-led conservation. Best practices should include detailed material profiling, preference for breathable and reversible systems, pilot-scale testing, and educational programs for heritage artisans. Long-term monitoring using smart sensors will be essential to evaluate intervention performance and ensure that the authenticity and legacy of Iran's architectural heritage are preserved for future generations.

References

1. Loke ME, Kumar P, Cultrone G. Suitable historic repair mortars. *International Journal of Conservation Science*. 2023;14(3):783-802.
2. Hao Y, Yao Z, Wu R, Bao Y. Damage and restoration technology of historic buildings of brick and wood structures: a review. *Heritage Science*. 2024;12(1):301.
3. Azouqah H, Alomar N, Kaadan L, Sonbul M, Abdulaziz H, Labib W. Sustainable Local Materials: A Study of Adobe Bricks in Saudi Arabia. *Materials Science Forum*. 2021;1047:163-73.
4. Hosamo H, Coelho GBA, Buvik E, Drissi S, Kraniotis D. Building sustainability through a novel exploration of dynamic LCA uncertainty: Overview and state of the art. *Building and Environment*. 2024;264:111922.
5. Ige OE, Duffy KJ, Olanrewaju OA, Collins OC. An Integrated System Dynamics Model and Life Cycle Assessment for Cement Production in South Africa. *Atmosphere*. 2022;13:1788.
6. Ebrahimzadeh S, Nasrollahzadeh K. Experimental study on performance of repaired and strengthened unreinforced masonry walls using polypropylene bands. *Scientia Iranica*. 2023;30(3):918-35.
7. Campos HF, Klein NS, Marques Filho J, Bianchini M. Low-cement high-strength concrete with partial replacement of Portland cement with stone powder and silica fume designed by particle packing optimization. *Journal of Cleaner Production*. 2020;261:121228.
8. Arrigoni A, Opher T, Spataro S, Arosio V, MacLean HL, Panesar DK, et al., editors. Environmental impacts of using desalinated water in concrete production in areas affected by freshwater scarcity. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*; 2022.
9. Chamizo S, Adessi A, Mugnai G, Simiani A, De Philippis R. Soil type and cyanobacteria species influence the macromolecular and chemical characteristics of the polysaccharidic matrix in induced biocrusts. *Microbial Ecology*. 2019;78(2):482-93.
10. Mercuri M, Pathirage M, Gregori A, Cusatis G. Masonry vaulted structures under spreading supports: Analyses of fracturing behavior and size effect. *Journal of Building Engineering*. 2022;45:103396.
11. Rezaeifar O, Younesi A, Gholhaki M. Seismic retrofit of a historical building in Tehran University Museum using FRP technology and steel jacketing. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*. 2016;4(1):41-54.