نشریهٔ علمی باغ نظر، ۲۳(۱۵۶)، ۷-۲۰ / خرداد ۱۴۰۵
DOI:10.22034/bagh.2026.567606.5964

ترجمهٔ انگلیسی این مقاله نیز با عنوان:
Evaluation of Traditional and Modern Approaches to Reinforcing Adobe Brick Against Environmental Factors
در همین شمارهٔ مجله به‌چاپ رسیده است.

مقالهٔ پژوهشی

ارزیابی راهکارهای سنتی و مدرن مقاوم‌سازی خشت در برابر عوامل محیطی*

سمیه پهلوان[۱]، سمیه فدایی نژاد بهرامجردی[۱]**

۱. گروه مطالعات و حفاظت میراث معماری و شهری، دانشکدهٔ معماری، دانشکدگان هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۰۹ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۰۱

چکیده

بیان مسئله: بناهای گلین، از کهن‌ترین آثار و دست‌ساخته‌های جهانی، روزگاری اصلی‌ترین سرپناه انسانی بوده است که امروزه نیز در بخش‌هایی از جهان کاربری خود را حفظ کرده‌اند و خشت به‌عنوان یکی از قدیمی‌ترین مصالح ساختمانی در معماری سنتی ایران و بسیاری از کشورهای دیگر، همواره در معرض آسیب‌پذیری در برابر عوامل محیطی نظیر رطوبت، بارندگی، تغییرات دما و هوازدگی قرار داشته است این مسئله، به‌ویژه در بناهای تاریخی خشتی، موجب تخریب تدریجی و کاهش دوام سازه‌ها می‌شود. در این میان ضرورت حفاظت از این مجموعه‌های خشتی که تا بیش از این دچار آسیب‌های ساختاری باتوجه‌به عوامل طبیعی و انسانی بوده است آشکار می‌شود.

هدف پژوهش: این پژوهش به دنبال معرفی و ارزیابی راهکارهای سنتی و مدرن به‌کارگرفته‌شده جهت مقاوم‌سازی خشت در برابر عوامل آسیب‌رسان محیط از جمله رطوبت است.

روش پژوهش: روش پژوهش حاضر توصیفی - تحلیلی است و روش گردآوری اطلاعات به‌صورت مطالعات اسنادی (کتابخانه‌ای)است.

نتیجه‌گیری: نتایج حاکی از آن است که هرچند روش‌های سنتی به دلیل سازگاری با اقلیم، دردسترس‌بودن و کم‌هزینه‌بودن همچنان اهمیت دارند، اما کارایی آنها در برابر شرایط سخت اقلیمی محدود است. در مقابل، فناوری‌های مدرن توانسته‌اند به شکل مؤثری دوام خشت را افزایش دهند، هرچند هزینه‌های بالا و عدم سازگاری کامل با بافت تاریخی از چالش‌های اصلی آنهاست. درنهایت، پژوهش تأکید می‌کند که ترکیب رویکردهای سنتی و مدرن و اتخاذ نتایج پژوهش نشان داد که روش‌های سنتی مانند افزودن کاه و اندود کاهگل اگرچه ساده، ارزان و سازگار با محیط زیست‌اند، اما در برابر رطوبت و شرایط سخت دوام محدودی دارند. در مقابل، راهکارهای مدرن مبتنی‌بر مواد شیمیایی و نانویی مقاومت مکانیکی و پایداری بیشتری ایجاد می‌کنندو بهترین رویکرد، ترکیب این دو دسته روش برای دستیابی به دوام و اصالت معماری است.

واژگان کلیدی: *مقاوم‌سازی، عوامل محیطی، تکنیک های نوین، مصالح بومی، رطوبت.*

مقدمه

خشت به‌عنوان یکی از قدیمی‌ترین مصالح ساختمانی، جایگاه ویژه‌ای در تاریخ شکل‌گیری تمدن‌های انسانی دارد و نقش مؤثری در تکوین معماری بومی، به‌ویژه در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، ایفا کرده است. در ایران نیز این مصالح از ارکان اصلی ساخت‌وساز به‌شمار می‌رفته و در احداث بناهای مسکونی، مذهبی و نظامی کاربرد گسترده‌ای داشته است؛ به‌گونه‌ای که نمونه‌های شاخص آن همچنان در بافت‌های تاریخی شهرهایی مانند یزد، کرمان و کاشان قابل مشاهده است. با وجود مزایایی نظیر دسترسی آسان، هزینهٔ پایین، سازگاری با محیط‌زیست و عملکرد مناسب حرارتی، خشت دارای محدودیت‌های مهمی نیز هست. از جمله مهم‌ترین این

* این مقاله در همایش بین‌المللی «میراث معماری در خطر» که در تاریخ ۲۹ مهر ۱۴۰۴ به میزبانی مجتمع علمی، فرهنگی و تاریخی ربع رشیدی تبریز و مرکز تحقیقات تاریخ، هنر و فرهنگ سازمان فرهنگی اسلامی (ارسیکا) برگزار شد، ارائه شده است.

* نویسندهٔ مسئول: ۰۹۱۲۵۴۸۸۹۴۹، sarafadaei@ut.ac.ir

چالش‌ها می‌توان به حساسیت بالا در برابر عوامل محیطی همچون رطوبت، بارندگی، نوسانات دمایی، فرسایش بادی و زلزله اشاره کرد (Minke, 2000؛ رجبی، ۱۳۹۲). این آسیب‌پذیری موجب شده است که بخش قابل توجهی از میراث معماری خشتی در معرض فرسایش و تخریب قرار گیرد. در طول زمان، جوامع مختلف برای کاهش این آسیب‌ها، راهکارهای متعددی را به کار گرفته‌اند. افزودن الیاف گیاهی مانند کاه به‌منظور افزایش انسجام خشت، استفاده از اندودهای گلی و آهکی جهت کاهش نفوذ رطوبت و نیز طراحی‌های اقلیمی متناسب، از جمله مهم‌ترین روش‌های سنتی محسوب می‌شوند (دشتی‌زاده و گرکانی، ۱۳۹۷). هرچند این راهکارها با شرایط بومی هماهنگ بوده و تا حدی در افزایش دوام بناها مؤثر واقع شده‌اند، اما در مواجهه با شرایط اقلیمی شدید و سوانح طبیعی، کارایی محدودی از خود نشان داده‌اند. در دهه‌های اخیر، پیشرفت‌های علمی و فناوری زمینهٔ ارائه روش‌های نوین برای بهبود عملکرد خشت را فراهم کرده است. استفاده از افزودنی‌های شیمیایی، نانوذرات، پلیمرها و پوشش‌های محافظ جدید، از جمله راهکارهایی است که با هدف افزایش مقاومت مکانیکی و دوام این مصالح پیشنهاد شده‌اند (Martínez-García et al., 2020). این روش‌ها با ایجاد تغییر در ساختار ریزمقیاس خشت یا ایجاد لایه‌های محافظ، توانسته‌اند مقاومت آن را در برابر رطوبت و عوامل فرسایشی به‌طور قابل توجهی افزایش دهند. با این حال، به‌کارگیری این فناوری‌ها با چالش‌هایی نیز همراه است؛ از جمله هزینه‌های بالا، نیاز به دانش تخصصی و مهم‌تر از همه، عدم انطباق کامل با اصول حفاظت از میراث فرهنگی (خوشبخت بهرامانی و سپهری مقدم، ۱۳۹۲). در همین راستا، رویکردهای نوین در حوزهٔ مرمت تأکید دارند که مداخلات نباید به اصالت و ارزش‌های تاریخی بنا آسیب وارد کند. بر این اساس، بررسی و مقایسهٔ نظام‌مند روش‌های سنتی و نوین مقاوم‌سازی خشت، ضرورتی اساسی در مطالعات معماری و مرمت به‌شمار می‌آید. چنین رویکردی می‌تواند ضمن کمک به انتخاب مناسب‌ترین راهکار برای حفاظت از بناهای خشتی، زمینهٔ توسعه روش‌های بومی، کم‌هزینه و سازگار با ارزش‌های فرهنگی را نیز فراهم سازد. در همین چارچوب، پژوهش حاضر با رویکردی تطبیقی به بررسی روش‌های سنتی و مدرن مقاوم‌سازی خشت پرداخته و در پی پاسخ به این پرسش است که مهم‌ترین راهکارهای به‌کارگرفته‌شده در هر یک از این دو رویکرد برای مقابله با عوامل محیطی کدام‌اند؟ همچنین تلاش می‌شود با تحلیل نقاط قوت و ضعف هر روش، پیشنهادهایی برای افزایش دوام خشت و ارتقای طول عمر بناهای مرتبط ارائه شود.

پیشینهٔ پژوهش

یافته‌های باستان‌شناسی در منطقهٔ خاورمیانه نشان می‌دهد که کاربرد معماری خشتی از دورهٔ نوسنگی تا دوران معاصر تداوم داشته است. از قدیمی‌ترین نمونه‌های شناخته‌شده می‌توان به سکونتگاه‌های اریحا (جریکو) در حدود ۸۰۰۰ پیش از میلاد اشاره کرد که با وسعتی نزدیک به چهار هکتار و پلان مدور، شواهدی از استفاده هدفمند از مصالح گلی را ارائه می‌دهد. در ادامه این روند، تمدن‌های بین‌النهرین و عیلام نقش مهمی در توسعهٔ معماری خشتی ایفا کرده‌اند. آثاری همچون مریبت در سوریه، تل حسونا در جنوب عراق (حدود ۵۰۰۰ ق.م)، مجموعه‌های مذهبی اورک در شهر اور (۳۲۰۰ ق.م) و معبد چغازنبیل در خوزستان (هزارهٔ دوم ق.م)، از جمله نمونه‌های شاخص این دوره به‌شمار می‌روند. همچنین ساختارهایی مانند برج بابل در قرن هفتم پیش از میلاد، بیانگر تداوم و تکامل این نوع معماری در طول زمان هستند. در فلات ایران نیز شواهد متعددی از کاربرد خشت در محوطه‌هایی نظیر تپهٔ سیلک کاشان (۴۰۰۰ ق.م)، تپهٔ زاغه قزوین (۷۰۰۰ ق.م) و گنج‌دره (۸۰۰۰ ق.م) به دست آمده است. علاوه‌بر این، در مجموعهٔ تخت‌جمشید، به‌عنوان یکی از برجسته‌ترین آثار معماری هزارهٔ اول پیش از میلاد، از خشت‌های عایق‌شده با قیر در بخش‌هایی مانند آبروهای زیرزمینی استفاده شده است که نشان‌دهندهٔ شناخت فنی پیشرفته در به‌کارگیری این مصالح است. در دوره‌های تاریخی پس از آن، استفاده از خشت همچنان تداوم یافته است. شهرهای نسا در نزدیکی عشق‌آباد و هکاتوم‌پیلوس در جنوب‌غرب دامغان در دورهٔ اشکانی، و نیز کاخ کوه خواجه در دورهٔ پارتیان، از جمله نمونه‌های مهم این روند به‌شمار می‌آیند. در سده‌های نخستین اسلامی، الگوهای معماری ساسانی همچنان در مناطق مختلف، به‌ویژه در نواحی کویری، مورد استفاده قرار می‌گرفت. در دورهٔ سلجوقی، به‌منظور حفاظت از هسته‌های خشتی، استفاده از پوشش‌های آجری رواج گسترده‌ای یافت؛ رویکردی که در دورهٔ ایلخانی گسترش بیشتری پیدا کرد و در دورهٔ تیموری به اوج خود رسید. در دوره‌های صفوی و قاجار نیز کاروان‌سراها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین نمونه‌های قابل مطالعه در شناخت معماری خشتی مطرح هستند (ابراهیمی، ۱۳۹۸، ۱۳). علاوه‌بر بناهای شاخص، بخش قابل توجهی از فضاهای زیستی شامل خانه‌ها، مجموعه‌های مسکونی و حتی سازه‌های دفاعی مانند قلعه‌ها، در شهرها و روستاها با استفاده از خشت و گل ساخته شده‌اند که نشان‌دهندهٔ نقش گستردهٔ این مصالح در زندگی روزمره جوامع گذشته است. در جدول ۱ ویژگی‌های فنی ساختارخشت در گسترهٔ تاریخ ایران بررسی شده است.

- **منشورها و معاهدات و نشست‌های بین المللی و جهانی**

در چند دههٔ اخیر، مطالعات گسترده‌ای در زمینهٔ مصالح خشتی و حفاظت معماری خاکی انجام شده است. نخستین توجه علمی به این موضوع در حدود سال‌های ۱۹۵۰ تا ۱۹۶۰ مشاهده شد (Alva, 2008, 3). در دههٔ ۱۹۷۰، کمیته علمی بین‌المللی میراث معماری خاکی توسط ایکوموس تأسیس شد و برنامه‌هایی برای حفاظت از بناهای تاریخی گلی تدوین شد. برگزاری سمپوزیوم

جدول ۱. ویژگی فنی ساختار خشت در گسترهٔ تاریخ ایران. مأخذ: مسرت، ۱۴۰۱، ۲۵۰.

دوره	ویژگی
هزارهٔ ۹-۱۰ ق.م	در این مرحله از تحول سکونت انسانی، استفاده از چینه و خشت هنوز رواج نیافته بود و فضاهای زیستی بیشتر به‌صورت گودال‌های دست‌کند شکل می‌گرفتند که کف آنها به‌طور ابتدایی با سنگ پوشانده می‌شد.
هزارهٔ ۸ ق. م	رواج خشت‌های دست‌ساز رواج به‌کارگیری ملات گلی در بین خشت‌ها و اندود گلی برای پوشش دیوارها کنج سازی دیوارها با استفاده از گل رواج خشت‌های کشیده و بلند به طول یک متر با یک وجهٔ محدّب و یک وجهٔ مسطح رواج خشت‌هایی به شکل سیگار برگ وجه محدّب و یک وجه مسطح رواج خشت‌هایی به شکل سیگار برگ شواهدی دال بر تقویت بناهای گلی با چوب و نی شواهدی دال بر استفاده از علف و خرده‌سنگ به‌عنوان مواد افزودنی به خشت پیدایش اتصالات خشتی
هزارهٔ ۷ ق. م	استفادهٔ توأم از چینه خشت‌های دستساز ساخت خشت از برش‌دادن خمیر گل پهن‌شده بر سطح زمین استفاده از کاه خردشده، علف خردشده و شن‌ریزه به‌عنوان مواد افزودنی به خشت شواهدی دال بر عمل‌آوری خمیر گل برای ارتقاء کیفی محصولات ایجاد فرورفتگی در بدنهٔ خشت برای انتقال بهتر و اتصّال بیشتر با ملات و اندود رواج بکارگیری پوشش گلی قرمزرنگ بر سطح لایهٔ اندود (نوعی تزیین) شواهدی دال بر ترمیم اندود گلی در نواحی فرسوده و تخریب‌شده
هزارهٔ ۶ ق. م	احتمال به کارگیری چوب برای پوشش سقف خانه‌ها
هزارهٔ ۵ ق. م	شواهدی دال بر استفاده از قالب‌های خشتزنی (سرآغاز تحول)
هزارهٔ ۴ ق. م	استفاده از خش‌های قالبی برای ساخت بناها
هزارهٔ ۳ ق. م	استفاده توأم از چینه و خشت‌های قالبی شواهدی دال بر استفاده از تیرهای چوبی برای مسقّف کردن فضاها شواهدی دال بر عایق‌کاری کف بعضی اتاق‌ها با استفاده از تیرهای چوبی و تقسیمات فضایی
هزارهٔ ۲ ق. م	استفاده از روکش آجری محافظ در اطراف هستهٔ خشتی بنا استفاده از خرده آجر در ساختمان خشت برای بهبود رفتار خشک شدن به کارگیری فن خشکه چینی در زیر طبقات سنگین
هزارهٔ ۱ ق. م(مادها)	رواج طرح‌های تزئینی با خشت استفاده از گچ به‌عنوان ملات بین خشت‌ها در بعضی قسمت‌ها
هزارهٔ ۱ ق. م(پارس‌ها)	شواهدی دال بر ایزوله کردن خشت با استفاده از قیر ساخت خانه‌های مسکونی با فن جناقیشواهدی دال بر ساخت سقف‌های منحنی و گنبدی شکل اجرای سقف‌های مسطح با خشت‌هایی که از طول قرارگرفته‌اند. استفاده از خشت برای کف سازی بعضی از فضاها
هزارهٔ ۱ ق. م(پارت‌ها)	استفاده از سنگ برای پوشش حجم‌های خشتی در اواخر دورهٔ پارتی
ساسانی	استفاده از بلوک‌های منظّم گل رُس در حجم یک متر مکعب به عقیدهٔ آندره گدار ساخت گنبدهای خشتی نیز معمول بوده است، امّا همگی از بین رفته‌اند.

بین‌المللی حفاظت ساختمان‌های گلی در ایران (۱۹۷۲ و ۱۹۷۶) و سمپوزیوم سوم در آنکارا، از نخستین اقدامات عملی در این حوزه بودند (ماجدی اردکانی، ۱۳۸۳، ۱۴۸). پیرو این فعالیت‌ها، کلاس‌های آموزشی حرفه‌ای تحت عنوان PAT بین سال‌های ۱۹۸۹ تا ۱۹۹۹ برای مدیریت و حفاظت معماری خاکی برگزار شد. همچنین در سال ۱۹۸۹، پروژهٔ Gaia میان مرکز بین‌المللی ساختارهای خاکی گرنوبل (CRATERE) و ICCROM آغاز شد و نتایج آن در قالب مقالات علمی منتشر شد. در سال ۱۹۹۴، مرکز حفاظت و مرمت گتی (GCI) برنامه‌های آموزشی و پژوهشی خود را در زمینهٔ حفاظت از سازه‌های خاکی توسعه داد. از سال ۱۹۹۷، کنسرسیومی متشکل از مدرسهٔ معماری گرنوبل، مؤسسه حفاظت بنیاد گتی، بنیاد آقاخان، دانشگاه‌های مختلف اروپا و مؤسسات Terra، آرووِیل و دیگر مراکز، فعالیت‌های بین‌المللی در ترویج معماری گلین را پیش برده‌اند. حمایت سازمان‌هایی مانند یونسکو، ICCROM و ICOMOS نیز نقش مؤثری در این حوزه داشته است. مطالعات میدانی متعدد نشان داده‌اند که افزودن مواد مختلف به خشت و ملات گلی می‌تواند دوام و مقاومت مکانیکی آنها را بهبود بخشد. به‌عنوان مثال، ابراهیمی (۱۳۹۸) در چغازنبیل افزودن کاه، خاکستر شیره، آهک، ماسه رودخانه‌ای و پودر آجر به خاک محلی را برای افزایش دوام ملات گلی آزمود. استفاده از کاه به‌ویژه در خاک منطقهٔ اصفهان، ضریب وارفتگی خشت را کاهش می‌دهد و افزودن الیاف خرما به همراه سایر افزودنی‌ها، تثبیت و دوام خاک را افزایش می‌دهد (Esmaily & Ghalehnovi, 2012). باتر (۱۳۹۶) نشان داد که افزودن سه درصد وزنی کائولن با اندازه ذرات ۱۵۰ میکرون و ۳ درصد زئولیت با اندازهٔ ۴۵ میکرون، ضریب نفوذپذیری کاه‌گل را به ترتیب تا ۶۵ و ۸۵ درصد کاهش داده و خاصیت عایق‌بندی آن را بهبود می‌بخشد. نتایج این پژوهش نشان داد که کاهش اندازهٔ ذرات افزودنی، تأثیر مثبت بیشتری بر خواص فیزیکی و مکانیکی ملات دارد. مطالعات دیگر نیز به بررسی افزودنی‌های شیمیایی و معدنی پرداخته‌اند. نامور و زرینی (Namvar & Zeini, 2019) نشان دادند که ترکیب سیلیکات سدیم و اکریلیک، مقاومت فشاری، خمشی و رطوبتی کاه‌گل را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. حسینی کشتان (Hosseini Keshtan, 2019) با استفاده از زئولیت، میزان

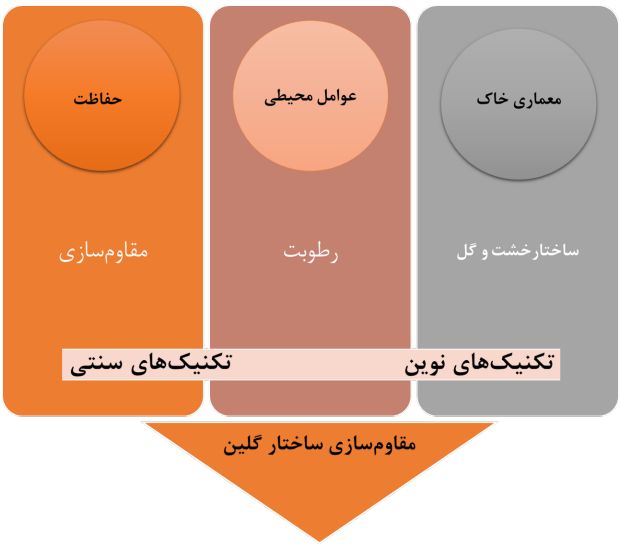
نفوذپذیری و فرسایش خشت را کاهش داد و میزان بهینهٔ آن را تعیین کرد. ابراهیمی (۱۳۹۸) نمونه‌های ارتقا یافته خشت و ملات گلی را با فرآورده‌های بوم‌آورد مورد آزمایش قرار داد و نشان داد که ضربه‌پذیری خشت‌ها تا ۳۴۲ درصد، تنش‌پذیری تا ۲۱۴ درصد و لغزش‌پذیری تا ۳۰۰ درصد افزایش می‌یابد. میرجلیلی (۱۴۰۱) گزارش کرد که الیاف پلی‌پروپیلن با چسبندگی سطحی بالا، مقاومت فشاری، کششی و خمشی خشت را افزایش می‌دهند. محمدی (۱۴۰۰) نیز نشان داد که افزودن ۰/۲۵ تا ۰/۵ درصد الیاف خرما بهترین عملکرد مکانیکی را ایجاد می‌کند، در حالی که افزودن آهک به‌تنهایی مقاومت فشاری پایینی به همراه دارد. حاجی رسولی (Hajirasouliha et al., 2024) نتیجه گرفت که خشت‌هایی با خاک ریزدانه و نسبت مناسب رس، مقاومت مکانیکی بیشتری نسبت به نمونه‌های با ذرات درشت دارند. اندازه و شکل ذرات و تناسب میان ذرات ریز و درشت، تأثیر مستقیم بر تخلخل، تراکم و مقاومت خشت در برابر جذب آب دارند. تحقیقات یتگین وهمکاران (Yetgin et al., 2008) نیز بیان می‌کنند که افزایش محتوای الیاف طبیعی مقاومت کششی و فشاری خشت را افزایش می‌دهد، اگرچه مقادیر بالای الیاف می‌تواند یکنواختی خشت را کاهش دهد.

مطالعات متعددی در زمینهٔ بهبود خواص خشت و محافظت از بناهای خشتی انجام شده است،کوالیارینی و لنچی (Quagliarini & Lenci, 2010) نشان داد که خاک رس بین ۱۲ تا ۱۶ درصد وزن و افزودن الیاف طبیعی (کاه) موجب کنترل رفتار پلاستیک خشت و کاهش ترک‌های خشک شدن می‌شود؛ همچنین افزودن تثبیت‌کننده، استحکام فشاری خشت را افزایش می‌دهد. آلاوز-رامیرس(Alavéz-Ramírez et al., 2012)، افزودن ۱۰ درصد آهک و ۱۰ درصد خاکستر باگاس نیشکر به بلوک‌های خشتی را برای افزایش دوام و مقاومت مکانیکی مؤثر دانست. میلوگ و همکاران (Millogo et al., 2014) نشان دادند که ۰/۲ تا ۰/۶ درصد وزنی الیاف ۳ سانتی‌متری هیبیسکوس و کانابینوس، منافذ خشت را کاهش داده و خواص مکانیکی را بهبود می‌بخشد، اما ۰/۸ درصد وزنی الیاف ۶ سانتی‌متری اثر منفی دارد کالاتان و همکاران (Calatan et al., 2016)، درصد بهینه الیاف کنف و کاه را به ترتیب ۹-۱۰٪ و ۳۰-۴۰٪ تعیین کردند. شارما (Sharma ,2015) با افزودن ۰/۵ تا ۲٪ الیاف Pinus roxburghii وGrewia optiva، پایداری خانه‌های خشتی را افزایش داد سیلوا و همکاران (Silva et al,2020) تأکید کردند که ترکیب رس و ماسه و افزودنی‌ها بر جذب مویرگی، نرخ خشک‌شدن و مقاومت مکانیکی خشت تأثیر دارد، اولیوریا (Oliveira,2021) نیز با بررسی افزودنی‌های طبیعی و مصنوعی، درصد بهینه و کارایی آنها را ارزیابی کرد اودرائوگو (Ouedraogo et al., 2023) افزودن پوستهٔ برنج تا ۱٪ وزنی به خشت‌های رسی را برای افزایش مقاومت فشاری، کاهش هدایت حرارتی و بهبود دوام در برابر فرسایش آب مؤثر دانست، میهیک (Brkanić Mihić, 2024) مطالعه‌ای در کرواسی شرقی انجام داد و ترکیب بهینهٔ خاک خشت را ۲/ ۲ درصد شن متوسط، ۹/ ۳۷ درصد ماسه، ۶/ ۴۹ درصد سیلت و ۱۰٪ رس گزارش کرد و میانگین رطوبت دیوارهای خشتی را مشخص ساخت. نتیجه‌گیری کلی پژوهش‌ها نشان می‌دهد که استفاده از افزودنی‌های سنتی و مدرن می‌تواند دوام و مقاومت خشت را بهبود دهد. بنابراین، ارزیابی، دسته‌بندی و مقایسهٔ این افزودنی‌ها برای انتخاب بهترین روش‌های سنتی و مدرن جهت مقاوم‌سازی مصالح بومی ضروری است.

مبانی نظری پژوهش

بخش عمده‌ای از بناهای تاریخی جهان با خشت، خاک و چینه ساخته شده‌اند و همواره تحت تأثیر شرایط محیطی در حال تخریب و فرسایش هستند. اهمیت حفاظت از این میراث فرهنگی بارها تأکید شده است. هدف این پژوهش، ارزیابی تکنیک‌های سنتی و مدرن برای جلوگیری از فرسایش ناشی از عوامل محیطی، به‌ویژه رطوبت، است، زیرا هر ساله بخش قابل توجهی از این سازه‌ها بر اثر نزولات جوی آسیب می‌بینند. پژوهش حاضر با تمرکز بر میراث معماری با ساختار گلین، متغیرهای فرادستی شامل معماری خاکی، عوامل محیطی و روش‌های حفاظت را مورد بررسی قرار می‌دهد و تلاش دارد فرسایش بناها را با اتخاذ راهکارهای حفاظتی کاهش دهد. در این راستا، مفاهیم عملیاتی پژوهش شامل مقاوم‌سازی بناها برای افزایش دوام و طول عمر، خشت به‌عنوان زیرمجموعه معماری خاکی و رطوبت به‌عنوان زیرمجموعه عوامل محیطی تعریف شده‌اند و تمامی این متغیرها از طریق سنجش تکنیک‌های سنتی و نوین حفاظت از بناهای تاریخی مورد بررسی قرار می‌گیرند (تصویر ۱).

یکی از عوامل تأثیرگذار محیطی بر فرسایش مجموعه‌های



تصویر ۱. متغیرهای مطرح شده در پژوهش. مأخذ: نگارندگان.

خشت و گلین رطوبت است، مقاوم‌سازی به مجموعه اقداماتی اطلاق می‌شود که توسط آن بتوان شاهد افزایش امنیت، قدرت و تعمیر و نوسازی سازه‌های موجود و آسیب‌دیده است، در تصویر ۲ مقاوم‌سازی رویکرد مرتبط با وجه عملی حوزهٔ مقاومت مورد نظر این پژوهش ارائه می‌شود.

• **آسیب‌شناسی ساختارهای گلین**

از جمله مهم‌ترین آسیب‌های وارد بر خشت می‌توان به آبشستگی اشاره کرد که تحت تأثیر باران و سیل، خواص مکانیکی و فیزیکی مصالح را تغییر داده و شکل بنا را دگرگون می‌کند. پوسته‌شدن و پودر شدن، ناشی از رطوبت طولانی‌مدت و ترک‌خوردگی، نتیجهٔ خشک و ترشدن مداوم مصالح و نوسانات رطوبت، از دیگر آسیب‌های مهم هستند که مقاومت بنا را کاهش می‌دهند. شورەزنی نیز در اثر جریان رطوبت و واکنش با نمک‌های محلول در خشت ایجاد می‌شود. انواع بافت‌های فرسایشی قابل مشاهده در خشت، شامل مواج، شیاری، رنده‌ای و اسفنجی، به ترتیب نمایانگر آبشستگی ملایم، آبشستگی شدید، تأثیر همزمان باد و باران و نیروی تخریبی باد همراه با ذرات ساینده هستند. خاک‌ها به‌طور طبیعی حاوی رطوبت هستند که موجب چسبندگی اجزای خاک می‌شود، اما در محیط‌های گرم و خشک، این رطوبت کاهش یافته و مصالح مستعد فرسایش می‌شوند. آسیب‌های وارده نشان‌دهندهٔ عدم تعادل ناشی از تأثیر عوامل مخرب است؛ این آسیب‌ها از تغییر شکل ظاهری مانند فرسایش و ترک آغاز شده و نهایتاً به کاهش مقاومت در برابر عوامل محیطی و انسانی منجر می‌شوند. پس از مداخلات حفاظتی، این عوامل می‌توانند روند فرسایش را متوقف کرده یا وضعیت بحرانی بنا را بهبود دهند. در این پژوهش، با تمرکز بر عوامل محیطی و به ویژه رطوبت، تلاش شده است تا میزان آسیب‌های محیطی و روش‌های مقاوم‌سازی در برابر انواع رطوبت سنجیده شود. براساس مطالعات انجام شده، رطوبت در ابنیهٔ تاریخی دارای خشت از عوامل متعددی ناشی می‌شود (جدول ۲).

• **افزودنی‌های سنتی و مدرن جهت تولید خشت**

در ایران و جهان، روش‌های متنوعی برای مقاوم‌سازی سازه‌های خشتی به‌صورت سنتی و مدرن به کار گرفته شده است. اصولاً هر نوع خاک را می‌توان با افزودن مواد مقاوم، بهینه کرد و بهترین نتیجه زمانی حاصل می‌شود که پیش از اجرای هر پروژهٔ حفاظتی، آزمون‌های لازم برای تعیین نوع خاک، انتخاب ماده مقاوم و مقدار مناسب آن انجام گیرد (Houben & Guillaud, 1994, 7). فرایند مقاوم‌سازی می‌تواند به‌صورت مکانیکی، شیمیایی یا فیزیکی انجام شود و خاک نیز با افزودنی‌های طبیعی و مصنوعی، در قالب مواد آلی و معدنی تقویت شود.

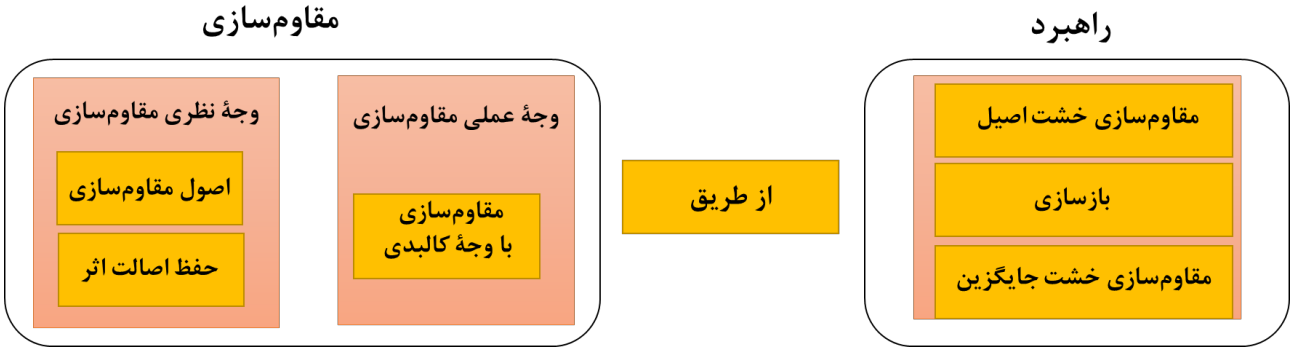
به انواع افزودنی‌ها از جمله افزودنی‌های طبیعی و مصنوعی اعم از آلی و معدنی پرداخته می‌شود تا به دنبال آن بتواند افزودنی‌های مورد سنجش در این پژوهش را مشخص شود (تصویر ۳).

• **افزودنی‌های طبیعی**

مواد افزودنی طبیعی به دو گروه آلی و معدنی تقسیم می‌شوند. اگرچه در سال‌های اخیر استفاده از مواد مصنوعی برای تحکیم و مقاوم‌سازی مصالح خاکی افزایش یافته است، اما به دلیل صرفه اقتصادی پایین، همواره تلاش می‌شود از مواد طبیعی تقویت‌کنندهٔ متناسب با بستر استفاده شود.

• **مواد افزودنی طبیعی معدنی**

استفاده از مواد معدنی در مصالح خاکی سابقهٔ طولانی دارد و اصلی‌ترین مواد برای مقاوم‌سازی و افزایش دوام در برابر رطوبت



تصویر ۲. دیاگرام رویکرد مرتبط با وجهٔ عملی حوزهٔ مقاومت. مأخذ: نگارندگان.

تصویر۳. دسته‌بندی‌های افزودنی‌های معرفی شده در این پژوهش. مأخذ: نگارندگان.

جدول ۲. عوامل مؤثر آسیب رسان در رابطه با ساختار خشتی. مأخذ: نگارندگان.

خواستگاه	بستر	نوع	نمود عوامل آسیب رسان
طبیعی	آب و هوا (اقلیم شناسی)	فیزیکی	دما(سرماو گرما)، رطوبت(آب‌های سطحی، سیل، باران، تگرگ)
	ریخت شناسی زمین(ژئومورفولوژی)	فیزیکی و مکانیکی	مواد و مصالح(کمیت و کیفیت، پیوند و ترکیبات و کیفیت مصالح)
	بوم‌شناسی (اکولوژی)	گیاهی	از کوچک مقیاس از جمله کپک و قارچ تا بزرگ مقیاس از جمله درختچه‌ها، علف و گیاه کوتاه، خالی شدن ناشی از ریشه درختان و رشد نباتات ، جلبک‌ها و انگل‌های گیاهی، قارچ، کپک و خزه، درختچه و درخت
		حیوانی(بیولوژیک، میکروبیولوژیک)	انواع جانوران از جمله موریانه و انواع حشرات، موجودات ریز و میکرو ارگانیزم، حشرات (موریانه ،کرم چوب،پروانه و...)، جانوران موذی (موش، مار و...)، پرندگان، حیوانات مثل سگ، فضولات حیوانات و ترکیب آنها با باران
انسانی	اجتماعی	فردی	عدم همکاری مالکان خصوصی جهت آباد سازی و حفظ، عدم مسئولیت پذیری و حساسیت(فراموشی)
		گروهی	اقدامات غیر قانونی خارج از چهارچوب در محوطهٔ تاریخی(مرمت‌های غیراصولی)
	اقتصادی	فردی	عدم مشارکت در بهره‌بری و حفظ
		جمعی	عدم به کارگیری چهارچوب مشخص برای رونق صنعت گردشگری، عدم به کارگیری بودجه برای حفظ، باززنده سازی و احیای قسمت‌های غیر خصوصی
	فرهنگی	فردی	دزدی از کتیبه‌های تاریخی
		جمعی	عدم تبلیغ از سوی نهادهای مدیریتی برای حفظ و تداوم فرهنگی در گذشته و حال
		پژوهشی (مطالعات)	همکاری با نهادهای علمی تخصصی در زمینهٔ حفاظت و مرمت بناهای تاریخی، مطالعات آزمایشگاهی، شرکت‌های خصوصی کارآمد
	مدیریتی	سیاست‌گذاری (مقررات و قوانین)	طرح و اجرای ضوابط و مقررات، قوانین و تفاهم‌نامه با نهادهای وابسته در مقیاس محله، شهر، منطقه، ملی، بین المللی برای حفظ و نگهداری
		عملیاتی (مداخله)	حمل و نقل و اواربرداری و به کارگیری آوار برای استحکام بخشی، مقاوم‌سازی و تولید مصالح،شیوه های اصولی حفاظت از این ساختار گلین، نگهداری و تعمیر اصولی

معمولاً از همین گروه هستند (Guillaud, 2011). شایع‌ترین افزودنی معدنی ماسه است که بر بسیاری از خواص فیزیکی و مکانیکی خاک، از جمله رنگ، بافت، مقاومت کششی، مقاومت فشاری و مقاومت در برابر سایش تأثیر می‌گذارد. توزیع و دانه‌بندی ماسه، شکل ذرات و نسبت آن با انواع رس، تأثیر قابل توجهی بر عملکرد خاک دارد. سایر مواد معدنی مانند سیمان، گچ و آهک نیز در مقاوم‌سازی مصالح خاکی کاربرد دارند، هرچند میزان استفاده و تأثیرات فیزیکی و شیمیایی آنها مورد بحث و نقد محققان است (Hosseini Keshtan, 2019, 74).

- **مواد افزودنی طبیعی آلی**

تحقیقات گسترده‌ای در زمینهٔ استفاده از افزودنی‌های آلی برای مقاوم‌سازی خاک در برابر رطوبت انجام شده است. شناخت این مواد به درک تاریخ و فرهنگ مناطق دارای معماری خاکی ارزشمند کمک می‌کند. با این حال، تنوع مواد و روش‌های آماده‌سازی آنها، شرایط خاص سایت و فنون تحلیلی متفاوت، ارزیابی و اقتباس آنها برای مداخلات حفاظتی را دشوار می‌سازد. افزودنی‌های طبیعی آلی شامل مکمل‌های فیبری مانند نی، کاه، مو، پشم حیوانات و چربی‌های گیاهی و حیوانی هستند و استفاده از آنها نه‌تنها جنبهٔ کاربردی دارد، بلکه بازتابی از رویکرد فلسفی و گرایش به سنت‌های محلی نیز محسوب می‌شود (Oliver, 2008).

- **افزودنی‌های آلی با منشأ حیوانی**

کاربرد محصولات حیوانی برای مقاوم‌سازی مصالح در برابر رطوبت سابقه‌ای طولانی دارد. محصولاتی مانند خون، ادرار، فضولات، کازئین و چسب حیوانی قرن‌ها برای افزایش دوام مصالح مورد استفاده قرار گرفته‌اند (مینکه، ۱۳۸۸، ۶۶). مهم‌ترین این افزودنی‌ها در جدول ۳ دسته‌بندی شده‌اند.

- **افزودنی‌های آلی طبیعی با منشاء گیاهی**

از جمله مهمترین الیاف در جهت بهبود مصالح خاکی به‌ویژه برای جلوگیری از ترک افزودنی‌های گیاهی نظیر الیاف گیاهی خورد شده است مواد افزودنی گیاهی شامل موارد زیر است (جدول۴).

اکثر افزودنی‌های آلی طبیعی با منشأ گیاهی در حفاظت از مصالح خاکی و خشت عمدتاً به‌صورت استر یا لایه رویی روی سطوح خاکی یا گچی مورد استفاده قرار می‌گیرند. به نظر می‌رسد که

تثبیت‌کننده‌های مایع با مواد جامد گیاهی، به جز الیاف با قابلیت انحلال کمتر، به‌ندرت به‌صورت ترکیب با خاک در فرایند تولید خشت و سایر مصالح خاکی به‌کار رفته‌اند و کاربرد آنها بیشتر در تقویت و استحکام‌بخشی سطوح خاکی، شامل سطوح ساده یا سطوح دارای نقاشی‌ها و نگاره‌ها، مشاهده می‌شود. روغن‌های گیاهی نیز عمدتاً به‌صورت چسب، بتونه یا رنگ کاربرد دارند و به جز موارد استفادهٔ سنتی، استفاده آزمایشی یا حفاظتی آنها معمول نیست. یکی از مطالعات بارز در این زمینه، تحقیق افشین ابراهیمی در سال ۱۳۹۸ است که به بررسی استفاده از بقایای گیاه نیشکر حاصل از تولید کارخانه‌های قند و شکر در ترکیب با لجن آهک پرداخته است. هدف این پژوهش، تثبیت و افزایش استحکام خشت و کاه‌گل در محوطهٔ تاریخی چغازنبیل بوده است و نشان می‌دهد که افزودن این مواد طبیعی می‌تواند دوام و مقاومت مصالح خاکی را بهبود بخشد.

- **افزودنی‌های طبیعی معدنی**

این دسته از مواد شامل انواع سنگ ریزه، شن و ماسه و موادی از این قبیل است که از دیر باز به‌عنوان پرکننده به مصالح ساختمانی همچون خشت و آجر اضافه می‌شده است (جدول۵).

جدول۳. منشأ حیوانی. مأخذ: نگارندگان.

منشأ	نام افزودنی	خاصیت
چربی و پیه حیوانات	روغن ماهی‌ها و چربی حیوانات	ضد آب کنندهٔ مواد و مصالح خشتی (ابراهیمی، ۱۳۹۸، ۳۰۴)
فضولات حیوانات	سرگین حیوانات، تپالهٔ گاو، فضولات چسب و الاغ	مقاوم‌کنندهٔ خاک و مصالح خاکی، افزایش مقاومت خیسی مصالح، افزایش چسبندگی
مواد پروتئینی و آلبومنی حیوانات	پروتئین آمینواسید(خون، چسب های حیوانی همچون سریشم، ژلاتین و کازئین)، پوست، استخوان و پی پسداندارن، کولاژن[۱]، ژلاتین[۲]، کازئین، بزاق موریانه، بزاق و مدفوع موریانه	افزایش سختی و مقاومت خاک، اصلاح خاک، تراکم ذرات خاک و افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک.افزایش میزان مواد آلی و مواد مغزی خاک (Pereira, 2011, 248)

جدول۴. منشأ گیاهی. مأخذ: نگارندگان.

منشأ	نام افزودنی	خاصیت
الیاف گیاهی	کاه گندم، جو و برنج، نی، بامبو خورد شده، الیاف نارگیل، برگ درختان سوزنی (Waaren, 2008, 102؛ مینکه، ۱۳۸۸، ۶۴). گیاه ذرت، چوب بلال، ساقهٔ پنبه، پوست برنج، ساقهٔ موز، الیاف نخل، برگ نارگیل و خورده‌های چوب (Pinto et al, 2012)، یونچه، کنف، سیسال[۳]، علف فیل[۴] (Bahobail, 2012, 27)، لویی(تقویت و تسلیح مصالح خاکی)، روناس(اردکان یزد)، الیاف درخت خرما، تفاله‌های باگاس، موی بز، پشم شتر، جو دو سر، کناف و کتان(Laborel, et al: 2016).	پیوند ذرات خاک، افزایش مقاومت کششی، تسطیح خاک و مصالح خاکی،تنظیم رطوبت بهینهٔ خاک، لاغر کردن خاک رس و کاهش میزان انقباض، سبک کردن خاک، تبدیل کردن به نوعی عایق حرارتی(ابراهیمی، ۱۳۹۸، ۲۹۵؛ Esmaily & Ghalehnovi, 2012, 55)، کاهش میزان ترک خوردگی، مقاوم در برابر رطوبت
لیزاب‌ها(شیرابه‌ها)، رزین‌ها و صمغ‌های گیاهی	پلی ساکارید، شیره کاکتوس آگاوه[۵]، رزین فیکوس[۶]، رزیم فرفیون[۷]، رزین اکالیپوس، رزین موز، رزین سندروس، رزین والابه[۸]، شلاک، صمغ عربی، رزین کراتونیا سیلیکوا[۹]، ایوفربیا لاکته آ[۱۰]، مازاپار دیسیکا[۱۱] (موز) و اپونتیا فیکوس ایندیکا[۱۲] (کاکتوس)	مقاوم‌سازی و تسطیح خاک، حل نشدن در آب، افزایش دوام، کاهش سرعت جذب آب
روغن گیاهی	چربی‌ها، روغن‌ها و صابون‌ها، از جمله روغن نارگیل، روغن بزرک و روغن پنبه دانه	آب‌بندی، مقاومت بیشتر خاک

جدول۵. افزودنی‌های طبیعی مصنوعی. مأخذ: نگارندگان.

نوع افزودنی	خاصیت
ماسه	مقاوم‌سازی خاک رسی، یکنواخت کردن دانه بندی، توزیع مناسب، ایجاد انسجام بهتر میان زرات، کاهی میزان انقباض خاک از ترک خوردن (Bahobail, 2012, 24).
ماسه بادی	مقاوم‌سازی خاک، بهبود رفتار انقباضی مصالح خاکی، کاهش میزان ترک خوردن (رحیم نیا و حیدری بنی، ۱۳۹۱، ۸۱).
سیلیس	رایج‌ترین افزودنی و پرکنندهٔ غیرزسی برای افزایش مقاومت خاک (قربانی و همکاران، ۱۳۹۱، ۵۰).
خاک رس	افزایش خواص مکانیکی و دوام خاک
پودر صدف‌ها و مرجان‌ها	منبع غنی از مواد اهکی برای مقاوم‌سازی خاک (ابراهیمی، ۱۳۹۸، ۳۰۴).
پوزولان طبیعی	حاوی سیلیس و آلومین[۱۳] مقاوم در مجاورت رطوبت

• افزودنی‌های مصنوعی معدنی

افزودنی‌های آلی مصنوعی در مصالح خاکی، این دسته از مواد افزودنی، که به‌عنوان افزودنی‌های مدرن شناخته می‌شوند، برای افزایش دوام و استحکام مصالح خاکی به‌کار می‌روند. از مزایای اصلی آنها می‌توان به ثبات طولانی‌مدت، کنترل ترکیب و جلوگیری از تغییر رنگ و بافت زودرس اشاره کرد (Avrami et al., 2008, 100). مواد آلی مصنوعی عمدتاً در سه حالت موجود هستند و شامل رزین‌های مصنوعی، پارافین‌ها، واکس‌ها و لاتکس‌ها می‌شوند که برای تثبیت سطوح خاکی به‌کار رفته‌اند. با این حال، کارایی آنها در حفاظت از معماری خاکی مورد بحث است، زیرا در برابر اشعه ماورای‌بنفش خورشید واکنش منفی نشان می‌دهند، قیمت بالایی دارند و می‌توانند مانع عبور بخار از ساختار خشت و اندود شوند. پلیمرهای مصنوعی با زنجیره‌های بلند، مانند مونومرها و کوپلیمرها (مینکه، ۱۳۸۸)، به‌دلیل اندازهٔ مولکولی بزرگ، نفوذ کافی در ریزمنافذ خشت و سطوح رس متورق را ندارند و فرایند پلیمریزاسیون آنها در محل به سختی رخ می‌دهد (Warren, 2008). با این حال، در تحقیقات آزمایشگاهی، اتیل سیلیکات به‌صورت اسپری روی سطوح خارجی دیوارهای بدون پوشش خاکی اعمال شد و نتایج در دو منطقهٔ نیومکزیکو و گرنویل فرانسه نشان داد که این ماده باعث کاهش فرسایش سطحی دیوارها شده است.از رایج‌ترین و موفق‌ترین افزودنی‌های آلی مصنوعی می‌توان به امولسیون‌های اکریلیک اشاره کرد که شامل کوپلیمرهای اتیل اکریلات، متیل متاکریلات یا اتیل متاکریلات رقیق شده هستند و در نسبت کمتر از ۱۵٪ برای جلوگیری از تغییرات نامطلوب نفوذپذیری بخار آب به کار می‌روند (Atzeni et al., 1993). این امولسیون‌ها اغلب به شکل چسب سطحی عمل می‌کنند و ذرات رس را به هم متصل می‌سازند، نه اینکه خاک را از طریق جذب تثبیت کنند (Hartzler, 1996). پلیمرهای وینیل مانند پلی‌وینیل استات و پلی‌وینیل الکل نیز برای تثبیت خاک به‌کار رفته‌اند، اما عمدتاً به‌عنوان لایهٔ پوششی و استحکام‌بخشی سطحی کاربرد دارند و رفتار متفاوتی در ملات و سایر مصالح خاکی نشان می‌دهند (Stefanson, 1973). تحقیقات دیگر، مانند مطالعات تیلور (۱۹۹۰)، کاربرد ترکیبات امولسیون قیر، رنگ‌های اکریلیک و نی را در تثبیت دیوارهای خشتی مقایسه کرده و محدودیت‌های کاربرد مواد آلی مصنوعی به تفاوت خاک و شرایط محیطی مشخص شده است. همچنین بررسی تترااکسی سیلان روی نمونه‌های ابوسیر مصر نشان داد که این ماده به‌عنوان تقویت‌کنندهٔ مؤثر عمل می‌کند (Warren, 2008). سایر مواد آلی مصنوعی شامل سیلآن‌ها، پلی‌سیلوکسان‌ها، رزین‌های سیلیکونی، سیلیکونات‌ها و سیلیکات استر با افزودنی‌های هیدروفوبیک هستند. از بین این مواد، سیلان، سیلوکسان‌ها و رزین‌های سیلیکونی با واکنش شیمیایی با مواد معدنی موجود در خاک، خاصیت ضدآب ایجاد کرده و میزان جذب رطوبت مصالح خاکی را تا ۹۰٪ کاهش می‌دهند، در جدول ۶ به معرفی انواع رزین ها پرداخته شده است.

• رزین‌های اکریلیک در حفاظت و مرمت

رزین‌های اکریلیک از جمله مهم‌ترین افزودنی‌های شیمیایی در حوزهٔ حفاظت و مرمت آثار تاریخی و سایر صنایع محسوب می‌شوند. متیل متاکریلات، اتیل متاکریلات، بوتیل متاکریلات و سیانتواکریلات‌ها مهم‌ترین گروه‌های این رزین‌ها هستند که با نام‌های تجاری متنوع در بازار عرضه می‌شوند. از جمله رزین‌های معروف و پرکاربرد می‌توان به پارالوئید، اکرلوئید و پریمال اشاره کرد. امولسیون‌های اکریلیک، پلیمرهایی با وزن مولکولی بالا هستند که ذرات کروی آنها در آب پراکنده شده و اندازهٔ این ذرات معمولاً بین ۰/۱ تا ۱ میکرون متغیر است. نمونه‌های مشهور شامل پریمال آسی ۳۳ و پریسال آسی ۶۳۴ هستند که کوپلیمرهایی از متیل متاکریلات و اتیل اکریلات می‌باشند. رزین‌های اکریلیک اغلب از دو نوع موتومر اصلی تشکیل شده‌اند: اسید اکریلیک و متاکریلات‌های مشتق از متاکریلیک اسید.

جدول۶. معرفی انواع رزین. مأخذ: نگارندگان.

نوع رزین	نام افزودنی	خاصیت
رزین‌های سلولزی	چسب‌های مختلف سلولزی (استات سلولز، نیترات سلولز[۱۴]، اتیل سلولز[۱۵]، متیل سلولز، کربوکسی متیل سلولز[۱۶]	مقاوم در برابر حلال‌ها، جهت استحکام بخشی و مقاوم‌سازی در برابر رطوبت
رزین های فورفورآلی[۱۷،۱۸]	الکل، استون، اوره[۱۹]، آنیلین[۲۰]، رزوسینول[۲۱]، فنل[۲۲]	
رزین آمینی	آمینو رزین‌ها[۲۳]، آمینو پلاستیک‌ها[۲۴]، رزین حاصل از واکنش آلیدها	
رزین های اکریلیک[۲۵]	ترموپلاستیک‌ها[۲۶]، کوپلیمر	شفافیت و مقاومت بالا در برابر عوامل آسیب رسان از جمله نور، گرما، عوامل جوی، دوام، ضد رطوبت کردن دیواره‌ها و بناهای تاریخی (بهادری، ۱۳۸۶، ۱۶۰)
رزین‌های وینیلیک	پلی وینیل الکل	ایجاد غشای انعطاف پذیری از تبخیر آب محلول در اطراف ذرات خاک

این رزین‌ها به‌طور معمول جزو گرماترم‌ها محسوب می‌شوند، اما با افزودن مواد ایجادکننده پیوند عرضی مانند دی‌آمین‌ها، پراکسیدها یا سیستم‌های اکسید-احیا مانند پرسولفات، می‌توان آنها را به رزین‌های گرماسخت تبدیل کرد. علاوه‌بر کاربرد آنها به‌عنوان تثبیت‌کننده و استحکام‌بخش مصالح تاریخی، می‌توان با اصلاح شاخه‌های زنجیری رزین‌ها، سیانو اکریلات‌ها تولید کرد که به‌دلیل غلظت پایین، قدرت چسبندگی بالا و سرعت گیرش سریع، در مرمت کاربرد گسترده‌ای دارند. رزین‌های اکریلیک به ویژه پلی متیل متاکریلات ساختار نامنظمی دارند و در صورت خلوص بالا، تا ۹۲٪ نور سفید را عبور می‌دهند و از شفافیت بسیار خوبی برخوردار هستند. این رزین‌ها مقاومت مناسبی در برابر پیری و اکسیداسیون دارند و تنها در دماهای بالاتر از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، دچار تجزیه حرارتی یا دی‌پلیمریزاسیون می‌شوند. مزیت دیگر رزین‌های اکریلیک، امکان ترکیب آنها با دیگر پلیمرها برای تولید پلیمرهای سفارشی با ویژگی‌های مورد نیاز است. برای مثال، افزودن اتیل اکریلات یا بوتیل متاکریلات به متیل متاکریلات، باعث افزایش مقاومت شیمیایی، سختی و مقاومت به سایش پلیمر نهایی می‌شود (بهادری، ۱۳۸۵، ۱۶۰).

• سنجش عملکردی روش‌های سنتی و مدرن مقاوم‌سازی خشت

مواد افزودنی آلی طبیعی از گذشته برای تثبیت و بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی مصالح خاکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. فراوانی منابع، هزینه پایین، دسترسی آسان، سهولت کاربرد و حفظ سنت‌های محلی، از مهم‌ترین دلایل ادامه استفاده از این مواد در معماری خاکی و خشت است. این مواد، با وجود مزایای متعدد، در برابر عوامل محیطی و بیولوژیک مانند رطوبت، قارچ‌ها، باکتری‌ها، حشرات و جوندگان آسیب‌پذیر هستند.به همین دلیل، رزین‌ها و چسب‌های مصنوعی به‌تدریج جایگزین مواد طبیعی شده‌اند. رزین‌های مصنوعی مقاومت بیشتری در برابر عوامل زیستی دارند و طول عمر آنها بیشتر است، اما مشکلاتی نیز دارند: دسترسی دشوار به محصولات وارداتی، هزینه بالا، نیاز به حامل‌ها و حلال‌ها، سمیت بالا و محدودیت کاربرد در مصالح داخلی خشت و خاک از جمله معایب آنهاست. علاوه‌بر این، استفاده از رزین‌ها معمولاً به‌صورت پوشش‌دهی سطحی است و برای حفظ خاصیت آب‌گریزی، نیاز به تجدید مداوم دارد. در کنار مواد آلی، افزودنی‌های معدنی نیز از دیرباز برای بهبود دانه‌بندی خاک و کاهش ترک‌خوردگی در هنگام خشک شدن مصالح مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این مواد طبیعی و مصنوعی با سهولت دسترسی و هزینهٔ پایین، نقش مهمی در افزایش دوام و کارایی خشت و مصالح خاکی ایفا کرده‌اند. استفاده از افزودنی‌ها، چه طبیعی و چه مصنوعی، در بلوک‌های خشتی و ملات‌های گلی، یکی از راهکارهای مؤثر برای بهبود خواص مکانیکی و کاهش ترک‌خوردگی است. به‌طور مثال، در ایران سنتی، استفاده از کاه، خرده‌چوب، الیاف خرما و آهک طبیعی برای مسلح کردن خشت و ملات مرسوم بوده و همچنان در مناطق روستایی ادامه دارد. این افزودنی‌ها علاوه‌بر ارزان بودن و در دسترس بودن، کاربری ساده‌ای دارند و اثرات محیطی و زیست‌محیطی کمتری نسبت به مواد غیرطبیعی مانند سیمان دارند.

• سنجش عملکردی روش‌های سنتی و مدرن مقاوم‌سازی خشت

از گذشته‌های دور، مواد افزودنی آلی طبیعی برای تثبیت و ارتقای خواص فیزیکی و مکانیکی خاک و مصالح خاکی کاربرد داشته‌اند. فراوانی منابع، قیمت اقتصادی مناسب، دسترسی آسان، سهولت به‌کارگیری و حفظ سنت‌های محلی و بومی، از مهم‌ترین دلایلی بوده که استفاده از این مواد را در طول زمان رایج و پایدار ساخته است. به همین دلیل، امروزه نیز این مواد مورد توجه هستند و استقبال عمومی از آنها ادامه دارد. با این حال، یکی از محدودیت‌های اساسی این دسته از افزودنی‌ها، آسیب‌پذیری بالای آنها در برابر عوامل محیطی و بیولوژیک است. میکروارگانیسم‌ها، قارچ‌ها، حشرات، جوندگان و سایر عوامل زیستی، به همراه شرایط محیطی مانند رطوبت، تور و باکتری‌ها می‌توانند باعث تخریب و پوسیدگی این مواد شوند. این مشکلات، به تدریج منجر به جایگزینی افزودنی‌های آلی مصنوعی، از جمله چسب‌ها و رزین‌ها، به جای مواد طبیعی شده است. رزین‌های مصنوعی نسبت به مواد آلی طبیعی دوام و ثبات بیشتری دارند و کمتر تحت تأثیر عوامل بیولوژیک قرار می‌گیرند. با این حال، استفاده از آنها با محدودیت‌هایی مواجه است. بیشتر رزین‌ها و چسب‌های تخصصی در حوزهٔ حفاظت میراث فرهنگی وارداتی هستند و دسترسی به آنها در شرایط تحریمی اخیر کشور دشوار شده است. علاوه‌بر این، قیمت بالای این مواد و نیاز به حجم زیاد برای مقاوم‌سازی بدنه آثار خشت و گلی، استفاده از آنها را در مقیاس وسیع غیرعملی و اقتصادی می‌کند. این رزین‌ها معمولاً به‌صورت پوشش سطحی به کار می‌روند و برای حفظ خاصیت آب‌گریزی نیاز به تجدید دوره‌ای دارند. از سوی دیگر، استفاده از حامل‌ها و حلال‌های آبی یا غیرآبی برای انتقال این مواد به لایه‌های داخلی خاک می‌تواند مشکلاتی ایجاد کند. نفوذ آب به داخل لایه‌های رسی ممکن است باعث تورم خاک شود؛ این موضوع به‌ویژه در رس‌های با مقادیر بالای کانی‌های رسی مانند مونتمورلونیت برجسته است. به همین دلیل، حلال‌های غیرآبی مانند هیدروکربن‌های سبک، الکل، استون و تولوئن مورد توجه قرار گرفته‌اند، اما به‌دلیل سمیت و قیمت بالا، محدودیت استفاده دارند. خود رزین‌های مصنوعی نیز در بسیاری موارد سمی هستند و می‌توانند علاوه‌بر آسیب به محیط‌زیست، سلامت انسان را نیز تهدید کنند. از دیگر افزودنی‌هایی که

از گذشته تاکنون برای بهبود خواص خاک و مصالح خاکی به کار رفته‌اند، مواد معدنی هستند. این مواد عمدتاً برای ایجاد دانه‌بندی مناسب و پر کردن فضاهای خالی خاک به کار می‌روند تا انقباض خاک کاهش یافته و از ترک‌خوردگی مصالح در هنگام خشک شدن جلوگیری شود. طیف گسترده‌ای از مواد معدنی طبیعی و مصنوعی، همواره برای این اهداف به کار گرفته شده‌اند. سهولت دسترسی و صرفهٔ اقتصادی، از مهم‌ترین مزایای آنهاست که باعث شده انسان‌ها از دیرباز به استفاده از آنها روی آورند. استفاده از افزودنی‌های طبیعی و مصنوعی در بلوک‌های خشتی یکی از روش‌های مؤثر برای بهبود خصوصیات مکانیکی این مصالح به شمار می‌رود. این روش قدمتی طولانی دارد و هنوز در مناطق روستایی ایران، از کاه برای مسلح کردن خشت و ملات‌های گلی شکننده استفاده می‌شود. اضافه کردن الیاف به خاک، به‌عنوان مسلح‌کننده، مانع انتشار ترک‌های کششی پس از شکل‌گیری اولیه می‌شود. بسیاری از افزودنی‌های طبیعی مانند کاه، خرده چوب، الیاف خرما و آهک معدنی، علاوه‌بر ارزان بودن، به‌راحتی در دسترس هستند و نیاز به فناوری پیچیده‌ای ندارند. همچنین این مواد نسبت به افزودنی‌های مصنوعی مانند سیمان، تأثیرات زیست‌محیطی کمتری بر جای می‌گذارند.

• تحلیل عملکرد راهکارهای سنتی و مدرن مقاوم‌سازی خشت

مطالعه منابع نشان می‌دهد که راهکارهای مقاوم‌سازی خشت را می‌توان به دو گروه اصلی سنتی و مدرن تقسیم‌بندی کرد. در روش‌های سنتی، تمرکز عمده بر بهبود ترکیب خاک با استفاده از الیاف گیاهی مانند کاه و الیاف خرما بوده است. همچنین، بهره‌گیری از اندودهای کاهگل، ساروج و گچ طبیعی برای محافظت از سطوح دیوار در برابر فرسایش و نفوذ رطوبت، یکی از رایج‌ترین تکنیک‌ها به شمار می‌آید. علاوه‌بر این، در معماری سنتی ایران، ضخامت زیاد دیوارها، به‌کارگیری پشت‌بندها و استفاده از قوس و طاق نقش مهمی در افزایش پایداری و دوام بناهای خشتی داشته است. در مقابل، روش‌های مدرن که در دهه‌های اخیر توسعه یافته‌اند، عملکرد بهتری در ارتقای مقاومت مکانیکی و دوام خشت نشان داده‌اند. افزودنی‌های شیمیایی مانند آهک، سیمان و نانوذرات، الیاف مصنوعی نظیر شیشه و پلی‌پروپیلن، و پوشش‌های آب‌گریز و رزین‌ها از مهم‌ترین ابزارهای این رویکرد هستند. در زمینهٔ مقاوم‌سازی لرزه‌ای نیز استفاده از کلاف‌های فولادی و چوبی، قاب‌های پنهان و تزریق دوغاب به‌عنوان روش‌های نوین برای افزایش ایمنی معرفی شده‌اند. روش‌های سنتی عمدتاً برپایهٔ مواد بومی و تجربیات معماران محلی شکل گرفته‌اند و در مناطق خشک و نیمه‌خشک عملکرد قابل قبولی داشته‌اند. با این حال، در برابر تهدیدات مدرن مانند زلزله، بارش شدید و تغییرات اقلیمی، محدودیت‌هایی از جمله ضعف مقاومت برشی و دوام پایین در مقابل رطوبت مشاهده می‌شود. روش‌های مدرن با استفاده از افزودنی‌های شیمیایی، الیاف مصنوعی، پوشش‌های ضدآب و تکنیک‌های کلاف‌بندی لرزه‌ای، توانسته‌اند مقاومت مکانیکی و دوام خشت را به شکل قابل توجهی افزایش دهند. این روش‌ها به‌ویژه در مناطق زلزله‌خیز و پروژه‌های حفاظت از بناهای ارزشمند کارآمدتر هستند. محدودیت اصلی آنها شامل هزینهٔ بالا، نیاز به تجهیزات پیشرفته و احتمال کاهش سازگاری با بافت تاریخی و محیط زیست است.تحلیل مقایسه‌ای نشان می‌دهد که بهترین عملکرد زمانی حاصل می‌شود که روش‌های سنتی و مدرن به‌صورت ترکیبی به‌کار گرفته شوند. این رویکرد امکان حفظ اصالت و هویت فرهنگی خشت را فراهم کرده و در عین حال دوام، ایمنی و سازگاری با شرایط اقلیمی را افزایش می‌دهد. بنابراین، مقاوم‌سازی مؤثر بناهای خشتی باید بر سه اصل پایداری فنی، سازگاری فرهنگی-زیباشناختی و صرفه اقتصادی استوار باشد. بررسی جامع عملکرد روش‌های سنتی و مدرن مقاوم‌سازی خشت نشان می‌دهد که هر یک از این رویکردها، بسته به شرایط محیطی، نوع پروژه و هدف مداخله، دارای ویژگی‌ها، مزایا و محدودیت‌های خاص خود هستند. انتخاب راهکار مناسب در این زمینه نیازمند تحلیل هم‌زمان عوامل محیطی، مصالح در دسترس، ملاحظات اقتصادی و اهداف حفاظتی است. روش‌های سنتی مقاوم‌سازی خشت، که شامل کاربرد پوشش‌های گلی، استفاده از ملات‌های آهکی، ایجاد سایه‌بان، روکش‌های کاه‌گل، و سایر تکنیک‌های طبیعی حفاظت سطحی می‌شوند، از لحاظ تاریخی به‌دلیل سازگاری کامل با محیط زیست، سهولت اجرا و هزینه پایین، جایگاه ویژه‌ای در معماری بومی و پایدار داشته‌اند. این روش‌ها اغلب بر پایه‌ی مصالح محلی و دانش تجربی نسل‌های متعدد شکل گرفته‌اند و به همین دلیل ضمن ارتقای پایداری سازه، ارزش‌های فرهنگی و هویتی منطقه را نیز بازتاب می‌دهند. با این حال، نتایج مطالعات تجربی و میدانی نشان می‌دهد که کارایی این روش‌ها در مواجهه با شرایط اقلیمی شدید، از جمله بارش‌های طولانی‌مدت، یخبندان‌های متوالی و نوسانات شدید دما محدود است. در چنین شرایطی، ساختار خشت دچار فرسایش سطحی، ترک‌خوردگی حرارتی و کاهش تدریجی مقاومت مکانیکی می‌شود و در نتیجه، نیاز به عملیات ترمیم و نگهداری دوره‌ای افزایش می‌یابد. علاوه‌بر آن، پوشش‌های سنتی غالباً در برابر نفوذ کامل آب مقاوم نیستند و نمی‌توانند دوام درازمدت خشت را در مناطق مرطوب تضمین کنند. با وجود این محدودیت‌ها، استفاده از شیوه‌های سنتی در بازسازی آثار تاریخی همچنان ترجیح داده می‌شود، چرا که این روش‌ها ضمن پایین نگاه داشتن

هزینه‌ها، اصالت معماری و ارزش‌های فرهنگی بنا را حفظ می‌کنند. در مقابل، روش‌های مدرن مقاوم‌سازی، که با تکیه بر یافته‌های علم مواد و فناوری‌های نوین توسعه یافته‌اند، شامل به‌کارگیری افزودنی‌های پلیمری، سیمان و آهک هیدرولیکی، الیاف طبیعی یا مصنوعی، و نانوذرات معدنی یا کربنی هستند. این افزودنی‌ها موجب بهبود قابل توجه در مقاومت مکانیکی، کاهش نفوذپذیری آب، افزایش فشردگی ساختار منافذ و پایداری حرارتی خشت می‌شوند. پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که الیاف مصنوعی و پلیمرها نقش مهمی در کاهش ترک‌های ناشی از تنش‌های مکانیکی و حرارتی ایفا می‌کنند، در حالی که نانوذرات و سیمان هیدرولیکی با پر کردن فضاهای خالی در ساختار خشت، میزان جذب رطوبت را کاهش داده و استحکام فشاری را افزایش می‌دهند. با این حال، اجرای این روش‌ها مستلزم دسترسی به فناوری‌های خاص، نیروی انسانی متخصص، آزمایشگاه‌های کنترل کیفیت و صرف هزینه‌های بیشتر است. همچنین، برخی از این افزودنی‌ها ممکن است با اصول معماری پایدار یا ملاحظات زیست‌محیطی هم‌خوانی کامل نداشته باشند. در مجموع، مقایسهٔ تحلیلی میان دو دسته روش نشان می‌دهد که ترکیب هوشمندانه‌ی تکنیک‌های سنتی و مدرن بهترین کارایی را از نظر دوام، اصالت و پایداری در بلندمدت فراهم می‌آورد. به‌کارگیری هم‌زمان پوشش‌های گلی و آهکی با افزودنی‌های پلیمری یا نانویی، می‌تواند ضمن حفظ هویت تاریخی و زیبایی‌شناسی خشت، مقاومت آن را در برابر رطوبت، فرسایش بادی، انقباض و انبساط حرارتی به‌طور چشمگیری افزایش دهد. این رویکرد تلفیقی به‌ویژه برای پروژه‌های مرمتی آثار تاریخی و سازه‌های خشت‌ساز در اقلیم‌های خشن و متغیر، کارآمدترین و متوازن‌ترین راهکار محسوب می‌شود. افزون بر این، نتایج تحلیل‌های اخیر پیشنهاد می‌کنند که پژوهش‌های آینده باید به تعیین «نسبت بهینهٔ ترکیب مصالح سنتی و افزودنی‌های مدرن» و بررسی اثر هر نوع افزودنی بر خواص فیزیکی و مکانیکی خشت در شرایط اقلیمی گوناگون بپردازند. چنین مطالعاتی می‌تواند مسیر توسعهٔ راهبردهای مقاوم‌سازی علمی، اقتصادی و پایدار را برای معماری سنتی و بازسازی آثار تاریخی هموار سازد (جدول۷).

نتیجه‌گیری

بررسی روش‌های سنتی و مدرن مقاوم‌سازی خشت در برابر تأثیرات محیطی نشان داد که هر یک از این رویکردها دارای مزایا و محدودیت‌های خاص خود هستند. روش‌های سنتی، شامل پوشش‌های گل و آهک، سایه‌بان‌ها و دیگر تکنیک‌های حفاظت طبیعی، ضمن سازگاری بالاتر با محیط زیست و حفظ ارزش‌های فرهنگی و تاریخی، مقاومت محدودی در برابر بارندگی، نفوذ رطوبت، یخبندان و تغییرات دمایی شدید ارائه می‌کنند. این محدودیت‌ها سبب می‌شوند که استفاده صرف از این روش‌ها برای محافظت کامل خشت در شرایط محیطی سخت کافی نباشد، اما از نظر اقتصادی و حفظ اصالت تاریخی همچنان گزینه‌ای ارزشمند محسوب می‌شوند. روش‌های مدرن، شامل افزودنی‌های پلیمری، سیمان و آهک هیدرولیکی، نانوذرات و الیاف مصنوعی، توانسته‌اند مقاومت مکانیکی خشت را افزایش داده، نفوذ آب را کاهش دهند و دوام آن را در طول زمان بهبود بخشند. به کمک این تکنیک‌ها، امکان ساخت و نگهداری سازه‌های خشت حتی در شرایط آب و هوایی شدید فراهم شده و طول عمر آنها به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. محدودیت اصلی این روش‌ها شامل هزینه بالاتر، پیچیدگی اجرایی و گاهی کاهش سازگاری زیست‌محیطی نسبت به مصالح سنتی است. تحلیل مقایسه‌ای نشان می‌دهد که تلفیق هوشمندانه روش‌های سنتی و مدرن می‌تواند بهترین نتیجه را ارائه دهد؛ به‌گونه‌ای که علاوه‌بر افزایش مقاومت و دوام خشت در برابر عوامل محیطی، ارزش‌های تاریخی و فرهنگی

جدول۷. ارزیابی SWOT راهکارهای سنتی و مدرن مقاوم‌سازی خشت. مأخذ: نگارندگان.

تهدیدها	فرصت‌ها	نقاط ضعف	نقاط قوت	روش مقاوم‌سازی
فرسایش و ترک خوردگی سریع در شرایط محیطی شدید، کاهش دوام سازه‌ای در طول زمان	استفاده در پروژه‌های باسازی بناهای تاریخی، حفظ اصالت معماری، توجه به دانش بومی، امکان آموزش و احیای مهارت‌های سنتی	مقاومت محدود در برابر رطوبت؛ بارش و یخبندان و طول عمر کمتر، نیاز به تعمیرات مکرر، مقاومت پایین در برابر زلزله، وابستگی به استادکاران ماهر	سازگاری بالا با محیط زیست، حفظ ارزش های تاریخی و فرهنگی، هزینه کم و سهولت اجرا،تجربه تاریخی و آزموده شده، امکان ترمیم آسان و سریع	سنتی(پوشش گل، آهک، سایبان)
هزینهٔ بالا و ..محدودیت اقتصادی، عدم تطابق با برخی سازه‌های تاریخی، استفاده ناآگاهانه از مواد شیمیایی و کمبود بودجه برای اجرا، ترس از زیر سؤال بردن اصالت خشت	مقاوم‌سازی خشت در شرایط محیطی شدید، امکان ترکیب با تکنیک‌های سنتی برای حفظ ارزش تاریخی، امکان حمایت نهادهای بین المللی، توسعهٔ فناوری نوین سازگار اب محیط زیست	هزینه و پیچیدگی اجرای بالا، گاهی کاهش سازگاری با محیط زیست و بافت تاریخی، نیاز به تجهیزات و نیروی متخصص، سختی ترمیم و بازگشت پذیری در صورت شکست روش	افزایش قابل توجه مقاومت مکانیکی، کاهش نفوذ آب و فرسایش، طول عمر بیشتر، امکان کنترل علمی و دقیق مواد، نیاز کمتر به مرمت مکرر و توجه به بعد اقتصادی، قابلیت انطباق با استانداردهای جهانی	مدرن(افزودنی های پلیمری، الیاف، نانو زرات، آهک هیدرولیکی)

سازه نیز حفظ شود. این رویکرد ترکیبی به ویژه در پروژه‌های بازسازی بناهای تاریخی و ساخت یا نگهداری ساختمان‌های خشت‌ساز در مناطق با شرایط محیطی شدید، بسیار مؤثر است. در مجموع، یافته‌های این مطالعه تأکید می‌کنند که به‌کارگیری مصالح مدرن همراه با تکنیک‌های سنتی، راهکاری پایدار، علمی و اقتصادی برای حفاظت از خشت و افزایش دوام سازه‌های تاریخی و نوین خشت‌ساز محسوب می‌شود.

پی‌نوشت‌ها

۱. Collagen(پروتئین ساختمانی متصل کننده بافت ها در حیوانات و ماهی‌ها)
۲. Gelatin(تهیه شده از خالص‌سازی چسب سریشم)
۳. Sisal
۴. Elephant grass
۵. Agave
۶. Ficus
۷. Euphoribia
۸. Wallaba resin
۹. Ceratonia siligua
۱۰. Euphorbia Lactea
۱۱. Musa paradisiaca
۱۲. Opuntia Ficus Indica
۱۳. ASTM C۶۱۸,۱۹۹۴
۱۴. Cellulose nitrate
۱۵. Ethyl Cellulose
۱۶. Carboxy Meythyl Cellulose
۱۷. ازمنابع تجدید پذیر مانند ضایعات کشاورزی و صنعتی، همچون زرت، پوسته برنج، پوسته بادام، باگاس، هسته زیتون، جو دوسر تهیه میگردد.
۱۸. Furfural
۱۹. Urea
۲۰. Resorcinol Furfura
۲۱. Phenol Furfural
۲۲. Amino-resins
۲۳. Amino plastic
۲۴. Acrylic resins
۲۵. در حفاظت ابنیه‌های تاریخی به ویژه فضای آزاد کاربرد دارد.

اعلام تعارض منافع

نویسندگان اعلام می کنند در انجام این پژوهش هیچ گونه تعارض منافعی برای ایشان وجود نداشته است.

فهرست‌منابع

• ابراهیمی، افشین. (۱۳۹۸). *ملات گلی غنی شده و خشت‌های نوین ارتقایافته با فرآورده‌های بوم‌آورد برای اقدامات حفاظتی ارگ بم* [رساله دکتری، دانشگاه هنر اصفهان]. http://library.aui.ac.ir/inventory/108/6056.htm

• باتر، مسعود. (۱۳۹۶). *بهبود خاصیت عایق‌بندی اندود کاهگل در مقابل رطوبت با استفاده از برخی افزودنی‌های سیلیکاتی میکرونیزه و نانومتری برای حفاظت بناهای تاریخی خشت و گلی* [پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه هنر اصفهان]. http://dlibrary.aui.ac.ir/parvan/resource/11908

• بهادری، رویا. (۱۳۸۶). شیمی آلی: *مبانی و کاربرد در حفاظت و مرمت آثار تاریخی*. پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی، فرهنگی. http://dlibrary.aui.ac.ir/parvan/resource/357729

• خوشبخت بهرامانی، شوکا و سپهری مقدم، منصور. (۱۳۹۱). ابنیهٔ خشتی مقاوم در برابر زلزله. هویت شهر، ۶(۱۱)، ۵۳-۶۲.

• دشتی زاده، سارا و گرکانی، امیرحسین. (۱۳۹۷). *تجارب استحکام بخشی مصالح خشتی*. سومین کنفرانس بین المللی عمران، معماری و طراحی شهری،تبریز.https://civilica.com/doc/805977

• رجبی، محبوبه. (۱۳۹۲). *بررسی روش‌های مقاوم‌سازی خشت و ساختارهای خشتی*. همایش ملی معماری، فرهنگ و مدیریت شهری، کرج. https://civilica.com/doc/256015

• رحیم نیا، رضا؛ حیدری بنی، داریوش. (۱۳۹۰). تأثیر دامنه خمیری خاک (PI)بر مقاومت کششی و فشاری خشت‌های تثبیت شده با سیمان برای استفاده در حفاظت از سازه‌های خشتی. *فصلنامهٔ علمی مرمت و معماری ایران*، ۱(۱۲)، ۹۱-۱۰۲. Https://doi.org/20.1001.1.23453850.1390.1.2.1.1

• قربانی، شعبانعلی؛ آشوری، محمدتقی و سر پولکی، حسین. (۱۳۹۱). *گل سلولزی*. دانشگاه هنر. http://profs.aui.ac.ir/Masters/default/?action

• ماجدی اردکانی، محمدحسین. (۱۳۸۳). *خرابی‌های متداول ساختمان های خشتی و روش مرمت آنها*. مجموعه مقالات سومین همایش حفاظت و مرمت آثار تاریخی و فرهنگی و تزئینات وابسته به معماری، ۱۴۸-۱۵۸. نشر اداره کل اموزش و انتشارات سازمان میراث فرهنگی کشور.https://sushiant.com/article/

• محمدی، حسین. (۱۴۰۰). *بررسی آزمایشگاهی امکان استفاده از آهک و الیاف خرما به منظور بهبود خواص خشت* [پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد].

• میرجلیلی، محمدرضا. (۱۴۰۱). *مطالعه خواص فیزیکی، مکانیکی خشت تقویت شده با الیاف نساجی* [پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد].https://yazd.ac.ir/people/sfattahi/Theses

• مینکه، گرنوت. (۱۳۸۸). *راهنمای ساخت و ساز با خاک کاربرد مصالح خاکی در معماری مدرن* (ترجمهٔ شاهین طلوع آشتیانی). اداره کل روابط عمومی سازمان میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری. http://library.aui.ac.ir/inventory/100/16488.htm

• مسرت، حسین. (۱۴۰۱). خشت در نگاه تاریخ. *معماری اقلیم گرم و خشک*، ۱۰(۱۵), ۲۴۵-۲۵۶. https://smb.yazd.ac.ir/article_2841.html?lang=fa

• Alavéz-Ramírez, R., Montes-García, P., Martínez-Reyes, J., Altamirano-Juárez, D. C., & Gochi-Ponce, Y. (2012). Evaluation of compressed earth blocks stabilized with linear alkaline agents applied to the soil. *Construction and Building Materials, 34*, 296–305. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.072

• Alva. balderrame. A. (2008). *Earthen architecture. Los Angeles: The Getty Conservation Institute*. (pp. 3). https://www.getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/adobe90.html

• Atzeni, C., Massidda, L., & Sanna, U. (1993).

Technological properties of earth-based construction materials treated with hydraulic cement or acrylic polymer. In Terra 93: 7th International Conference on the Study and Conservation of Earthen Architecture. DGEMN & CRATerre-EAG.

• Avrami, E., Guillaud, H., & Hardy, M. (2008). *Terra literature review: An overview of earthen architecture conservation*. Getty Conservation Institute.

• Bahobail, M. A. (2012). The mud additives and their effect on thermal conductivity of adobe bricks. *Journal of Engineering Science, Assuit University, 40*(1), 21-34.

• Brkanić Mihić, I., Kraus, I., Kaluđer, J., & Perić Fekete, A. (2024). Architectural features and soil properties of traditional rammed earth houses: Eastern Croatia case study. *Buildings, 14*(7), 2049. https://doi.org/10.3390/buildings14072049

• Calatan, G., Hegyi, A., Dico, C., & Mircea, C. (2016). Assessment of earth bricks quality using the ultrasonic pulse velocity. In *Proceedings of the 9th International Conference Interdisciplinarity in Engineering* (INTER-ENG 2015), 8–9 October 2015, Târgu Mureș, Romania (Procedia Technology, 22, 259–265). https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.01.077

• Calatana, G., Hegyi, A., Dico, C., & Mircea, C. (2016). Microstructural characterization of earthen construction materials. *Procedia Technology, 22*, 259–265. https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.01.077

• Esmaily, A., & Ghalehnovi, M. (2012). The in fluence of palm fibres and lime as natural stabilizer on the mechanical properties of adobe, (in environmental condition contain 35% of humidity). *JHRE, 31*(138), 53-62. http://jhre.ir/article-1-188-fa.html

• Guillaud, H. (2011). Introduction of theme 2. In *Terra Asia 2011: International Conference on Earthen Architecture in Asia* (pp. 148–150). CRATerre. https://archive.org/details/TerrAsia2011

• Hartzler, R. (1996). *Acrylic-modified earthen mortar: A program of investigation and laboratory research into acrylic-modified earthen mortar used at the prehistoric Pueblo sites*. Intermountain Cultural Resource Center.

• Houben, H., & Guillaud, H. (1994). *Earth construction: A comprehensive guide*. CRATerre–EAG.https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3129844

• Hajirasouliha, B., Kiani-DehKiani, G., Heidari, D., Emami, M. (2024). Analysis of the Effect of Soil Properties on the Mechanical Resistance of Historical Mud-Bricks of Yazd. *JRA, 10*(1), 145-166. https://doi.org/10.61882/jra.10.1.407

• Hosseini Keshtan, S. R. (2019). *Resistant Addobe in the face of Descending Moisture by using Zeolite for Conservation Approach in Historical Buildings (Case study is the Bilqis Historical City of Esfarayen)*, [Doctoral dissertation, University Art Isfahan]. Isfahan.

• Martínez-García, C., Martinez-Barrera, G., & Cruz-Yusta, M. (2020). *Advances in the stabilization of earthen construction materials with nanotechnology. Construction and Building Materials, 258,* 119570. https://doi.org/10.22052/jias.2024.252656.1185

• Millogo, Y., Morel, J.-C., Aubert, J.-E., & Ghavami, K. (2014). Experimental analysis of pressed adobe blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers. *Construction and Building Materials, 52*, 71–78. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.094

• Minke, G. (2000). *Earth Construction Handbook: The Building Material Earth in Modern Architecture*. WIT Press.

• Namvar, S., & Zeini, M. (2019). The Effect of Sodium Silicate and Acrylic on Physical and Mechanical Parameters of Thatch Mortar. *JHRE, 38*(168), 51-60. https://doi.org/10.22034/38.168.51

• Oliveira, D. V. de C. (2021). *Conservation of earth heritage: An approach for a new methodology* [Unpublished doctoral dissertation]. Universidade Nova de Lisboa.

• Oliver, A. (2008). *Terra literature review: An overview of research in earthen architecture conservation*. Getty Conservation Institute.

• Ouedraogo, M., Dao, K., Millogo, Y., Aubert, J.-E., Messan, A., Seynou, M., Zerbo, L., & Gomina, M. (2019). Physical, thermal and mechanical properties of adobes stabilized with fonio (Digitaria exilis) straw. *Journal of Building Engineering, 23*, 250–258.

• Pereira, H. N. (2011). Saliva de cupim: Recent Experiments with Termite Mound Soil and Termite Saliva as Stabilizers for Earthen Structures, In Terra 2008: *The 10th International Conference on theStudy and Conservation of Earthen Architectural Heritage*, (pp. 247-252). Getty Publications. https://ouci.dntb.gov.ua/en/works/7PkJABn9/

• Pinto, J., Cruz, D., Paiva, A., Pereira, S., Tavares, P., Fernandes, L., & Varum, H. (2012). Characterization of corn cob as a possible raw building material. *Construction and Building Materials, 34*, 28–33. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.014

• Quagliarini, E., & Lenci, S. (2010). The influence of natural stabilizers and natural fibres on the mechanical properties of ancient Roman adobe bricks. *Journal of Cultural Heritage, 11*(3), 309–314. https://doi.org/10.1016/j.culher.2009.11.011

• Sharma, V., Marwaha, B. M., Vinayak, H. K., & Gupta, S. M. (2015). Enhancing sustainability of rural adobe houses of hills by addition of vernacular fiber reinforcement. *International Journal of Sustainable Built Environment, 4*(2), 348–358. https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2015.07.002

• Silva, A., Oliveira, I., Silva, V., Mirão, J., & Faria, P. (2020). Vernacular Caramel's adobe masonry dwellings: Material characterization. *International Journal of Architectural Heritage*. https://doi.org/10.1080/15583058.2020.175134

• Stefanson, R. C. (1973). Polyvinyl alcohol as a stabilizer of surface soils. *Journal of Soil Science, 115*(6), 420-428.

• Warren, J. (2008). *Conservation of earth structures* (M. Vahdati, Trans.). Chapoal Publications. (Original work published 1998).

• Yetgin, Ş., Çavuş, O., & Çavdar, A. (2008). The effects of the fiber contents on the mechanic properties of the adobes. *Construction and Building Materials, 22*(3), 222–227. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.08.022

COPYRIGHTS
Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the Bagh-e Nazar Journal. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

نحوهٔ ارجاع به این مقاله:

پهلوان، سمیه و فدایی‌نژاد بهرامجردی، سمیه. (۱۴۰۵). ارزیابی راهکارهای سنتی و مدرن مقاوم‌سازی خشت در برابر عوامل محیطی. *باغ نظر*، ۲۳ (۱۵۶)، ۷-۲۰.

DOI: https://doi.org/10.22034/bagh.2026.567606.5964
URL: https://bagh-sj.com/article_243070.html