

تأثیر آهک بر بهینه‌سازی خشت خام در مقابل رطوبت

کاوه بهرام‌زاده*، علیرضا رازقی**، نجمه خاتون میری***

تاریخ دریافت مقاله:

۱۳۹۶/۱۲/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله:

۱۳۹۷/۰۳/۰۹

چکیده

۱۱۵

بناها، محوطه‌ها و آثار معماری خشتی تاریخی و باستانی متعدد و زیادی در ایران وجود دارد که پراکندگی آن‌ها بیشتر در مناطق گرم و کویری ایران به چشم می‌خورد اما در مناطق کوهستانی و بارانی نیز آثار گلی و خشتی فاخری وجود دارد که نیاز به حفاظت و مرمت دارند تا بتوان آن آثار را به همراه پیام‌های خفته در آن‌ها به نسل‌های آینده منتقل کرد. در مناطق کوهستانی و مناطق بارانی، رطوبت بالا و جمع شدن آب در پای دیوارها و در مناطق کویری و گرم نظیر سیستان بالا بودن سطح آب‌های سطحی عامل اصلی آسیب رسیدن به ساختارهای خشتی و دلیل اصلی تخریب بسیاری از آثار معماری خشتی هستند که لازم است برای جلوگیری از تخریب و فرسایش راهکاری مناسب و کاربردی پیدا کرد. بهینه‌سازی مصالح در حفاظت، مرمت و بازسازی بناهای خشتی در سرتاسر جهان یکی از روش‌های مناسب مرمتی برای این‌گونه بناها به‌شمار می‌رود. نظر به ویژگی‌های کالبدی و شرایط مکانی و محیطی هر بنا، مواد افزودنی مختلفی تا به امروز مورد آزمایش قرار گرفته و به‌کار برده شده‌اند. در این پژوهش آهک به‌عنوان ماده‌ای سنتی و بومی که در مناطق دارای رطوبت بالا و بارندگی‌های فصلی شدید و تعدادی از بناهای شمال و شمال غرب ایران نیز دارای اصالت کاربردی است به‌عنوان ماده بهینه‌ساز خشت مورد استفاده قرار گرفت. هدف پژوهش حاضر دستیابی به خشتی سازگار با محیطی با شرایط رطوبت بالا (اشباع خشت) و توأم با کیفیات فیزیکی مناسب و مقاومت نسبی در مقابل سایر نیروهای آسیب رسان است. به این منظور پنج نوع خشت با ترکیب‌ها ۰، ۲، ۵، ۷، و ۱۰ درصد از آهک ساخته شد و مورد آزمایش‌های مقاومت فشاری در شرایط خشک و اشباع، مقاومت سایشی، جذب مویینگی و مقاومت در برابر غوطه‌وری قرار گرفتند که نتیجه مطلوب و متناسب باهدف این پژوهش مربوط به خشت ساخته شده با ۲ درصد آهک بود.

کلمات کلیدی: خشت خام، آهک، بهینه‌سازی، مقاومت فشاری، جذب مویینگی، مقاومت سایشی، غوطه‌وری.

* کارشناس ارشد مرمت اشیای تاریخی و فرهنگی. kaveh.bahramzadeh@gmail.com

** دکترای معماری اسلامی - حفاظت و مرمت، عضو هیئت‌علمی دانشگاه هنر، تهران.

*** کارشناس ارشد حفاظت و مرمت اشیای فرهنگی و تاریخی، مربی و عضو هیئت‌علمی دانشگاه زابل.

مقاله حاضر از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد نویسنده مسئول با عنوان "حفاظت پیشگیرانه در محوطه‌های باستان‌شناسی خشتی (مطالعه موردی: سنجش پایداری ملات و خشت‌های بکار برده شده در محوطه قلعه باستانی زیویه جهت ارائه راهکارهای حفاظتی)" در دانشگاه هنر، به راهنمایی آقای دکتر علی رضا رازقی استخراج شده است.

مقدمه

اهمیت و ارزش بناها و محوطه‌های تاریخی حفاظت‌گران را بر آن داشته است که همواره در جهت حفظ آن‌ها هر ساله طرح‌ها و برنامه‌های حفاظتی و مرمتی متعددی را پی‌ریزی کنند، چرا که حفظ این یادمان‌ها حفظ یک فرهنگ، تمدن، و میراث یک قوم و ملت است.

برای یک بنای خشتی عوامل آسیب رسان متعددی وجود دارد که همواره تهدیدی برای کالبد آن به‌شمار می‌روند. رطوبت یکی از عوامل اصلی آسیب رسان به بناهای خشتی است که می‌تواند مستقل یا در ارتباط با عوامل دیگر آسیب‌های جبران‌ناپذیری به این نوع بناها وارد آورد.

برای حل مشکل تثبیت خشت‌های مرمتی و کاهش آسیب‌پذیری آن‌ها در مقابل عوامل آسیب‌رسان محیطی، در سال‌های اخیر مطالعات زیادی از سوی محققانی چون نوان‌کور سال ۲۰۰۸، گریس یانگ یو چنگ سال ۲۰۰۹ و سیلویا بریکولی باتی و الناکینکویین سال ۲۰۱۱ در خارج از کشور و علیرضا اسماعیلی و منصور قلعه‌نوی سال ۱۳۹۱، رضا رحیم‌نیا و داریوش حیدری‌بنی سال ۱۳۹۰ و معین اسلامی سال ۱۳۸۹ در داخل ایران صورت گرفته است. این محققان از روش‌ها و افزودنی‌های متعددی برای بهینه‌سازی برخی ویژگی‌های خشت خام در مرمت برخی بناهای تاریخی بهره گرفته‌اند.

نزولات جوی فصلی و جمع شدن آب در پای دیوارهای خشتی در مناطق شمالی و غربی کشور (قلعه زیویه، ساختارهای خشتی تخت سلیمان و ...) و بالا بودن سطح آب‌های سطحی در مناطق شرقی کشور از جمله منطقه سیستان که دارای بناهای خشتی فراوان از دوره‌های مختلف تاریخی می‌باشد (قلعه رستم، قلعه مچی، دهانه غلامان و ...) عامل اصلی فرسایش و

تخریب دیوارهای گلی و خشتی در ارتفاع پایین دیوارها بوده که در نهایت منجر به ریزش کامل آن‌ها می‌گردد. لازم است در بازسازی‌ها و مرمت‌های حفاظتی که منجر به بازسازی قسمت کمبود و فرسایش یافته در پای دیوارهای بناهای آسیب دیده می‌گردد از خشتی استفاده شود که دارای مقاومت بالا در شرایط اشباع رطوبتی باشد تا دچار فرسایش و تخریب نشده و در نهایت موجب حفظ ساختار خشتی گردد.

هدف اصلی این پژوهش دستیابی به خشتی مقاوم در مقابل رطوبت است که علاوه بر بهینه کردن این ویژگی از خشت، بایسته است مقاومت فیزیکی آنرا نیز حفظ کرده که بتوان این خشت‌ها را در حفاظت و مرمت بناهای خشتی در حال فرسایش و تخریب، به کار برد.

حال این سؤال مطرح می‌شود که آیا می‌توان با افزودن آهک (ماده‌ای سنتی و جاذب و مقاوم در مقابل رطوبت) به خاک علاوه بر بالا بردن مقاومت در برابر رطوبت، مقاومت فیزیکی این خشت‌ها را در مقابل نیروهای فشاری و سایشی حفظ کرد؟

به دلیل چسبندگی پایین و اتصال ضعیف بین آهک و خاک در محیط‌های باز و رطوبت پایین فرض پژوهش بر آن است که احتمال می‌رود با اضافه کردن درصدی پایینی از آهک به خاک بتوان به نتیجه مطلوب‌تری دست یافت.

مبانی نظری و پیشینه تحقیق

از آنجا که همگن بودن مصالح مرمتی با مصالح اصلی بنا یکی از قوانین ثبت شده در منشورهای حفاظتی است^۱، در فرایندهای حفاظتی و مرمتی سعی بر استفاده از مواد طبیعی و سنتی است، لیکن بهره‌مندی از فناوری روز به‌نحوی که در سازگاری و هماهنگی لازم و کافی با کیفیات تاریخی و سنتی اثر و مصالح آن قرار داشته باشد و منجر به خدشه نگردد نیز براساس همان

۰.۵٪ سیمان و ۰.۷٪ آهک فقط مخلوط با خاک رضایت بخش بوده و به عنوان نمونه‌های برتر معرفی شدند (Ying Yu Chen, 2009).

بریکولی و همکاران در مقاله خود در سال ۲۰۱۱ به استفاده از درصدهای مختلف گچ (۱۰٪ و ۲۰٪) و افزودن الیاف طبیعی نظیر کتان، پنبه، پشم و ... جهت بهبود خصوصیات مکانیکی مصالح گلی پرداخته‌اند و نتایج نشان می‌دهد که هر دو روش استفاده از پودر گچ و الیاف طبیعی برای افزایش خواص مکانیکی خاک و کاهش میزان انقباض مفید است، همچنین پودر گچ دوام و مقاومت مصالح گلی را در مقابل آب بالا می‌برد (Briccoli et al, 2011: 124-130).

معین اسلامی در پایان‌نامه کارشناسی ارشد خود از دانشگاه هنر اصفهان به تأثیرات درصدهای مختلفی از افزودنی‌هایی نظیر کائولن، بنتونیت و ماسه به خاک آواری بناهای تاریخی شهر توس بر ویژگی‌های فیزیکی و رفتاری خاک اشاره کرده است و به این نتیجه رسیده که استفاده به جا از کانی‌های رسی (مثلاً ۱۰ درصد بنتونیت) می‌تواند در بهینه‌سازی خاک محل بدون استفاده از پلیمرهای مصنوعی نقش مهمی ایفا کند، به‌خصوص در برگرداندن خواص پلاستیک و دوام خاک نامرغوب بسیار مؤثر عمل می‌کند (اسلامی، ۱۳۸۹).

رضا رحیم نیا و داریوش حیدری بنی در مقاله‌ای مشترک در نشریه مرمت و معماری دانشگاه هنر اصفهان به تأثیر افزودن درصدهای مختلف سیمان (۰٪، ۰.۵٪ و ۱.۰٪) بر دامنه خمیری و در نهایت مقاومت کششی و فشاری چهار نوع خاک از منابع خاک اصفهان، فردوس، میبد و یزد اشاره کرده‌اند و نتیجه آن به این صورت می‌باشد که در خاک‌های با دامنه خمیری بالاتر از ۱۰٪ استفاده از ۱.۰٪ سیمان نتایج مطلوب و مؤثری را ایجاد نموده و مقاومت فشاری بالا می‌رود. این افزایش

منشورها و قوانین حفاظتی بلامانع بوده و حتی استفاده اصولی از آن‌ها می‌تواند منجر به ارتقای سطح کیفی فرایند حفاظت و مرمت گردد. برای ساخت خشت‌های مرمتی سازگار با شرایط محیطی و کالبدی یک بنا، روش‌ها و مواد افزودنی و تثبیت‌کننده‌های متعددی می‌توان انتخاب کرد، اما آنچه که بیشتر از هر ویژگی دیگر یک ماده افزودنی یا روش ساخت مصالح، مدنظر حفاظتگران و مرمتگران است، سنتی بودن یا بومی بودن آن ماده و نیز حفظ اصالت در ساخت مصالح مرمتی می‌باشد (وارن، ۱۳۸۷: ۲۳۳). آنچنان که امروزه مواد شیمیایی و غیرطبیعی جدیدی ساخته شده‌اند که می‌توانند نتیجه مطلوبی داشته باشند اما بالا بودن هزینه این مواد، محدودیت در استفاده، تهیه سخت و عدم سازگاری، از دلایل عدم استفاده از این گونه مواد می‌باشند.

تحقیقات زیادی بر روی خشت‌های بهینه‌سازی شده برای بناهای خشتی انجام شده است از جمله این تحقیقات می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

نون کور در مقاله خود اشاره‌ای دارد به افزودنی‌های آلی نظیر سبوس برنج و نی و افزودنی‌های معدنی نظیر آهک و سیمان برای استحکام بخشی خشت. نتیجه حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که نمونه‌ای با ترکیبات "۲/۵٪ آهک + ۲/۵٪ سیمان + ۳۰٪ سبوس برنج + ۶۵٪ خاک" نتایج رضایت بخش تری را در آزمایش‌ها نشان داده است (Nwankwor, 2008: 239-246).

گریس یانگ یو چنگ در پایان‌نامه کارشناسی ارشد خود به درصدهای مختلفی از آهک و سیمان به عنوان تثبیت‌کننده به این شکل اشاره کرده است: ۰.۵٪ سیمان، ۱.۰٪ سیمان، ۰.۵٪ سیمان همراه با ۰.۵٪ آهک، ۰.۷٪ آهک همراه با ماسه، ۰.۷٪ آهک فقط مخلوط با خاک و ۱.۰٪ آهک همراه با ماسه. پس از انجام آزمایش‌ها فیزیک خشت، نتایج حاصل از دو نمونه با ۰.۵٪ آهک همراه با

مقاومت در دامنه خمیری بالاتر از ۱۵ به حد اعلائی خود رسیده، ولی در دامنه خمیری کمتر از ۱۰ نتایج رضایت بخش نبوده است. با افزودن سیمان نیز در تمام خاک‌ها، هم با ۵٪ و هم با ۱۰٪ سیمان، مقاومت کششی به شکل چشم‌گیری افزایش یافته و نتایج رضایت بخش می‌باشد (رحیم نیا و همکاران، ۱۳۹۰: ۹۱-۱۰۲).

علیرضا اسماعیلی و منصور قلعه‌نوی در مقاله‌ای از ۱٪ الیاف نخل خرما و درصد‌های متفاوت آهک (۱٪، ۳٪، ۷٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪) برای تثبیت خشت استفاده کرده‌اند و بهترین نتیجه در بررسی خصوصیات مکانیکی آن‌ها نظیر مقاومت فشاری مربوط به خشت با ترکیب ۱٪ الیاف نخل خرما، ۱۵٪ آهک، ۵۰٪ رس و ۳۴٪ ماسه بود (اسماعیلی و همکاران، ۱۳۹۱: ۵۳-۶۲).

در این پژوهش با توجه به سنت استفاده از آهک در مصالح بناهای مختلف در سراسر کشور و حتی جهان، سهولت در تهیه، قیمت مناسب و نیز با توجه به خصوصیات شیمیایی و فیزیکی آهک در جذب و مقاومت در برابر رطوبت، استفاده از درصد‌های مختلفی از آهک برای ساخت خشت‌های مرمتی مقاوم در برابر رطوبت در دستور کار قرار گرفت تا ضمن تلاش برای دستیابی به هدف اصلی پژوهش بتوان نتیجه آن را کاربردی کرده و در حفاظت و مرمت بناهای خشتی از آن استفاده نمود.

روش تحقیق

انجام این پژوهش مبتنی بر روش علمی- تجربی بوده و نتیجه آن کاربردی می‌باشد. برای گردآوری اطلاعات از روش‌های مطالعات میدانی و تجربی و ابزارهای آزمایشگاهی بهره گرفته شده که تأثیر درصد‌های مختلف آهک بر مقاومت خشت‌ها در مقابل رطوبت توأمان با تغییرات مقاومت فیزیکی اندازه‌گیری شده است.

برای این پژوهش کارگاه مرمت قلعه زیویه در استان کردستان انتخاب گردید. قلعه زیویه بنایی سه‌طبقه بوده در ۴۰ کیلومتری شرق شهرستان سقز قرار دارد و زمانی به‌عنوان پایتخت مان‌نایی‌ها مورد استفاده قرار گرفته است (سرفراز و همکاران ۱۳۸۱: ۹۲) که دیوارهای این قلعه از خشت خام ساخته شده و اندازه خشت‌های آن ۱۴*۶*۶ سانتی‌متر می‌باشد که در سه رنگ نخودی، قرمز و خاکستری دیده می‌شوند (Vatandoust et al, 2011: 30).

ابتدا از سه نوع خاک که فراوانی بیشتری در منطقه دارند نمونه‌گیری به عمل آمد و سپس ۵ ترکیب یکسان از این خاک‌ها آماده شد که ۴ ترکیب آن با درصد‌های ۲، ۵، ۷ و ۱۰ درصد آهک مخلوط شد و یک ترکیب نیز به‌عنوان نمونه شاهد و مبنا برای مقایسه تغییرات نمونه‌ها، بدون آهک افزوده در نظر گرفته شد. به هر کدام از این ۵ ترکیب به میزان یکسان کاه و ماسه بادی اضافه گردید و پس از مخلوط و آماده کردن کل این ترکیبات از هر نمونه تعدادی خشت در اندازه‌های ۵×۵×۵ سانتی‌متر ساخته شده و پس از خشک شدن^۲ به‌طور تصادفی از هر نمونه ترکیب ۸ عدد خشت (مجموعاً ۴۰ عدد خشت) برای ۴ آزمایش مقاومت فشاری، مقاومت سایشی، جذب مویینگی (و مقاومت فشاری پس از اشباع) و مقاومت در مقابل غوطه‌وری تهیه شد. برای هر آزمایش از هر نمونه خشت دو عدد مورد آزمون قرار گرفته و سپس میانگین آن‌ها به‌عنوان نتیجه ثبت گردیده است. در واقع این آزمایش‌ها را می‌توان به دو دسته آزمایش‌های تعیین مقاومت فیزیکی (آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت سایشی) و تعیین مقاومت در برابر رطوبت (آزمایش‌های جذب مویینگی و مقاومت در برابر غوطه‌وری) تقسیم کرد.

ابزارهای جمع‌آوری اطلاعات

در این پژوهش برای کسب نتایج لازم جهت دستیابی به هدف و بررسی فرض موجود در پژوهش از آزمایش‌های متعددی بهره گرفته شده است.

آزمایش تعیین مقاومت فشاری: منظور، آن تنش فشاری است که نمونه استوانه‌ای یا مکعبی شکل خشت (خشک و اشباع) را در شرایط یکسان تحت بارگذاری ساده به گسیختگی برساند (حیدریان، ۱۳۹۰: ۱۴۳).

آزمایش دوم آزمایش مقاومت سایشی به منظور سنجش میزان مقاومت خشت‌ها در برابر نیروی سایشی (نظیر باد همراه با گرد و خاک و شن‌های روان در طبیعت): این آزمایش طبق دستورالعمل اجرایی مقاله آقای حسینی سیر در "نهمین اجلاس بین‌المللی مطالعه و حفاظت معماری خشتی" انجام گرفته است (حسینی سیر، ۱۳۸۲: ۹۹).

آزمایش جذب مویینگی: نشان دهنده جاذبه بین مولکول‌های مشابه و غیرمشابه است و موجب صعود مایع (آب) در لوله‌ها یا فیبریل‌های کوچک، یا تر شدن جامد به وسیله مایع می‌شود (Teutonico, 1988: 43).

آزمایش غوطه‌وری در آب: در این آزمایش هرکدام از نمونه‌ها در ظرفی مجزا و مشابه قرار گرفته و کاملاً در آب غوطه‌ور می‌شوند. این آزمون به منظور اندازه‌گیری میزان زمان لازم تخریب کامل نمونه پس از غوطه‌وری در آب است و در واقع میزان مقاومت خشت در مقابل غوطه‌ور شدن در آب سنجیده می‌شود (Degirmenci, 2008: 28).

تمامی دستورالعمل‌های آزمایش‌های ذکر شده براساس منابع مکتوب (کتاب و مقالات) پس از حصول اطمینان از صحت آن‌ها، مورد بهره‌برداری قرار گرفته است.

روش انجام مطالعات آزمایشگاهی

برای ساخت خشت‌های مطالعاتی از سه نمونه خاک با فراوانی زیاد در منطقه نمونه برداری شده و پس از کد گذاری، از هرکدام ۳ پیمانه و از کاه و ماسه بادی نیز

هرکدام ۳ پیمانه باهم مخلوط شده و سپس درصدهای مختلفی از آهک به این ترکیبات اضافه گردید و ترکیبات نهایی مطابق جدول شماره ۱ کد گذاری شد.^۳

کد نمونه	ترکیب ثابت	(میزان آهک)
Z.RA/91-01	$S_1^3 + S_2^3 + S_3^3 + \text{کاه}^3 + \text{ماسه}^3$	۰
Z.RA/91-02	$S_1^3 + S_2^3 + S_3^3 + \text{کاه}^3 + \text{ماسه}^3$	۲٪
Z.RA/91-03	$S_1^3 + S_2^3 + S_3^3 + \text{کاه}^3 + \text{ماسه}^3$	۵٪
Z.RA/91-04	$S_1^3 + S_2^3 + S_3^3 + \text{کاه}^3 + \text{ماسه}^3$	۷٪
Z.RA/91-05	$S_1^3 + S_2^3 + S_3^3 + \text{کاه}^3 + \text{ماسه}^3$	۱۰٪

Z مخفف کلمه Ziwiyeh (زیویه)، R مخفف کلمه Restoration (مرمت)، A مخفف کلمه Adobe (خشت خام)، S1، S2 و S3 کد خاک‌های انتخابی، ۹۱ سال ساخت نمونه، ۰۱ تا ۰۵ شماره کد نمونه.

ج ۱. ترکیب‌های انتخاب شده برای ساخت خشت‌ها.

پس از آماده کردن ترکیبات و ساخت خشت‌ها در ابعاد ۵×۵×۵ سانتی‌متر آزمایش‌ها به ترتیب زیر روی نمونه‌ها انجام گرفت.

در آزمون مقاومت فشاری از دستگاه سنجش مقاومت فشاری تک محور موجود در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شریف استفاده گردید. نمونه‌های مکعبی با سطوح صاف و یکدست بین دو صفحه فلزی دستگاه قرار گرفته و نیروی عمودی ۱ میلی‌متر بر دقیقه بر نمونه‌ها وارد شد (تصویر شماره ۱). آزمایش تا زمانی که نمونه شکست و عقبه نیروسنج در جهت مخالف شروع به برگشتن کرد، ادامه داشت و بیشینه نیروی وارد شده به نمونه، توسط دستگاه به‌عنوان آستانه تحمل و مقاومت در برابر فشار ثبت شد. میزان استقامت نمونه در برابر تغییر شکل نیز توسط شاخص ویژه‌ای به‌عنوان عدد کرنش، ثبت گردید.

در آزمون مقاومت سایشی ابتدا نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند تا کاملاً خشک شدند. سپس با ترازویی با دقت ۰/۰۱ گرم، وزن شدند (M1) و به‌وسیله سنباده P80 که به سطح

صاف یک تخته چوبی چسبانده شده است، ۹۰ بار در یک جهت روی نمونه مکعبی کشیده شدند و پس از اتمام آزمایش دوباره نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌متر خشک شده و دوباره وزن شدند (M2). اختلاف وزن اول و دوم نمونه (M1- M2) میزان فرسایش وزنی آن را نشان می‌دهد. در این آزمایش به تعداد نمونه‌ها، تکه سنباده‌های یک اندازه و با درجه زبری یکسان تهیه گردید و برای هر نمونه فقط یک تکه از سنباده استفاده شد. قالبی گچی به وزن ۳۰۰ گرم نیز روی تخته‌های چوبی نصب شد تا از نیروی دست برای وارد کردن فشار عمودی استفاده نشود و میزان نیرو با حداقل خطا در طول آزمون ثابت باشد (تصویر شماره ۲).



ت ۱. آزمایش مقاومت فشاری به وسیله دستگاه تک محور.



ت ۲. آزمون مقاومت سایشی.

برای آزمایش جذب مویینگی نمونه خشت‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد در اون قرار داده شد تا رطوبت آن بخار شود و کاملاً خشت گردد. سپس خشت‌ها در دسیکاتور خنک شدند (به مدت نیم ساعت تا ۱ ساعت). پس از آن کف یک سینی یک تکه ابر به ضخامت ۱ سانتی‌متر و پارچه‌ای نخی روی آن قرار داده شد و به‌اندازه ضخامت ابر به سینی آب مقطر اضافه شد خشت‌ها به فاصله زمانی ۱۰ ثانیه پشت سر هم داخل سینی روی ابر قرار گرفته و به فاصله‌های زمانی معین شده برای این آزمایش، ارتفاع آب بالا آمده در خشت‌ها اندازه گرفته شد (تصویر شماره ۳). لازم است که هر چند دقیقه دوباره به سینی آب مقطر اضافه گردد تا آب جذب شده در نمونه‌ها جبران شود. این کار تا زمان بالا آمدن آب در چهار وجه خشت و اشباع کامل ادامه یافت و زمان نهایی ثبت گردید. پس از این آزمون و پس از اشباع کامل نمونه‌های خشت، روی آن‌ها آزمون مقاومت فشاری انجام پذیرفت تا مقاومت در مقابل فشار نمونه‌های خیس نیز اندازه گیری گردد.



ت ۳. آزمون مویینگی.

در آزمون مقاومت در برابر غوطه‌وری تعدادی بشر شیشه‌ای ۱ لیتری، تهیه شده و به هرکدام از آن‌ها

جدول شماره ۳ نتیجه مقاومت فشاری روی نمونه‌های خیس که در مرحله مویبگی اشباع گردیده‌اند، نشان داده شده که نمونه بدون آهک شماره ۱ و نمونه شماره ۵ (۱۰ درصد آهک) به دلیل ناپایداری و سستی بالا قابلیت انجام آزمون را نداشتند اما نمونه شماره ۲ با ۲ درصد آهک مقاومت قابل قبولی داشته و میزان کرنش آن نیز بیشتر از نمونه خشک آن شده است.

کد نمونه	میزان آهک (%)	مقاومت فشاری (Kg/Cm ²)	میزان کرنش Cm
Z.RMb/91-01	۰	۹/۷۸	۰/۰۳۳
Z.RMb/91-02	۲	۳/۸۴	۰/۱۹۸
Z.RMb/91-03	۵	۱/۲	۰/۲۴۱
Z.RMb/91-04	۷	۰/۷۸	۰/۴۰۶
Z.RMb/91-05	۱۰	۰/۴۲	۰/۵۴۱

ج ۲. نتایج آزمون مقاومت فشاری خشت‌های حفاظتی (نمونه‌های خشک).

کد نمونه	میزان آهک (%)	مقاومت فشاری (Kg/Cm ²)	میزان کرنش Cm
Z.RMb/91-01	۰	-	-
Z.RMb/91-02	۲	۱/۰۲	۰/۱۱۳
Z.RMb/91-03	۵	۰/۲۳	۰/۰۹۸
Z.RMb/91-04	۷	۰/۱۱	۰/۰۴۵
Z.RMb/91-05	۱۰	-	-

ج ۳. نتایج آزمون مقاومت فشاری خشت‌های حفاظتی (نمونه‌های اشباع یا خیس).

در آزمایش سنجش مقاومت سایشی خشت شماره ۱ کم‌ترین میزان تخریب را داشت و بعد از آن خشت شماره ۲ با اختلافی ناچیز با خشت شماره ۱ مقاومت بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها از خود نشان داد. جدول شماره ۴ نشان می‌دهد که با بالا رفتن میزان آهک مقاومت سایشی خشت‌ها به شدت پایین آمده است به طوری که نمونه شماره ۴ پس از ۵۰ بار و نمونه شماره ۵ پس از ۲۰ بار کشیدن سنباده کاملاً تخریب شدند.

در نمودار شماره ۱ نتیجه آزمایش میزان جذب مویبگی ثبت گردیده است که نشان می‌دهد نمونه شماره ۱ و شماره ۲ دارای میزان جذب مویبگی نزدیک به هم هستند. همان گونه که در نمودار نیز مشاهده

۸۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه شد و سپس نمونه خشت‌ها به بشرها منتقل شدند. در فاصله‌های زمانی یکسان میزان تخریب نمونه‌ها به صورت کیفی بررسی شده و نتایج به صورتی که در این جدول دیده می‌شود، ثبت گردید. یکسان بودن شرایط برای همه نمونه‌ها شرط اصلی صحت این آزمون است، لذا انتخاب ظرف، حجم آن و سایر ویژگی‌ها بر عهده پژوهشگر می‌باشد اما بهتر آن است که در این آزمون نمونه کاملاً در آب غرق شده باشد و میزان این آب برای همه نمونه‌ها مساوی باشد (تصویر شماره ۴).



ت ۴. آزمایش غوطه‌وری (نمونه شماره ۱ و ۲).

یافته‌ها

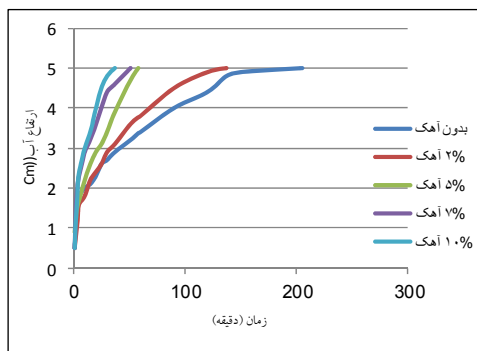
در پژوهش حاضر داده‌های حاصل از آزمایش‌های انجام شده به صورت کمی و کمی-کیفی ثبت گردیده و نتایج نهایی در هر آزمایش، از طریق مقایسه نتیجه هر نمونه در هر آزمایش حاصل شده است.

آزمایش سنجش مقاومت فشاری نشان داد که خشت شماره ۱ که میزان آهک آن صفر بود بیشترین مقاومت را از خود نشان داد و بعد از آن خشت شماره ۲ که دارای ۲ درصد آهک بود بیشترین مقاومت را داشت. در جدول شماره ۲ میزان مقاومت فشاری برای هر نمونه نشان داده شده و نیز میزان کرنش (تغییر شکل نمونه‌ها تا لحظه شکستن) هر نمونه ثبت گردیده است که بیشترین میزان کرنش از آن نمونه حاوی ۱۰ درصد آهک است. در

می‌شود شیب خط نمودار نمونه‌های شماره ۱ و ۲ نسبت به سه نمونه دیگر خیلی کم است و در مقایسه با سایر نمونه‌ها زمان بیشتری طول کشید تا اشباع شوند.

کد نمونه	وزن قبل از آزمون gr	وزن بعد از آزمون gr	میزان تخریب %
Z.RMb/91-01	162/25	158/87	2/083%
Z.RMb/91-02	165	156/68	5/042%
Z.RMb/91-03	142/8	57/63	59/978%
Z.RMb/91-04	137/93	تخریب کامل پس از ۵۰ بار	100%
Z.RMb/91-05	139/41	تخریب کامل پس از ۲۰ بار	100%

ج ۴. نتایج آزمون مقاومت سایشی خشت‌ها.



ن ۱. نتایج آزمون مقاومت سایشی خشت‌ها.

کد نمونه	زمان	۱ ساعت	۲ ساعت	۴ ساعت	۶ ساعت	۱۲ ساعت	۲۴ ساعت	۴۸ ساعت	۹۶ ساعت	۱۹۲ ساعت
Z.RMb/91-01										
Z.RMb/91-02										
Z.RMb/91-03										
Z.RMb/91-04										
Z.RMb/91-05										

میزان تخریب	افکت
بدون تخریب	
آغاز تخریب به شکل ریزش	
بالای ۱۰ درصد تخریب	
بالای ۳۰ درصد تخریب	
بالای ۷۰ درصد تخریب	
تخریب کامل	
خروج نمونه از محیط آزمایش	

ج ۵. نتایج آزمون غوطه‌وری براساس میزان تخریب در زمان بندی‌های ذکر شده. نتایج براساس مشاهده و به‌صورت کیفی می‌باشد.

طبق نتیجه چهار آزمایش قبلی که ذکر شدند نمونه شماره ۱ از لحاظ مقاومت در مقابل نیروی فشاری (در حالت خشک)، سایشی و جذب مویینگی نتیجه مطلوب‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها داشت هرچند که اختلاف نمونه شماره ۱ با شماره ۲ در هر سه آزمایش بسیار ناچیز بود اما در آزمون مقاومت فشاری نمونه خیس (نتیجه در جدول شماره ۳) و مقاومت در مقابل غوطه‌وری در آب، نتیجه به‌گونه‌ای دیگر است. همان‌طور که در جدول شماره ۵ دیده می‌شود نمونه‌های شماره ۱ و ۵ سریع‌تر از سایر نمونه‌های دیگر تخریب شده و از محیط آزمایش خارج شده‌اند. برای این آزمایش بهترین نتیجه مربوط به خشت شماره ۲ است که پس از گذشت ۳ هفته (البته در جدول شماره ۵ فقط ۸ روز از این آزمایش لحاظ شده است) بدون تخریب در محیط آزمایش باقی ماند.

بار استاتیکی برای دیواری به طول ۱۰ متر، ارتفاع ۶ متر و عرض ۴۶ سانتی متر به صورت زیر محاسبه گردید.

ارتفاع دیوار ۶ متری فرضی مشتمل بر ۵۲۵ سانتی متر خشت شماره ۲ به چگالی $\frac{9F}{cm^3}$ ۱.۷۹ و ۷۵ سانتی متر ملاتی به چگالی $\frac{9F}{cm^3}$ ۱.۶۸ است.

$$\gamma = 1.79 \frac{9F}{cm^3} \rightarrow \gamma = 1790 \frac{Kg}{m^3} \quad \text{چگالی خشت}$$

$$\gamma = 1.68 \frac{9F}{cm^3} \rightarrow \gamma = 1680 \frac{Kg}{m^3} \quad \text{چگالی ملات}$$

$$5.23 \times 0.46 \times 10 = 24.15 m^3 \quad \text{حجم خشت دیوار}$$

$$24.15 \times 1790 = 43228.5 Kg \quad \text{وزن خشت دیوار}$$

$$0.75 \times 0.46 \times 10 = 3.45 m^3 \quad \text{حجم ملات دیوار}$$

$$3.45 \times 1680 = 6175.5 Kg \quad \text{وزن ملات دیوار}$$

$$43228.5 + 6175.5 = 49404 Kg \quad \text{وزن کل دیوار}$$

$$\frac{49404}{0.46 \times 10} = 10740 \frac{Kg}{m^2} \quad \text{میزان بار استاتیکی}$$

$$1.074 \frac{Kg}{cm^2}$$

از آنجا که در حفاظت و مرمت دیوارهای خشتی، خشت‌های مرمتی نقش پرکننده قسمت‌های کمبود در پای دیوارها را دارند و عملاً به عنوان دیوار باربر به کار گرفته نمی‌شوند، پس حداکثر میزان باری که بر هر سانتی متر مربع در دیوار فرضی وارد می‌شود $1/0.74$ کیلوگرم است که میزان مقاومت فشاری خشت شماره ۲ در حالت خشک تقریباً چهار برابر و در حالت خیس تقریباً برابر این مقدار می‌باشد. پس از نظر تحمل بار استاتیکی نیز نتیجه پژوهش، کاربردی است.

نتیجه

۱. نتایج حاصله نشان می‌دهد که اثر آهک بر مقاومت فیزیکی خشت معکوس بوده، به گونه‌ای که با افزایش میزان آهک در ترکیبات آماده شده در این پژوهش به میزان چشمگیری مقاومت فشاری و مقاومت سایشی آن‌ها کاهش یافته و خشت در مقابل این نیروها ضعیف‌تر شده است چراکه آهک منجر به کاهش اتصال و چسبندگی بین ذرات تشکیل دهنده خشت خام می‌شود. ۲. براساس آزمایش مویینگی، افزایش میزان آهک در

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌های صورت گرفته که در بخش‌های قبل ذکر و شرح آن‌ها گذشت، نتایج حاصل از دو آزمایش سنجش مقاومت فشاری و مقاومت سایشی که به منظور سنجش میزان مقاومت فیزیکی نمونه‌ها صورت گرفت، نشان داد که افزایش آهک موجب پایین آمدن مقاومت فیزیکی نمونه‌ها شده است. بیشترین مقاومت مربوط به نمونه شماره ۱ بود که میزان آهک آن صفر است. پس از آن با بالا رفتن میزان آهک در ترکیب نمونه‌ها مقاومت فیزیکی آن‌ها کاهش یافت. با این وجود نتیجه مربوط به نمونه شماره ۲ که ۲ درصد آهک دارد نشان می‌دهد که این نمونه به مقدار خیلی کم دچار افت در مقاومت فیزیکی شده است و اختلاف آن با نمونه بدون آهک (نمونه شماره ۱) قابل تأمل است و اختلاف مقاومت آن با سایر نمونه‌های آهک‌دار بسیار زیاد است.

در آزمون سنجش میزان جذب مویینگی نیز نتایج مشابه به نتایج دو آزمایش قبلی است و اختلاف نتایج آزمایش برای دو نمونه شماره ۱ و ۲ کاملاً ناچیز و اختلاف این دو نمونه با سایر نمونه‌ها چشمگیر است. اما نمونه شماره ۲ در آزمایش سنجش میزان مقاومت فشاری در حالت خیس، دارای مقاومت فشاری قابل قبول بود و همچنین در آزمون مقاومت غوطه‌وری در آب نتیجه بسیار مطلوبی از خود نشان داد به طوری که پس از گذشت ۳ هفته آسیبی در این نمونه به چشم نخورد، اما برای سایر نمونه‌ها مخصوصاً نمونه شماره ۱ و ۵ نتایج نشان دهنده مقاومت پایین آن‌ها در مقابل رطوبت و غوطه‌ور شدن در آب بود. در نتایج دو آزمایش مقاومت فشاری در حالت خشک و خیس این بحث وجود دارد که خشت شماره ۲ با میزان ۲ درصد آهک که مقاومت فشاری آن در حالت خشک تا حدودی نسبت به خشت شماره ۱ کاهش یافته و در حالت خیس به یک چهارم حالت خشک خود می‌رسد آیا می‌تواند بار استاتیکی دیوار حاصله (دیوار حفاظتی ساخته شده از این خشت) را تحمل کند؟ به همین منظور میزان

ترکیب خشت‌ها سرعت جذب مویینگی را افزایش داده و همین خصوصیت آهک منجر به این امر می‌شود که به جهت استفاده از خشت‌های مرمتی دارای آهک در بازسازی پای دیوارها، آب‌های سطحی و رطوبت بیشتر جذب آن‌ها گردیده و ساختار اصلی دیوارها کمتر آب جذب کرده و این یک راهکار آرمانی برای حفاظت از دیوارهای خشتی است.

۳. براساس آزمون مقاومت فشاری نمونه خشت‌های خیس و مقاومت غوطه‌وری، این نتیجه حاصل شد که فقط ۲ درصد آهک افزوده، مقاومت فیزیکی خشت خام را به شکل چشمگیری در مقایسه با سایر نمونه‌ها حفظ می‌کند. ۴. از بین نمونه خشت‌های مورد آزمایش، نمونه شماره ۲ که دارای ۲ درصد آهک افزوده می‌باشد با توجه به جمع‌بندی نتایج حاصله از آزمون‌های صورت گرفته و با توجه به هدف پژوهش به‌عنوان برترین نمونه بهینه‌سازی شده ارزیابی گردید.

پی‌نوشت

۱. در سند نارا که بعد از قطع‌نامه و نیز به‌عنوان مکمل این قطع‌نامه شناخته شده است از اصالت در مداخلات مرمتی سخن به میان آمده است که اشاره مفصلی دارد به اصالت در کاربرد مواد حفاظتی و مرمتی در بناهای تاریخی (فیلدن و همکاران، ۱۳۸۸: ۱۵۳-۱۵۴).
۲. نحوه خشک کردن خشت‌ها به این گونه است: پس از ساخت خشت‌ها در فضای باز، روی آن‌ها گونی کشیده و روی آن کاه و مقداری خاک ریخته شد. با این کار نوعی سایه برای خشت‌ها فراهم گردید تا در سایه خشک شوند و هر ۲ روز یک بار روی پوشش آماده شده آب ریخته شد تا رطوبت به فضای زیر پوشش رسیده و محیطی مرطوب برای خشت‌ها فراهم آید، چرا که جذب آهک در ترکیب خشت‌های ساخته شده، نیاز به یک محیط مرطوب دارد. این کار به مدت ۲۱ روز ادامه یافت و یک هفته نیز خشت‌ها در سایه و بدون رطوبت، کامل خشک شدند.
۳. در خلال متن پژوهش از هرکدام از نمونه‌ها با عنوان‌های نمونه‌های شماره ۴، ۳، ۲، ۱ و ۵ نام برده شده و از ذکر کد کامل نمونه خودداری شده است.

فهرست منابع

- اسلامی، معین. (۱۳۸۹)، بررسی نقش کانی‌های رسی در رفتارشناسی مصالح خاکی به‌کار رفته در شهر تاریخی توس و

ارائه راهکارهای حفاظتی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مرمت اشیاء تاریخی و فرهنگی، دانشگاه هنر اصفهان.

- اسماعیلی، علیرضا؛ قلعه‌نویی، منصور. (۱۳۹۱)، اثر الیاف خرما و آهک به‌عنوان تثبیت‌کننده طبیعی، بر خصوصیات مکانیکی خشت (در شرایط محیطی ۳۵ درصد رطوبت)، نشریه مسکن و محیط روستا، شماره ۱۳۸، ص ۵۳-۶۲.

- حسینی سیر، حسین. (۱۳۸۲)، مطالعه نقش افزودنی‌ها برای مقاوم سازی ملات گلی در برابر رفتار مختلف رطوبتی در مجموعه تاریخی چغازنبیل: ۱- انتخاب خاک برای ساخت ملات گلی مقاوم. نهمین اجلاس بین‌المللی مطالعه و حفاظت معماری خشتی، یزد: ص ۹۶-۱۱۵.

- حیدریان، هومن. (۱۳۹۰)، روش‌های استاندارد آزمون‌های آزمایشگاه مکانیک خاک (براساس استانداردهای ASTM 2000). جلد اول و دوم، چاپ دوم، شیراز: آوند اندیشه.

- 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. دانشگاه هنر اصفهان. نشریه علمی-پژوهشی مرمت آثار و بافت‌های تاریخی-فرهنگی، شماره ۱، ص ۹۱-۱۰۲.

- سرفراز، علی‌اکبر؛ فیروزمندی، بهمن. (۱۳۸۱)، باستان‌شناسی و هنر دوران تاریخی ماد، هخامنشی، اشکانی، ساسانی، تهران: عفاف. فیلدن، برنارد. م.؛ یوکیلتو، یوکا. (۱۳۸۸)، راهنمای مدیریت برای محوطه‌های میراث جهانی، ترجمه پرویز حناچی، چاپ دوم، تهران: دانشگاه تهران.

- وارن، جان. (۱۳۸۷)، حفاظت از سازه‌های گلین. ترجمه مهرداد وحدتی، چاپ اول، تهران: رسانه پرداز با همکاری موسسه فرهنگی ایکوموس ایران.

-Briccoli, Bati.Silvia & Cinquina, Elena (2011). Earth Building Material: Stabilization And Reinforcement. Terra, PP 124-130.

-Degirmenci, N (2008). The using of waste phosphogypsum and natural gypsum in adobe stabilization construction and building. MATERIALS, PP 1220-1224.

-Nwankwor, N. A (2008). Justification for the Combination of Organic and Inorganic Stabilizers to Stabilize Traditional Earth Materials (Mud) for Quality and Capacity Utilization in Africa. Terra, PP 239-246.

-Teutonico, Jeanne Marie (1988). A Laboratory manual for architectural Conservators. Rome, ICCROM.

-Vatandoust,Rasool. Hadian Dehkordi,manijeh. Abdollahi,Parisa & S.Madahi.Farah (2011). Development of earthen architecture in Iran, Terra, PP 27-39.