Knowledge of Conservation and Restoration
www.journal.richt.ir
Original Article

Characterization of Restorative Mortars for Application in The Pasargadae World Heritage Site

Parsa Pahlavan[*1], Hamid Fadaei[2], Stefania Manzi[3], Maria Chiara Bignozzi[4]

1. Assistant professor, Department of Architecture and Urbanism, Faculty of Architecture and Urbanism, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
2. Academic personnel, Department of Conservation and Restoration, Research Institute of Cultural Heritage, Tehran, Iran
3. Assistant Professor, Department of Civil, Chemical, Environmental, and Materials Engineering (DICAM), School of Engineering, University of Bologna, Bologna, Italy
4. Associate Professor, Department of Civil, Chemical, Environmental, and Materials Engineering (DICAM), School of Engineering, University of Bologna, Bologna, Italy

Vol. 3, No. 1, Spring 2020

Received: 2020/04/28

Accepted: 2020/06/30

DOI:

Coresponding Aythor
Parsa Pahlavan, Assistant professor, Department of Architecture and Urbanism, Faculty of Architecture and Urbanism, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran,
Email: parsa.pahlavan@um.ac.ir

Abstract

In this study, considerations for design, characterization, and in-situ application of sustainable materials for restorative use in the Pasargadae world heritage site are discussed. Based on some prior studies on sustainable waste-based restorative mortars, air lime mortars were made from lime putty, mixture of stones from the site, and additive sesame oils. The mortar samples were characterized in terms of microstructure, carbonation rate, hydric properties, and durability. The characterization aimed at compatibility assessment of mortars with a real situation. Considering the variety of natural conditions parameters compared to the laboratory, the mortar samples were also characterized in the site conditions. The results suggested the laboratory characterization, if done properly, can provide a promising degree of representation for the field conditions.

Keywords: Restorative material, Compatibility, Sustainability, Reversibility, Cultural heritage

Copyright © 2020,Knowledge of Conservation and Restoration. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-noncommercial 4.0. International License which permits copy and redistribute the material just in noncommercial usages, provided the original work is properly cited

فصلنامهٔ تخصصی دانش حفاظت و مرمت
سال سوم، شمارهٔ یک، بهار ۱۳۹۹
مقاله پژوهشی
www.journal.richt.ir

طراحی، سنجش و اجرای ملات‌های مرمتی پایدار به‌منظور استفاده در مجموعهٔ جهانی پاسارگاد

پارسا پهلوان*[۱]، حمید فدایی[۲]، استفانیا منتزی[۳]، ماریا کیارا بینیوزی[۴]

۱. استادیار گروه معماری و شهرسازی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۲. عضو هیات علمی پژوهشکده حفاظت و مرمت، پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری، تهران، ایران
۳. استادیار گروه عمران، شیمی، محیط زیست و متریال، دانشکده مهندسی، دانشگاه بلونیا، ایتالیا
۴. دانشیار گروه عمران، شیمی، محیط زیست و متریال، دانشکده مهندسی، دانشگاه بلونیا، ایتالیا

سال سوم، شمارهٔ یک، بهار ۱۳۹۹
تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۱۰
DOI:

نویسنده مسئول: پارسا پهلوان، استادیار گروه معماری و شهرسازی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
پست الکترونیک:
parsa.pahlavan@um.ac.ir

چکیده

براساس نیازهای مرمتی در محوطهٔ جهانی پاسارگاد، با در نظر گرفتن ملاحظات پایداری، سازگاری، بازگشت‌پذیری و اقتصادی سه گروه ملات طراحی شدند. برای این مهم، ملات‌های آهکی هوایی با آهک میکرونیزه و استاندارد به‌همراه افزودنی ارگانیک به‌منظور هماهنگی با رطوبت نسبی پایین استان فارس انتخاب شدند. ملات‌های طراحی‌شده، در مقیاس آزمایشگاهی در بیش از صد نمونه ساخته شدند و براساس برنامهٔ زمان‌بندی، توزیع شبکهٔ تخلخل، نفوذپذیری در برابر بخار آب، پایایی و کربوناسیون سنجیده شدند. از آنجا که پارامترهای تأثیرگذار بر ملات در اقلیم طبیعی از محیط آزمایشگاهی بیشتر و پیچیده‌تر است، تمام روند ساخت ملات و انجام آزمون‌ها در اقلیم پاسارگاد تکرار شد تا تأثیر تفاوت اقلیم و آزمایشگاه بر کارایی ملات‌های مرمتی نیز مطالعه شده باشد. روش انجام این پژوهش تجربی و نظری است؛ بخش تجربی در آزمایشگاه و سایت به ساخت نمونه ها و انجام آزمون ها مترتب است. امکان سنجی تناسب این ملات ها با ابنیه تاریخی و مقایسه ویژگی های ملات ها در آزمون ها با مطالعات و پژوهش های موجود به روش نظری انجام شده است. مقایسهٔ نتایج آزمون‌های شبکهٔ تخلخل و رفتار آب و بخار آب ملات‌های این پژوهش با ملات‌های استاندارد مرمتی دنیا، به ظرفیت بالای ملات‌های آهکی هوایی بوم‌آورد در کارکرد مرمتی در اقلیم استان فارس اشاره دارد.

واژه‌های کلیدی: مرمت، ملات آهکی، میراث فرهنگی، پایداری، سازگاری، بازگشت‌پذیری

دسترسی به این مقاله برای همگان آزاد است. هرگونه استفادهٔ غیرتجاری از آن در صورت ارجاع مناسب، مجاز شناخته می‌شود.

مقدمه

آهک از نظر تاریخی یکی از مهم‌ترین مصالح ساخت‌وساز بشری است (Maravelaki-Kalaitzaki et al. 2005). اگرچه پس از قرن ۱۸ میلادی و گسترش استفاده از سیمان پرتلند، دیگر از آهک در ساخت‌وساز استفاده نشد (El-Turki et al. 2010). سال‌هاست که کارایی‌نداشتن ملات‌های سیمانی در کارکردهای مرمتی به‌دلیل انواع ناسازگاری‌ها شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی کاملاً اثبات شده است (E.Sassoni et al. 2016). پژوهش‌های جدیدتر نیز خطرات استفاده از سیمان در مرمت تأیید کرده‌اند؛ به‌ویژه در شرایطی که سیمان در مجاورت مصالح باستانی قرار می‌گیرد (Ventolà et al. 2011). از سوی دیگر سازگاری ملات‌های آهکی در مرمت به‌دلیل نفوذپذیری بخار فراوان آب و مقاومت مکانیکی نه‌چندان زیاد، تقریباً همیشه مطلوب بوده است (Lanas, Sirera, and Alvarez , 2006). باید گفت که ملات‌های آهکی سرعت گیرش پایینی دارند. در ملات‌های آهکی آبی به‌دلیل کندی روند عمل پوزولانیک و گیرش ملات در هیدراسیون (که از کربوناسیون کندتر است) کسب آمادگی حداکثری ملات ماه‌ها طول می‌کشد. تخلخل بالا به اضافهٔ عامل اشاره‌شده، از جمله دلایلی است که ملات‌های آهکی را همواره نیازمند افزودنی می‌کرده است. در ملات‌های باستانی، آهک با افزودنی‌های ارگانیک بسیاری ترکیب می‌شده است. برخی از این افزودنی‌ها، خون، روغن، تخم‌مرغ و شیر بوده‌اند (Sickels, 1981). هدف هریک از این افزودنی‌ها، اصلاح یکی از ویژگی‌های ملات‌های باستانی بوده است. مقالات و پژوهش‌های بسیاری به نقش روغن‌ها در ضدآب کردن و بهبود برخورد ملات با آب و بخار آب پرداخته‌اند (Lagazzo et al. 2016). همچنین تأثیر میزان اشباع‌بودن اسیدهای چرب روغن افزودنی در ملات می‌تواند تغییرات مهمی در میزان آب‌گریزی و شبکهٔ مولکولی ملات ایجاد کند (Pahlavan et al. 2017).

در این پژوهش، ملات‌های آهکی با افزودن ترکیب پودر سنگ‌های موجود در سایت و دو نوع روغن‌سوختهٔ خوراکی کنجد ساخته شدند و با افزودنی‌های حاوی اسیدهای چرب متفاوت و میزان اشباع شبکهٔ کربوکسیل، در پایان فاز اول وارد روند کیورینگ شدند. روند کیورینگ این ملات‌ها بر دو گروه Site Curing و Laboratory Curing مترتب است. برای این مهم روغن کنجد در دو نسبت اسیداولیک و لینولیک متفاوت و با نسبت ۱/۵ درصد در ملات‌ها استفاده شدند. با توجه به اقلیم خشک پاسارگاد، ترجیح به استفاده از ملات آهکی هوایی تشخیص داده شد تا بدون نیاز به هیدراسیون و تنها با تکیه بر کربوناسیون طبیعی (تبدیل اکسید کلسیم به کربنات کلسیم) ملات سخت شود. ملات‌ها در مقیاس آزمایشگاهی در بیش از ۶۰ نمونه ساخته شدند و براساس برنامهٔ زمان‌بندی، با توجه به توزیع شبکهٔ تخلخل، نفوذپذیری در برابر بخار آب، پایایی و کربوناسیون سنجیده شدند. از آنجا که پارامترهای تأثیرگذار بر ملات در اقلیم طبیعی به نسبت محیط آزمایشگاهی بیشتر و پیچیده‌تر است، تمام روند ساخت ملات و انجام آزمون‌ها در اقلیم پاسارگاد تکرار شد. مقایسه تأثیر اقلیم بر نمونه‌ها و تفاوت آن با کیورینگ آزمایشگاهی، از اهداف این پژوهش است. همچنین مقایسهٔ نتایج شبکهٔ تخلخل و تست‌های آب و بخار آب ملات‌های این پژوهش با ملات‌های استاندارد مرمتی دنیا، به اظهارنظر دربارهٔ تناسب ملات‌ها برای مرمت از منظر تئوریک کمک شایانی می‌کند. در این پژوهش ابتدا به ملاحظات مرمتی در طراحی این ملات‌ها اشاره و سپس مصالح استفاده‌شده در تهیهٔ نمونه‌ها معرفی شد. در ادامه روند کاراکتریزاسیون و بررسی اجمالی نتایج تشریح شده است.

شکل ۱. آسیب سنگ‌های محوطهٔ کاخ اختصاصی و نیاز به مرمت با ملات پایدار

نیاز مبرم به مرمت علمی میراث فرهنگی در چارچوب منشورهای بین‌المللی، به حرکت در چارچوب برنامهٔ مدون مرمتی وابسته است. بر همین اساس، مرمت علمی اصولی امروز به اتکا بر چهار اصل برگشت‌پذیری (در حد امکان)، پایداری، سازگاری با مصالح اصلی و برنامهٔ اقتصادی مترتب است. مشکل ناسازگاری فیزیکی و شیمیایی ملات‌های حاوی سیمان با مصالح قدیمی و ضعف پایایی ملات‌های آهکی، نیاز به طراحی و سنجش ملات‌های نوین سازگار با بناهای تاریخی را تبیین می‌کند. ملات‌های آهکی که به‌واسطهٔ فرمولاسیون‌های فراموش‌شده، خطر فرسایش را پشت سر گذاشته‌اند، برای باززنده‌سازی و استفادهٔ امروزی در مرمت، نیازمند تقویت، به‌روزرسانی فرمولی، کاراکتریزاسیون جدید و هم‌خوانی با استانداردهای نوین حوزهٔ مرمت میراث فرهنگی هستند. در حوزهٔ پایداری نیز روی‌آوردن به برگشت‌پذیری مصالح و استفاده از تکنیک‌های ضایعات بنیان، دستاوردهای چشمگیر زیست‌محیطی و اقتصادی را برای برنامهٔ مرمتی به‌دنبال دارد.

براساس منشورهای بین‌المللی مرمت و آنالیز شرایط موجود، چهار اصل کلی در طراحی ملات مرمتی برای محافظت از مجموعهٔ جهانی پاسارگاد در نظر گرفته شد. اصل نخست اصل بازگشت‌پذیری است. ملات‌های آهکی برخلاف ملات‌های سیمانی و پلیمری نوین، هنگامی که به‌صورت اندود روی ملات باستانی قرار می‌گیرند، قابلیت بازگشت‌پذیری و جداشدگی دارند؛ بی‌آنکه هنگام تراشیده‌شدن، متریال باستانی زیرین را جدا کنند. اصل دوم، سازگاری است که بر مفاهیم فیزیکی، شیمیایی، مکانیکی و لهجه‌شناسانه استوار است؛ به عنوان مثال، از آنجا که مصالح تاریخی درجه‌ای از حرکت را با توجه به تغییرات دمایی نشان می‌دهند، چنانچه Stiffness یا سختی مصالح مرمتی اندود آن حرکت را محدود کند، مصالح تاریخی آسیب می‌بینند؛ از این‌رو توصیه می‌شود تا مقاومت مکانیکی محصول مرمتی، کمتر از مقاومت مکانیکی مصالح تحت حفاظت باشد (Lanas, Sirera, and Alvarez , 2006). اصل پایداری، به سلامت مصالح طراحی‌شده به‌منظور مرمت و آسیب حداقلی آنها بر طبیعت استوار است. با احتساب تولید سرشار گرما و دی‌اکسیدکربن لازم برای تولید سیمان، ملات آهکی به‌تنهایی ملات پایدارتری از مصالح سیمانی حساب می‌شود؛ به‌ویژه آن دسته از ملات‌هایی که ضایعات‌بنیان هستند یا در فرمول آنها از ضایعات استفاده شده است (Beracca and Fichera, 2013). در بحث اصل نهایی یا بحث اقتصادی، باید به این مهم توجه داشت که به‌ویژه در کشورهای درحال‌توسعه‌ای که سایت‌های تاریخی فراوانی دارند، کاهش هزینهٔ مصالح مرمتی و اقتصادی‌کردن مرمت در عین حفظ کارآمدی آن، به معنای افزایش توان مداخله و گسترش شعاع توان مرمتی است.

روش پژوهش

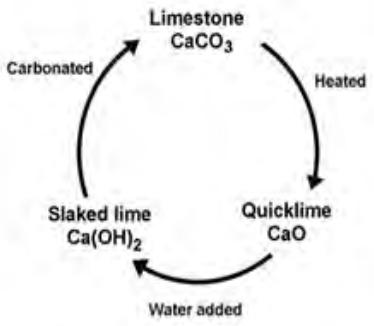
روش انجام این پژوهش تجربی و نظری است. بخش تجربی در آزمایشگاه و سایت به ساخت نمونه ها و انجام آزمون ها مترتب است. امکان سنجی تناسب این ملات ها با ابنیه تاریخی و مقایسه ویژگی های ملات ها در آزمون ها با مطالعات و پژوهش های موجود به روش نظری انجام شده است.

یافته ها

آهک از تاریخی‌ترین مصالح ساختمانی و مرمتی بشری است. آهک یا کلسیم اکسید با فرمول شیمیایی CaO ترکیبی شیمیایی است که جرم مولی آن 077/56 g/ mol است. آهک ماده‌ای بی‌بو به رنگ سفید یا سفید خاکستری و به شکل جامد سخت است که پوست و چشم را به‌شدت می‌سوزاند. همچنین از جمله موادی است که بشر کارایی آن را از دوران باستان شناخته و از آن در ساخت انواع بناها و برای اتصال محکم‌تر قطعات سنگ یا چوب استفاده کرده است. از دیرباز ایرانیان شفته‌آهکی (ملات دوغاب آهک و خاک)، ساروج (ملات دوغاب آهک و خاکستر) و ملات آهک آبی را می‌شناسند و با آنها ساختمان می‌سازند. پس از جنگ جهانی دوم، در کشورهای صنعتی برای پایدارکردن زمین، به‌ویژه پی‌سازی راه و جلوگیری از روییدن گیاه و روزدن آب در بستر، شانه‌ها و دامنه‌های راه و باندهای پرواز و ایستگاه‌های هواپیما، از شفته‌آهکی استفاده می‌شود و به‌کمک آن پی‌سازی و آب‌بندی می‌کنند.

جنس آهک تجاری (آهک زنده) به جسم‌های بیگانه در آن بستگی دارد. اگر سنگ‌آهک بیش از ۹۰ درصد وزن کربنات کلسیم داشته باشد، آهکی که از آن پخته شود آهک پرمایه یا هوایی است و هرگاه کربنات

کلسیم کمتر از ۷۵ درصد وزنش باشد، آهکی که از آن پخته شود، آهک کم‌مایه یا غیرهوایی است. هرگاه روی کلسیم اکسید (آهک زنده) آب ریخته شود، بر اثر واکنش با آب، گرما ایجاد می‌کند که این کار موجب بخارشدن قسمتی از آب می‌شود. در این عمل، آهک بر اثر جذب آب، متورم می‌شود، سپس به‌صورت گرد سفیدی درمی‌آید که اصطلاحاً آهک مرده نامیده می‌شود؛ زیرا در تماس با آب، دیگر واکنشی از خود نشان نمی‌دهد. به این عمل شکفته‌شدن آهک نیز می‌گویند.



$$CaCO_3 \rightarrow^{1000^\circ C} CaO + CO_2$$

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$$

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3$$

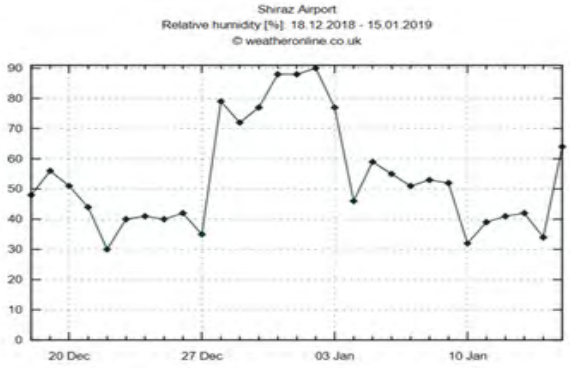
شکل ۲. سیکل کربوناسیون و تبدیل آهک شکفته به کربنات کلسیم

هرگاه مقداری آب به آهک مرده اضافه شود، این مخلوط به شیر آهک تبدیل می‌شود که اگر آن را صاف کنیم، محلول زلالی به دست می‌آید که درحقیقت محلول سیرشدهٔ کلسیم هیدروکسید در آب است که آب‌آهک نام دارد. آب‌آهک کاربردهای بسیاری در صنایع شیمیایی دارد؛ مثلاً در تهیهٔ سدیم هیدروکسید، آمونیاک، هیدروکسید فلزات، پرکلرین و به‌ویژه در استخراج منیزیم از آب دریا به کار می‌رود. ملات آهکی آبی سنتی ایران ساروج است که به دو روش سرد و گرم تولید می‌شده است. در روش گرم، کلوخه‌های سنگ‌آهک رس دار را می‌کوبیدند تا نرم شود. سپس خاک به‌دست‌آمده را با کاه و پهن و آب مخلوط می‌کردند. پس از آن، گل به‌دست‌آمده را روی زمین با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر پهن می‌کردند و پس از خشک‌شدن، قطعه‌های خشک‌شده را می‌پختند. درنهایت، هنگامی‌که قطعه‌ها پخته شد آنها را آسیاب می‌کردند. محصول به‌دست‌آمده رنگ لیمویی یا قهوه‌ای روشن داشت که ساروج گرم نامیده می‌شد. در روش سرد، ساروج از مخلوط‌کردن آهک شکفته، خاکستر، ماسه‌بادی، خاک رس و لوئی یا مغز نی ساخته می‌شد. با توجه به موارد کاربرد مختلف، ممکن بود افزودنی‌های دیگری مانند سفیدهٔ تخم‌مرغ و روغن حیوانی به ترکیب آن افزوده شود (حیدری، ۱۳۹۲).

با توجه به اقلیم خشک پاسارگاد، ترجیح به استفاده از ملات آهکی هوایی تشخیص داده شد تا بدون نیاز به هیدراسیون و تنها با تکیه بر کربوناسیون طبیعی (تبدیل اکسید کلسیم به کربنات کلسیم) ملات سخت شود. گروه ایتالیایی که طراحی ملات‌های استفاده‌شده در مرمت مجموعهٔ پاسارگاد را انجام داده است، با توجه به ملاحظات خود و برخی محدودیت‌ها، ملات‌های هیدرولیک طبیعی را برگزیده بود.

در راستای هدف بوم‌آوردسازی ملات پایدار و همچنین تلاش برای یافتن بهترین گزینهٔ فنی، با توجه به تحقیقات و استعلامات از بخش مصالح سازمان تحقیقات مسکن و شهرسازی، آهک هیدراته میکرونیزه کارخانهٔ آذرشهر با خلوص ۹۳ درصد انتخاب و تهیه شد. از آنجا که Lime Putty یا شیرهٔ آهک به‌عنوان محصول رسمی و استاندارد در ایران فروخته نمی‌شود، شیرهٔ آهک از آهک میکرونیزه و آب مقطر در شرایط آزمایشگاهی فراهم شد و بعد از یک ماه کیورینگ برای استفاده در ملات آماده شد (۴۸ درصد آب). آهک میکرونیزهٔ هیدراته با مشخصات فنی زیر، همیشه برای تهیه از کارخانهٔ آذرشهر مهیاست.

اینرت (بخش غیرچسبندهٔ ملات) در ترکیبی از مصالح موجود در پاسارگاد به قرار زیر تشکیل شده است. در جدول ۱ ترکیب اینرت قابل‌مشاهده است.



شکل ۳. رطوبت نسبی متوسط استان فارس در زمستان ۹۷
منبع: weatheronline.co.uk

جدول ۱. ترکیب اینرت (بخش غیرفعال ملات)

مادهٔ اولیه	Wt. ٪
ماسهٔ رودخانه‌ای	۱۸/۷۵
پودر سنگ سیاه	۳۷/۵
پودر سنگ سفید	۱۸/۷۵
پودر سنگ لایه‌لایه شده از کف کاخ اختصاصی	۲۵

جدول ۲. میکس دیزاین براساس وزن

	Sand (g)	Lime putty (g)	Kneading water (g)	Oil (g)
۱	۱۷۵۰	۷۰۰	۱۸۰	۰
۲	۱۷۵۰	۶۶۸	۱۸۰	۴۰
۳	۱۷۵۰	۶۶۸	۱۸۰	۴۰

جدول ۳. میکس دیزاین براساس درصد (wt.)

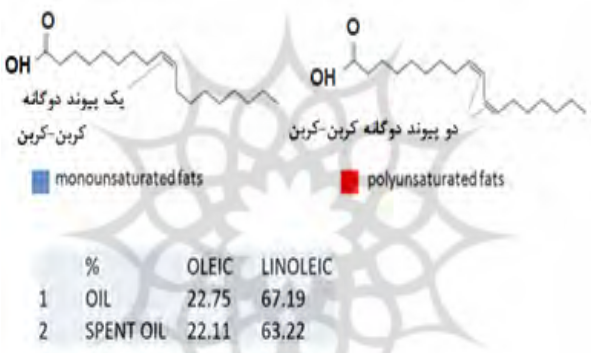
	Sand	Lime putty	Kneading water	Oil
۱	۶۷	۲۷	۷	۰
۲	۶۶	۲۵	۷	۲
۳	۶۶	۲۵	۷	۲

شکل ۴. نمونه‌های ملات‌های آهکی برای تست‌های مختلف در آزمایشگاه

جدول ۵. نمونه‌های ملات‌های آهکی برای تست‌های مختلف در اقلیم سایت

ملات‌های فوق در قالب‌های استوانه‌ای برای تست‌های کربوناسیون، شبکهٔ تخلخل، جذب آب، جذب بخار آب و پایداری در قالب‌های استوانه‌ای (قطر ۶ و ارتفاع ۲ سانتیمتر) قالب تهیه شدند. از آنجا که کیورینگ ملات در پایداری در محیط با مؤلفه‌های بسیار بیشتری از پیرسازی دمای آزمایشگاهی روبه‌روست، برای مقایسهٔ پایداری واقعی این ملات‌ها در اقلیم پاسارگاد، ساخت و کیورینگ نمونه‌ها در مجاورت سایت و در هوای معتدل (اواخر اسفند/ اوایل بهار) انجام شد.

به‌منظور افزودنی اسیدهای چرب به ملات‌ها، روغن خوراکی کنجد در دو نوع ساده و سوخته (به‌دلیل داشتن میزان متفاوتی از اسیدهای اوائیک و لینولئیک) گزین شدند. شکل ۶ سنجش میزان اسیدهای چرب برای این دو نمونه را نشان می‌دهد.



شکل ۶. معرفی ساختار اسیدهای اشباع و غیراشباع و نسبت آنها در روغن‌های استفاده‌شده در طراحی ملات‌ها

تست‌های داخل سایت در دو صورت متفاوت تهیه و طراحی شدند:

۱. نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد (قطر ۶ و ارتفاع ۲ سانتیمتر) برای تست‌های کربوناسیون، شبکهٔ تخلخل، جذب آب، جذب بخار آب و پایداری.

۲.سیمولاسیون(شبیه‌سازی)به‌وسیلهٔ‌چینش‌سنگ‌های سفید و پرکردن آنها با انواع ملات‌های طراحی‌شده برای خوانش تفاوت فرمولاسیون و تأثیر شرایط محیطی بر کیورینگ آنها.

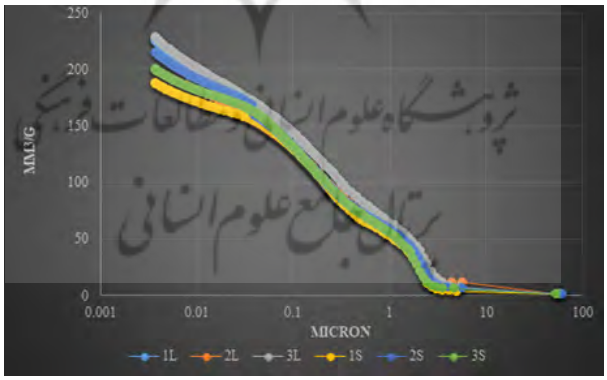
شکل ۷. سیمولاسیون به‌وسیلهٔ چینش سنگ‌ها و پرکردن آنها با انواع ملات‌های طراحی‌شده در سایت

به‌منظور سنجش میزان و چگونگی تخلخل باز در همهٔ نمونه‌های ملات ساخته‌شده، از MIP یا Mercury Intrusion Porosimetry استفاده شد. در این روش حجم تجمیعی جیوه که به ملات‌های مورد مطالعه تزریق شده است، میزان تخلخل باز و متوسط اندازهٔ تخلخل (The Cumulative Volume of Mercury Intruded Into Samples, The Total Open Porosity (OP) and the Average Pore Radius (Rav)) به دست می‌آید.

برای این منظور، نمونه‌های کوچک (با حجم تقریبی ۰/۸ سانتی‌متر مکعب) از نمونه‌های استوانه‌ای کوچک جدا شدند. از دستگاه کارلواربا (Carlo Erba 2000 Porosimeter, equipped with a macro-pore unit -Model 120, FisonInstruments, contact angle 141.3 °-,) در آزمایشگاه گروه مصالح دپارتمان عمران- شیمی- محیط‌زیست و مواد دانشکدهٔ مهندسی و معماری دانشگاه بولونیا برای این تست استفاده شد.

شکل ۸. دستگاه تخلخل سنج مورد استفاده Carlo Erba porosimeter

در جداول مرتبط با گزارش نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی، نام گذاری نمونه‌ها براساس جدول گزارش میکس دیزاین، ب‌v سه ملات ۱ و ۲ و ۳ استوار است. از آنجا که این نمونه‌ها در شرایط محیطی دوگانه نگهداری شده‌اند، در محیط آزمایشگاه به‌اختصار 1L, 2L, 3L برای تداعی lab و سه نمونهٔ کیورشده در محیط طبیعی سایت برای تداعی site با نام‌های 1S, 2S, 3S خوانده می‌شوند.



شکل ۹. نمودار توزیع و اندازهٔ تخلخل باز در نمونه‌های ملات ساخته‌شده

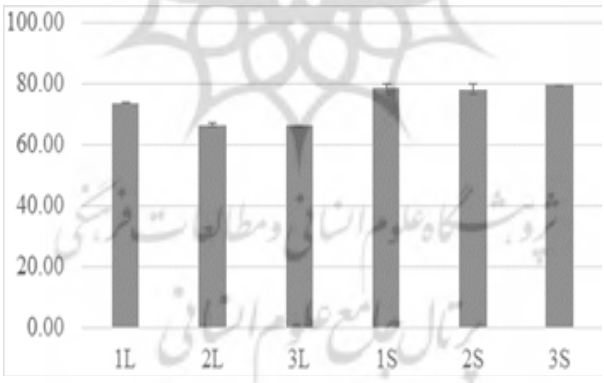
همان‌گونه که در شکل ۹ دیده می‌شود، بالاترین تجمع تخلخل‌ها در همهٔ ملات‌ها در هر دو شرایط کیورینگ در طیف ۲ الی ۳ میکرون قرار دارد. همچنین باید توجه داشت که تخلخل‌های فراوان در اندازه‌های بالاتر از ۳ میکرون وجود دارند و میکروپورهای کمتر از ۲ میکرون تا فشار ۲ هزار باری در ملات‌ها به‌ندرت یافت می‌شوند.

برای سنجش میزان کربنات کلسیم، ملات‌ها در آزمون کربوناسیون (Calcium carbonate determination) به‌وسیلهٔ کلسیمتر Dietrich Fruhling calcimeter پس از ۶ ماهگی قرار گرفتند. نمونه‌ها از عمق ۱ سانتیمتری ملات‌ها از نمونه‌های استوانه‌ای گرفته شدند. ساختار این آزمون براساس محاسبهٔ حجم

دی‌اکسیدکربن آزادشده در اثر واکنش کربنات کلسیم موجود در ملات آهکی (حاصل کربوناسیون) با اسید هیدروکلریک است. گزارش حاصله میانگین دو نمونه تست شده است.

جدول ۴. تغییر فشار از ۰ بار تا ۲ هزار بار و جیوهٔ تزریقی به طیف تخلل در یکی از نمونه‌های ملات

Pressure	Volume	Radius	Spec.Vol. R	.el.Vol	Rel.Vol ٪	.Spec.Surf	Rel.Surf
(bar)	(mm³)	(Micron)	(g/mm³)	(g/mm³)	(٪)	(m″/g)	(m″/g)
۰/۱۳۹	۰/۷	۵۳/۹۰۰۲۷۶	۰/۷۷	۰/۷۷	۰/۳۸	۰	۰
۱/۶	۵/۳	۴/۶۸۲۵۸۶	۵/۸۱	۵/۰۴	۲/۵۲	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۱۶
½	۶/۱	۳/۵۶۷۶۸۵	۶/۶۹	۰/۸۸	۰/۴۴	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۵
۲/۴	۷/۱	۳/۱۲۱۷۲۴	۷/۷۹	۱/۱	۰/۵۵	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۰۷
۲/۷	۷/۹	۲/۷۷۴۸۶۶	۸/۶۶	۰/۸۸	۰/۴۴	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۰۶
۱۷۶۶	۱۹۷/۷	۰/۰۰۴۲۴۲	۱۹۷/۰۴	۰/۶۶	۰/۳۳	۸/۸۴۰۱	۰/۳۰۷۵
۱۸۱۶	۱۸۰/۳	۰/۰۰۴۱۲۶	۱۹۷/۷	۰/۶۶	۰/۳۳	۹/۱۵۵۹	۰/۳۱۵۷
۱۸۷۰	۱۸۰/۹	۰/۰۰۴۰۰۶	۱۹۸/۳۶	۰/۶۶	۰/۳۳	۹/۴۸۱۶	۰/۳۲۵۷
۱۹۲۸	۱۸۱/۵	۰/۰۰۳۸۸۶	۱۹۹/۰۱	۰/۶۶	۰/۳۳	۹/۸۱۶۸	۰/۳۳۵۳
۱۹۸۳	۱۸۲/۱	۰/۰۰۳۷۷۸	۱۹۹/۶۷	۰/۶۶	۰/۳۳	۱۰/۱۶۱۸	۰/۳۴۴۹
۱۹۹۹	۱۸۲/۳	۰/۰۰۳۷۴۸	۱۹۹/۸۹	۰/۲۲	۰/۱۱	۱۰/۲۷۸۸	۰/۱۱۷



شکل ۱۰. میزان کربنات کلسیم در ملات‌های نگهداری‌شده در محیط آزمایشگاه و در محیط طبیعی سایتپس از ۶ ماه

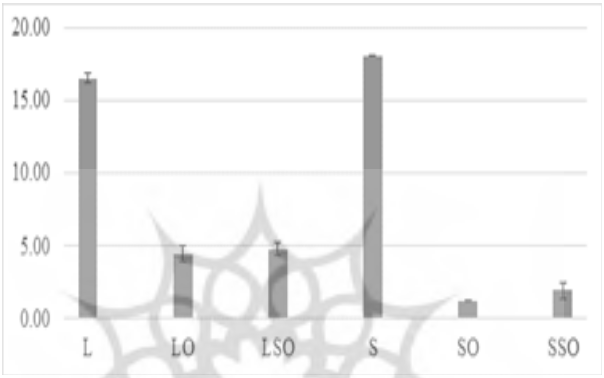
پس از این مرحله و تست‌های مرتبط با نفوذپذیری بخار آب، ملات‌های تحت تست در تطابق با میزان تخلخل، نفوذپذیری، و ویژگی‌های مکانیکی با ملات‌هایی که برای کار مرمت مناسب دانسته می‌شوند قرار می‌گیرند.

در آزمون آزمون جذب آب (Water absorption test) ، ابتدا نمونه‌های دیسک‌گونه در دمای اوون ۷۰ درجه کاملاً خشک شدند. پس از ثبت وزن‌های پیاپی به جهت اطمینان از اثبات وزن و خنک‌شدن ملات‌ها در وسیکاتور، نمونه‌ها در آب مقطر تا تثبیت وزن اشباع غوطه‌ور شدند. برای ضریب جذب آب، از فرمول زیر استفاده شد:

$$WA\% = 100^{*} (\text{Saturated weight} - \text{Dry weight}) / \text{Dry weight}$$

از این‌رو نتایج نهایی آزمون جذب آب ملات‌ها در شکل ۱۲ آمده است:

شکل ۱۱. نمونه‌های ملات تحت آزمون جذب آب

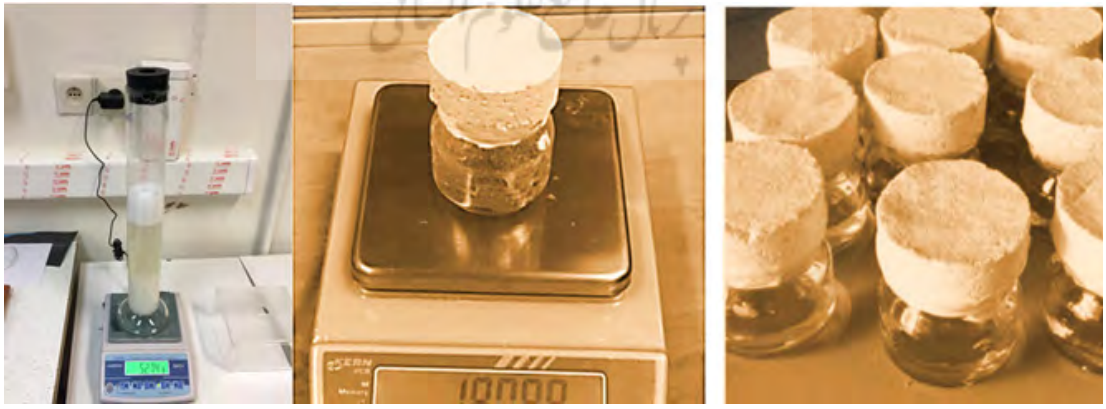


شکل ۱۲. نتایج نهایی آزمون جذب آب ملات‌ها

با توجه به شکل ۱۲، افزوده‌شدن روغن، سبب هیدروفوبیک‌شدن ملات‌ها شده و میزان جذب آب در آنها به‌وضوح قابل‌مشاهده است. همچنین نتایج مشابهی از آب‌گریزشدن ملات‌های آهکی در گزارش‌های علمی بسیاری وجود دارد (Nunes and Slížková, 2014).

برای سنجش میزان نفوذپذیری بخار آب (Water vapor permeability) در ملات‌ها، تست مربوطه مطابق استاندارد 19-EN 1015 روی سه نمونه از هر فرمولاسیون ملات انجام شد.

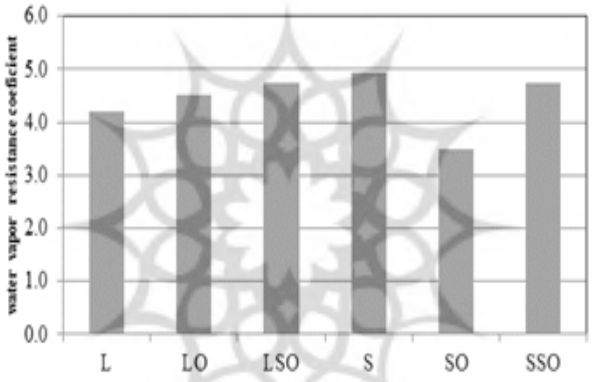
با توجه به شکل ۱۴، وزن نمونه‌ها در فواصل زمانی مختلف تعیین شد. همچنین میزان محلول تبخیر و عبوری از بدنهٔ ملات ثبت شد.



شکل ۱۳. ملات آهکی تحت تست نفوذپذیری بخار آب، تولید محلول اشباع نیترات پتاسیم در آزمایشگاه (تصویر چپ)

		08-01-2018 time 12:15:00 PM	08-01-2018 time 12:45:00 PM	08-01-2018 time 13:15:00 PM	08-01-2018 time 14:15:00 PM	09-01-2018 time 13:45:00 PM	12-01-2018 time 12:15:00 PM	16-01-2018 time 12:15:00 PM
Campione		tempo 0 min	10	60	180	1440	5760	11520
1.1	0		-4.4E-05	-0.000205	-0.000349	-0.001213	-0.003535	-0.006862
1.2	0		-3.2E-05	-0.000155	-0.000278	-0.001073	-0.003349	-0.006605
1.3	0		-3.3E-05	-0.000141	-0.00026	-0.001094	-0.003713	-0.00705
2.1	0		-1.5E-05	-0.000266	-0.000445	-0.001493	-0.003924	-0.007144
2.2	0		-3.1E-05	-1E-04	-0.000179	-0.000772	-0.002576	-0.005182
2.3	0		-1.3E-05	-0.000122	-0.000236	-0.000981	-0.0033	-0.006724
3.1	0		-2.7E-05	-0.000284	-0.000258	-0.001021	-0.00319	-0.006265
3.2	0		-6.7E-05	-0.000252	-0.000414	-0.00131	-0.003823	-0.006492
3.3	0		-0.000161	-0.000243	-0.000337	-0.000948	-0.001478	-0.005469
4.1	0		-4.3E-05	-0.000166	176.096446	-0.004728	-0.003121	-0.006128
4.2	0		-3E-05	-0.000112	-0.000695	-0.000783	-0.00352	-0.004983
4.3	0		-7.7E-05	-0.000267	-0.000432	-0.001348	-0.003487	-0.006347
5.1	0		-6E-05	-0.000208	-0.000326	-0.000939	-0.002334	-0.004085
5.2	0		3.2E-05	-0.000174	-0.000265	-0.000903	-0.002777	-0.005435
5.3	0		-6.1E-05	-0.000181	-0.000237	-0.000945	-0.002686	-0.015088
6.1	0		-4.8E-05	-0.000162	-0.000263	-0.000942	-0.003056	-0.006096
6.2	0		-4.7E-05	-0.000156	-0.00026	-0.000945	-0.002994	-0.006016
6.3	0		-4.1E-05	-0.000113	-0.000253	-0.000952	-0.003017	-0.006026

شکل ۱۴. روند کاهش وزن نمونه‌ها در اثر تبخیر محلول نیترات پتاسیم و عبور بخار از بدنهٔ ملات‌ها



شکل ۱۵. میزان نفوذپذیری بخار آب در ملات‌های تحت آزمون

بحث و یافته ها

آزمون‌های به‌عمل‌آمده در این پژوهش به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند تا ویژگی‌هایی قابل‌قیاس با آن دسته از ملات‌ها ارائه شود که با استانداردهای مرمتی بالا شناخته می‌شوند. مقایسه‌ای از ویژگی‌های فیزیکی ملات‌های تحت آزمون با ملات‌های معتبر مرمتی، دست‌کم در تئوری، مقدمات مهمی برای امکان‌سنجی تناسب این مواد برای اجرا در سایت و فاز آزمون‌های In-situ محسوب می‌شود (Sassoniet et al. 2016). درمورد تخلخل نمونه‌های ملات، علاوه بر آنچه در دیاگرام توزیع شبکهٔ تخلخل بیان شد، درصد تخلخل باز کلی ملات‌ها بدون افزودنی ۴۰/۵ بود که در ترکیب با افزودنی‌های ارگانیک روغنی (ملات‌های ۲ و ۳) به ترتیب به ۳۳/۱ و ۳۸/۱ درصد رسید. ملات‌های مرمتی آهکی استاندارد عموماً تخلخل بازی در حدود ۴۵-۳۰ درصد را نشان می‌دهند. به همین ترتیب ملات‌های آهکی پوزولانی در طیف ۴۲-۳۰ درصد، ملات‌های آهکی ترکیب‌شده با پودر آجر در طیف ۴۳-۳۲ درصد و ملات‌های آهکی آبی در حدود ۴۰-۱۸ درصد تخلخل باز را در آزمون‌ها نشان می‌دهند (Moropoulou et al. 2013). بر این اساس ازنقطه‌نظر تخلخل باز، ملات‌های مطروحه در این پژوهش از باب تئوری برای کار مرمتی مناسب به نظر می‌رسند.

در مباحث مرتبط با آزمون‌های رفتار ملات‌ها برابر آب و بخار آب، عصاره‌ای از واکنش ملات‌های استاندارد مرمتی در پژوهشی قدیمی چاپ شده است (Moropoulou et al. 2002). درصد جذب آب کلی ملات‌های بدون افزودنی این پژوهش زیر ۱۸ بود که

در ترکیب با افزودنی‌های ارگانیک روغنی (ملات‌های ۲ و ۳) به ترتیب به زیر ۵ درصد رسید. ملات‌های مرمتی آهکی استاندارد عموماً جذب آبی در حدودی ۱۹-۲۲ درصد را نشان می‌دهند. به همین ترتیب ملات‌های آهکی پوزولانی حدود ۲۲ و ملات‌های آهکی آبی حدود ۱۹ درصد تخلخل باز را در آزمون‌ها نشان می‌دهند (Moropoulou et al. 2002). این مهم نشان‌دهندهٔ جذب آب مناسب این ملات‌ها حتی بدون افزودنی ارگانیک روغنی است. افزایش روغن و کاهش جذب آب، ملات‌ها را در آب‌گریزی به شرایط بسیار مطلوب‌تری نزدیک کرده است. دربارهٔ نفوذپذیری بخار آب برای همهٔ ملات‌های آهکی مرمتی، نرخ زیر ۱۵ برای نفوذناپذیری بخار توصیه می‌شود. نفوذناپذیری زیر واحد ۵ برای همهٔ ملات‌های مورد آزمون این پژوهش، نشان‌دهندهٔ تناسب کامل تئوریک این ملات‌ها در زمینهٔ تنفس‌پذیری است (Moropoulou et al. 2002).

نتیجه گیری

هدف از این مقایسه با ملات‌های مرمتی متداول و استاندارد، امکان‌سنجی سازگاری تئوری و مقدماتی ملات‌های طراحی‌شده با عموم مصالح تاریخی است. درنتیجهٔ این مقایسه، ملات‌های آزموده شده از نظر جذب آب، نفوذپذیری بخار آب و تخلخل، کاملاً برای کارکرد مرمتی در تئوری مناسب هستند.

پس از پایان فاز آزمایشگاهی، و سلامت تست‌های پایداری نهایی، برای فاز In Situ Application از ملات‌های آهک هوایی جدید استفاده برای پرکردن شکاف‌های یکی از المان های موجود در کاخ آپادانا استفاده شد. نتیجهٔ این فرایند در پژوهش‌های آینده منعکس خواهد شد.

امروزه ترویج مرمت علمی در کنار مداخلات قدیمی در مجموعه پارسه، به مطالعاتی در مسیر بالندگی مرمت دانش‌بنیان و تولید ملات ۱۰۰ درصد بومی برآمده از پژوهش و آزمایش منجر می‌شود. نمایش حرکت روبه‌رشد در مسیر مرمت دانش‌بنیان با انتقال دانش طراحی ملات مرمتی به ایران، از اهداف اولیهٔ پژوهش حاضر به شمار می‌آید.

شکل ۱۶. ازاره‌های آسیب‌دیدهٔ نیازمند مداخله با ملات مرمتی پایدار در محوطهٔ انسان بالدار (مجموعهٔ پاسارگاد)

تقدیر و تشکر

نگارندگان از حمایت معنوی آقایان مهندس سید محمد بهشتی و دکتر کامران احمدی برای آغاز این مطالعات کمال تشکر را دارند. از پژوهشگران همکار در پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری و کارکنان زحمتکش مجموعهٔ جهانی پاسارگاد، به‌ویژه آقایان حسین‌بر و حسینی برای کمک به آزمون‌های آزمایشگاهی و سایت قدردانی می‌شود. از همکارانمان در گروه مصالح دپارتمان DICAM دانشگاه بولونیا ایتالیا به‌دلیل انجام آزمون‌های کربوناسیون و تخلخل جیوه و همچنین از دانشکده‌های مهندسی و علوم دانشگاه فردوسی مشهد برای فراهم‌آوری امکان ساخت نمونه‌ها و آزمون تعیین میزان اسیدهای اشباع روغن‌های مورد استفاده تشکر می‌کنیم. از گروه مرمتگر ایتالیایی مشغول در پاسارگاد به‌دلیل حسن همکاری، بحث‌های فنی و دیدگاه‌های سازنده، به‌ویژه از Claudio Prosperi Porta و Maria Concetta Laurenti سپاسگزاریم. در پایان از دفتر بین‌الملل بنیاد نخبگان (معاونت علمی نهاد ریاست جمهوری) به‌دلیل حمایت از این پژوهش قدردانی می‌شود.

تعارض در منافع

بین نویسندگان هیچ‌گونه تعارضی در منافع گزارش نشد.

فهرست منابع

حیدری، یونسی و وطن خواه (۲۰۱۳)، پژوهشی در ملات‌های آهکی تاریخی (ساروج) حمام شاهزاده‌ها در اصفهان. مرمت و معماری ایران (مرمت آثار و بافتهای تاریخی، فرهنگی)، ۱(۵)، ۸۳-۹۸.

Barreca, F., & Fichera, C. R. (2013). Use of olive stone as an additive in cement lime mortar to improve thermal insulation. *Energy and Buildings*, 62, 507- 513.

El-Turki, A., Ball, R. J., Carter, M. A., Wilson, M. A., Ince, C., & Allen, G. C. (2010). Effect of dewatering on the strength of lime and cement mortars. *Journal of the American Ceramic Society*, 93(7), 2074- 2081.

Lagazzo, A., Vicini, S., Cattaneo, C., & Botter, R. (2016). Effect of fatty acid soap on microstructure of lime-cement mortar. *Construction and Building Materials*, 116, 384- 390.

Lanas, J., Sirera, R., & Alvarez, J. I. (2006). Study of the mechanical behavior of masonry repair lime-based mortars cured and exposed under different conditions. *Cement and Concrete Research*, 36(5), 961- 970.

Maravelaki-Kalaitzaki, P., Bakolas, A., Karatasios, I., & Kilikoglou, V. (2005). Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in Crete. *Cement and Concrete Research*, 35(8), 1577- 1586.

Moropoulou, A., Cakmak, A. S., Biscontin, G., Bakolas, A., & Zendri, E. (2002). Advanced Byzantine cement based composites resisting earthquake stresses: the crushed brick/ lime mortars of Justinian's Hagia Sophia. *Construction and Building Materials*, 16(8), 543- 552.

Moropoulou, A., Bakolas, A., Moundoulas, P., Aggelakopoulou, E., & Anagnostopoulou, S. (2013). Optimization of compatible restoration mortars for the earthquake protection of Hagia Sophia. *Journal of Cultural Heritage*, 14(3), e147-e152.

Nunes, C., & Slížková, Z. (2014). Hydrophobic lime based mortars with linseed oil: characterization and durability assessment. *Cement and Concrete Research*, 61, 2839-.

Pahlavan, P., Manzi, S., Rodriguez-Estrada, M. T., & Bignozzi, M. C. (2017). Valorization of spent cooking oils in hydrophobic waste-based lime mortars for restorative rendering applications. *Construction and Building Materials*, 146, 199- 209.

Sassoni, E., Pahlavan, P., Franzoni, E., & Bignozzi, M. C. (2016). Valorization of brick waste by alkali-activation: A study on the possible use for masonry repointing. *Ceramics International*, 42(13), 14685- 14694.

Sickels, L. B. (1981). Organics vs. synthetics: their use as additives in mortars. In *Mortars, cements and grouts used in the conservation of historic buildings. Symposium, Rome*, 36- Nov. *1981.Mortiers, ciments et coulis utilises dans la conservation des batiments historiques. Symposium, Rome 36- Nov. 1981* (pp. 25- 52).

Ventolà, L., Vendrell, M., Giraldez, P., & Merino, L. (2011). Traditional organic additives improve lime mortars: New old materials for restoration and building natural stone fabrics. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3313- 3318.

EN 1015- 19: Methods of test for mortar for masonry, Determination of water vapour permeability of hardened rendering and plastering mortars. (1998). Berlin: Beuth.

https://www.weatheronline.co.uk/

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی