Feasibility of Using Hydrophobic Coatings in the Protection of Adobe

Reza Vahidzadeh [1*], Hamid Fadaei [2]

1. Assistant Professor, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Tehran-Iran.

2. Assistant Professor, Research Centre for Conservation of Cultural Relics, Research Institute of Cultural Heritage and Tourism, Tehran-Iran.

Abstract

The erosion of adobe heritage under the influence of natural factors, especially rainfall and humidity, is one of the most important challenges in the conservation of this heritage today. Alongside traditional options for the protection of adobe heritage, such as the use of straw plaster, in recent years, various chemical products have been marketed for the protection of building materials and components, especially against the threat of moisture, and consequently, serious tendencies have been expressed in the field of evaluating these materials in the field of conservation and restoration. Therefore, the scientific evaluation of the properties of these materials seems necessary for their judicious use. Since many of the chemical materials available in the market are mainly designed for the protection of stone and brick, it seemed necessary to conduct this study in order to protect adobe materials and optimize the penetration of these materials into the adobe texture. In this research, considering the need to increase the resistance of adobes against moisture, the hydrophobic properties of four different commercial products with the names of Stain Repellent AKEMI, SRP130, PTS+ and Long Life, were evaluated and compared with each other on the structure of adobes. The results of the research showed that although all the commercial materials studied provide the possibility of significantly increasing the resistance of adobe against moisture, the Long-Life material has a higher ability to penetrate and hydrophobize adobes compared to other chemical products. This issue can significantly increase the surface resistance of the adobe against both long-term contact with moisture and against mechanical erosion factors. The results of this research can be used as a basis for future studies in the direction of localizing chemical materials for the protection of adobe works and optimizing their application in the conservation and restoration of adobe historical buildings.

Keywords: Adobe, Hydrophobic Coatings, Protection, Silane Siloxane.

Knowledge of Conservation and Restoration

Vol. 3(2) No.4
September 2020

https://kcr.richt.ir

Pages: 13 to 30

Corresponding Author

Reza Vahidzadeh

Assistant Professor, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Tehran-Iran.

Email
rez.vahidzadeh@gmail.com

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.

امکان‌سنجی استفاده از پوشش‌های آبگریز در حفاظت از مصالح خشتی

رضا وحیدزاده[1*]، حمید فدایی[2]

۱. عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران.

۲. استادیار پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی ـ فرهنگی، پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری، تهران.

چکیده

فرسایش میراث خشتی تحت تأثیر عوامل طبیعی به‌ویژه بارندگی و رطوبت، امروزه از مهم‌ترین چالش‌های حفاظت از این میراث به شمار می‌رود. در کنار گزینه‌های سنتی حفاظت از میراث خشتی همچون استفاده از اندود کاه‌گل، در سال‌های اخیر محصولات شیمیایی متنوعی جهت حفاظت مواد و مصالح ساختمانی به‌ویژه در برابر تهدید ناشی از رطوبت به بازار عرضه شده است و به تبع آن تمایلات جدی در زمینه ارزیابی این مواد در حوزه حفاظت و مرمت ابراز شده است؛ بنابراین ارزیابی علمی ویژگی‌های این مواد به منظور استفاده سنجیده از آن‌ها ضروری به نظر می‌رسد. از آنجایی که بسیاری از مواد شیمیایی موجود در بازار به طور عمده برای حفاظت از سنگ و آجر طراحی شده‌اند، انجام این مطالعه به‌منظور حفاظت از مصالح خشتی و بهینه‌سازی نفوذ این مواد در بافت خشت ضروری به نظر می‌رسید. در این پژوهش با توجه به نیاز به افزایش مقاومت خشت‌ها در برابر رطوبت، خواص آب‌گریزی چهار محصول مختلف تجاری با نام‌های، Stain Repellent AKEMI، SRP130 PTS^+ و Long Life، بر ساختار خشت‌ها ارزیابی و با یکدیگر مقایسه شد. نتایج تحقیق نشان داد که اگر چه همه مواد تجاری بررسی شده امکان افزایش مقاومت خشت در برابر رطوبت را به‌طور قابل‌توجهی فراهم می‌کنند، اما ماده Long Life نسبت به سایر محصولات شیمیایی، توانایی بالاتری در نفوذ و آب‌گریزی خشت‌ها دارد. این موضوع می‌تواند مقاومت سطح خشت را هم در برابر تماس طولانی‌مدت با رطوبت و هم در برابر عوامل فرسایش مکانیکی، به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد. نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مبنای مطالعات آینده در جهت بومی‌سازی مواد شیمیایی برای حفاظت از آثار خشتی و بهینه‌سازی کاربرد آن‌ها در حفاظت و مرمت و از بناهای تاریخی خشتی استفاده شود.

واژگان کلیدی: خشت، پوشش‌های آب‌گریز، حفاظت، سیلان سیلوکسان.

فصل‌نامه دانش حفاظت و مرمت

سال سوم، شماره ۲

شماره پیاپی ۴ ، تابستان ۱۳۹۹

https://kcr.richt.ir

صفحات: ۱۳ تا ۳۰

نویسنده مسئول

رضا وحیدزاده

عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران.

رایانامه

rez.vahidzadeh@gmail.com

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

مقدمه

رس‌ها دارای خواص پلاستیکی در هنگام تر شدن هستند، زیرا بلورهای نازک و کوچک آن با اندک فشاری بر روی هم می‌لغزند (Mora et al., 1982, pp. 36-38). به همین دلیل، بناهای خشتی به شدت در برابر رطوبت حساس هستند. مصالح گلی در معرض انواع رطوبت، آب را جذب کرده و متورم می‌شوند. این تورم و لغزش صفحات رسی بر یکدیگر موجب از بین رفتن استحکام و پایداری خشت می‌گردد. روش‌های مختلفی جهت افزایش مقاومت رطوبتی خشت پیشنهاد شده است. یکی از مهم‌ترین این روش‌ها استفاده از اندودهای حفاظتی هستند (Torraca, 1982, pp. 107-110).

اندود کاه‌گل به‌عنوان شیوه‌ای سنتی جهت حفاظت از خشت در برابر باران، قرن‌ها به‌خوبی وظیفه خود را در این زمینه ایفا کرده است. این اندود باید به طور مرتب تعویض شود تا نقش حفاظتی خود را به نحو مطلوب ایفا کند. در سال‌های اخیر، کمبود دانش فنی سنتی تهیه و بهینه‌سازی اندود کاه‌گل مناسب و به تبع آن، کاهش نیروی کار مناسب، موجب افزایش هزینه انجام این نوع درمان شده است. از سوی دیگر، به دلیل عدم وجود کیفیت سابق در کاه‌گل‌های جدید، عمر مفید این نوع پوشش نیز کاهش یافته است (Ashurst & Ahurst, 1998, pp. 87-95).

این مسائل در کنار روند رو به گسترش فعالیت‌های باستان‌شناسی که موجب بیرون آمدن ساختارهای خشتی از زیر خاک می‌شود و همچنین روند فزاینده فرسایش در بافت‌های تاریخی، موجب شده تا گزینه‌های جدید درمانی در کنار روش‌های سنتی مطرح شوند. دراین‌باره پلیمرهای آکریلی ــ متاکریلی که در صنعت کاربری گسترده‌ای دارند، در میراث فرهنگی به‌عنوان پوشش‌های محافظ استفاده می‌شوند (Mohammadi & Ershad-Langroudi, 2014; Al-Dosari et al., 2017). ارگانوسیلیکون‌های تجاری نیز از دهه شصت میلادی تاکنون به‌عنوان مواد استحکام‌بخش سنگ استفاده می‌شوند (Aslanidou et al., 2016; Tesser et al., 2014; Ershad-Langroudi & Sadat-Shojai, 2009). همچنین استفاده از رزین‌های سیلیکونی به‌منظور حفظ مصالح آجری تاریخی مطالعه شده است (فدایی و وحیدزاده، ۱۳۸۹؛ ارشاد لنگرودی و دیگران، ۱۳۹۱). لزوم استفاده از این رزین‌ها به‌منظور حفظ آثار معماری گلی نیز مطرح هست. اهمیت این موضوع زمانی بیشتر مشخص می‌شود که در بسیاری از موارد، از جمله در مورد عناصر تزئینی ظریف در این محوطه‌ها، مانند نقاشی‌های روی بستر خاکی، اصولاً استفاده از پوشش‌های خشن کاه‌گلی که خود در ابتدا مرطوب هستند، مناسب نیست.

در دهه‌های گذشته، به دلیل نوظهور بودن این فناوری، هزینه بهره‌برداری از آن در مقایسه با روش‌های سنتی به حدی بالا بود که امکان توصیه آن به‌عنوان گزینه‌ای جدی و کاربردی در مقیاس کارگاهی وجود نداشت (Guillaud, 2000, pp.15-16). با این حال، امروزه با توسعه صنایع مرتبط و پیشرفت دانش در این حوزه، هزینه تهیه و استفاده از این مواد کاهش یافته و آن‌ها را به بخشی از مصالح ساختمانی رایج برای تقویت بناهای جدید تبدیل کرده است. مطالعه حاضر در پی بررسی دقیق‌تر کاربرد این مواد، به‌ویژه در بهینه‌سازی مصالح مرمتی (و نه صرفاً مصالح تاریخی) است و راهکارهایی را برای استفاده بهینه از این مواد در ارتقای کیفیت مصالحی که طی مرمت بناهای تاریخی به کار می‌روند، ارائه می‌دهد. در این پژوهش، نمونه‌های کوچک خشتی در آزمایشگاه تهیه و سپس با چند نمونه از مواد آب‌گریز تجاری مورد درمان قرار گرفتند. سپس نمونه‌های درمان‌شده و درمان‌نشده در معرض چندین آزمون جهت بررسی تغییرات جذب رطوبت قرار داده شدند و میزان نفوذ مواد در ساختار خشت‌ها ارزیابی شد. علاوه بر این، عوامل محدودکننده در کیفیت اجرای درمان شناسایی و راهکارهایی برای بهینه‌سازی آن پیشنهاد گردید.

مواد و روش‌ها

مواد شیمیایی استفاده‌شده

در این تحقیق، کارآیی چهار نوع ماده آب‌گریز زیر در زمینه حفاظت از مصالح خشتی بررسی و ارزیابی شد. از میان این گزینه‌ها، سه مورد شامل رزین سیلان

سیلوکسان از محصولات شرکت‌های مختلف و یک مورد محلول سیلیکات قلیایی بود.

الف) Stain Repellent AKEMI: این ماده، محصول شرکت AKEMI آلمان، یک رزین آماده مصرف بر پایه اولیگومری آلکیل‌آلکوکسی سیلان اصلاح‌شده است. این ترکیب به واسطه کشش موئینگی مصالح، به داخل ساختار آن نفوذ کرده و در عمق ماده جای می‌گیرد. در ادامه، با انجام واکنش کاتالیتیکی، پلی‌سیلوکسان تشکیل می‌شود. همچنین، این ماده با سیلیکات‌های موجود در سنگ یا آجر واکنش داده و موجب پایداری بیشتر پوشش آب‌گریز می‌گردد.[1]

ب) Hawisil SRP130: این ماده، محلول رزین سیلیکونی در حلال آلی است که توسط شرکت هاویلوکس تولید شده و بر پایه محصولات سیلیکونی پایه آلی شرکت واکر آلمان با کد Wacker BS تهیه شده است.[2]

ج) PTS^+: محلول قلیایی سیلیکات‌های لیتیوم و پتاسیم (pH=10.85)، محصول شرکت Dynacreat کانادا است.[3]

د) Impermeabilizante 10 AG Long Life – Long Life: این ماده، رزین سیلوکسان محلول در حلال آلی، دارای وزن مولکولی پایین و قابلیت نفوذ بالا است و توسط شرکت Timon International و SATECMA تولید شده است.[4]

روش آماده‌سازی و درمان نمونه‌های خشت

برای تهیه نمونه‌های خشت، از خاک لالجین همدان استفاده شد. نمونه‌ها به‌صورت قرص‌های کوچک به قطر ۵ سانتی‌متر و ضخامت ۱ سانتی‌متر قالب‌گیری شدند. به‌منظور بررسی تأثیر نسبت اختلاط اجزای مختلف در ساختار خشت، سه گروه نمونه با ترکیبات زیر تهیه شد[5] (شکل ۱).

- **گروه اول:** افزودن کاه حاصل از خرد کردن ضایعات برداشت گندم) به خاک، به نسبت یک به نه.
- **گروه دوم:** اضافه کردن ماسه عبور داده‌شده از الک شماره ۴ به خاک، به نسبت یک به چهار.
- **گروه سوم:** اضافه کردن ماسه عبور داده‌شده از الک شماره ۳۰ به خاک، به نسبت یک به چهار.

شکل ۱. مراحل آماده‌سازی نمونه‌های خشتی شامل آماده‌سازی الیاف کاه، تنظیم نسبت آمیختن خاک و ماسه و ورز دادن گل برای کاربرد در خمیره خشت‌ها.

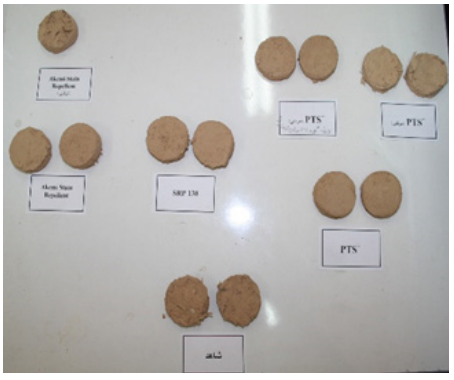
برای بررسی شرایط بهینه در درمان نمونه‌ها، مواد آب‌گریز به سه روش بر روی خشت‌ها اعمال شدند: ۱ــ اعمال مستقیم با قلم‌مو بر روی سطح خشت‌های خشک‌شده؛ ۲ــ افزودن ماده استحکام‌بخش به گل پیش از قالب‌گیری؛ و ۳ــ افزودن ماده استحکام‌بخش به آب مورد استفاده در تولید گل و سپس ورز دادن گل حاوی ماده آب‌گریز. تمامی نمونه‌ها، پس از قالب‌گیری و انجام درمان، به مدت دو هفته در شرایط آزمایشگاهی نگهداری شدند. سپس آزمون‌های مقاومت رطوبتی بر روی نمونه‌ها انجام شد.

روش آزمون و مطالعه نمونه‌ها

الف) آزمون جذب قطره (تغییرات زاویه تماس آب با مصالح): اندازه‌گیری دقیق زاویه تماس حلال‌ها بر روی هر نوع مصالح نیازمند استفاده از روش‌های دستگاهی پیشرفته است. روشی دیگری که با امکانات ساده‌تر در حفاظت و مرمت مصالح ساختمانی مورد استفاده قرار گرفته است آزمون جذب قطره است. در این آزمون برای ارزیابی شدت خیس شدن یک نوع مصالح و بررسی زاویه تماس، مدت زمان مربوط به جذب یک قطره بر روی سطح مصالح اندازه گیری می‌شود (تیتونیکو، ۱۳۸۵، صص. 43 – ۴۱). تجربه نشان داده که زاویه تماس و جذب سطحی قطره علاوه بر تخلخل و بار سطحی مصالح، به شکل سطح هم بستگی دارد. یک سطح صیقلی کاملاً افقی جذب سطحی متفاوتی نسبت به یک سطح زاویه‌دار و دارای پستی و بلندی دارد. از آنجا که در آزمایش‌های کارگاهی و در مورد مصالح تاریخی تأمین سطح کاملاً صیقلی ممکن نیست و در عین حال هر بخش از سطح یک ماده ساختمانی ممکن است خواص متفاوتی داشته باشد. به جای قرار دادن یک قطره بر روی سطح خشت چهار قطره قرار داده شد و جذب مجموع آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۲). علاوه بر این جذب قطره در طول زمان هم بررسی شد و تغییرات زاویه تماس در طول زمان قرارگیری قطره بر روی خشت تا جذب کامل آن ثبت شد.

به ازای هر ماده استحکام‌بخش و هر روش درمان، دو نمونه خشت اختصاص داده شد. همچنین، دو نمونه دست‌نخورده به‌عنوان شاهد و جهت مقایسه تطبیقی میزان تأثیر درمان در نظر گرفته شد. تمامی نمونه‌ها بر روی سطحی کاملاً افقی قرار داده شدند. سپس، با استفاده از پی‌پت، در چهار گوشه از سطح فوقانی هر نمونه، چهار قطره آب به حجم مجموعاً ۴ سانتی‌متر مکعب ریخته شد. فرآیند تماس قطرات با سطح خشت، از لحظه فرود آمدن تا زمان جذب کامل آن‌ها، مورد بررسی قرار گرفت. در طول این مدت، میزان جذب آب سطحی نمونه‌ها بر اساس تعداد قطرات جذب‌شده در سطح تعیین شد. جذب قطرات مستقیماً تابع زاویه تماس قطره با سطح است. برای بررسی دقیق‌تر این زاویه، از مراحل تماس قطره با سطح عکس‌برداری شد.

ازآنجاکه قطرات آب در صورت عدم جذب، به‌مرور



شکل ۲. قالب‌زنی و تهیه نمونه‌های خشتی، اعمال درمان با پوشش‌های آب‌گریز مختلف.

تبخیر می‌شوند، ممکن است ناپدید شدن آن‌ها با فرآیند جذب اشتباه گرفته شود. برای کنترل دقیق‌تر این موضوع، قطرات آب به‌طور هم‌زمان بر روی ورقه‌های لامل شیشه‌ای نیز قرار داده شدند. با در نظر گرفتن نفوذناپذیری شیشه، مدت‌زمان تبخیر قطرات اندازه‌گیری و به‌طور تقریبی مشخص شد. بدین ترتیب، حداکثر زمان قابل‌اعتماد برای انجام آزمایش و بررسی فرآیند جذب سطحی قطرات بر روی نمونه‌های خشت تعیین شد و اندازه‌گیری‌ها در این محدوده زمانی انجام گرفت.

ب) آزمون غوطه‌وری: برای انجام این آزمون، سه نمونه تهیه گردید. تمامی نمونه‌ها پس از توزین اولیه، به مدت سه هفته در دمای آزمایشگاهی نگهداری شدند و سپس داخل ظروف مدرج پر از آب قرار گرفتند. سطح آب در هر ظرف به گونه‌ای تنظیم شد که ارتفاع آن یک سانتی‌متر بالاتر از سطح فوقانی نمونه‌ها باشد. همچنین، دمای آب در تمامی ظروف یکسان و برابر با دمای اتاق (۲۷ درجه سانتی‌گراد) در نظر گرفته شد. برای جلوگیری از تماس مستقیم سطح تحتانی نمونه‌ها با کف ظرف، از تئوری پلاستیکی استفاده گردید. نمونه‌ها در فواصل زمانی مشخص، از لحظه شروع غوطه‌وری، مورد توزین قرار گرفتند. با توجه به الگوی کلی جذب آب که در ساعات اولیه با شدت بیشتری انجام می‌شود، فرآیند توزین مطابق برنامه زیر انجام شد: در ساعت اول، دو مرتبه؛ از ساعت دوم تا ساعت هشتم، هر ساعت یک مرتبه؛ و از ساعت هشتم تا ساعت سی‌ام، دو بار. بر اساس نتایج حاصل از توزین‌های متوالی، میزان تغییرات جذب آب در طول زمان و درصد جذب کلی آب نسبت به وزن اولیه نمونه‌ها، مطابق فرمول زیر محاسبه شد.

درصد جذب آب در ساعت n = (W1 – W2) / W1 × 100 .

با استفاده از این داده‌ها، نمودار جذب آب نمونه‌ها در طول ۳۰ ساعت غوطه‌وری ترسیم و با نمونه‌های شاهد (درمان‌نشده) مقایسه گردید. از آنجا که نمونه‌های شاهد در همان دقایق ابتدایی دچار تخریب می‌شدند و امکان اندازه‌گیری میزان جذب آب آن‌ها وجود نداشت، علاوه بر میزان جذب آب، مدت‌زمان لازم برای تخریب نمونه‌های خشت نیز محاسبه شد.

ج) بررسی عمق نفوذ مؤثر ماده آب‌گریز در خشت: برای بررسی میزان نفوذ ماده آب‌گریز در نمونه‌های درمان‌شده، از آن‌ها مقاطع عرضی تهیه شد. سپس، این مقاطع از سطح بیرونی به سمت داخل به‌تدریج مرطوب شدند و تغییرات میزان آب‌گریزی در عمق نمونه بررسی شد.

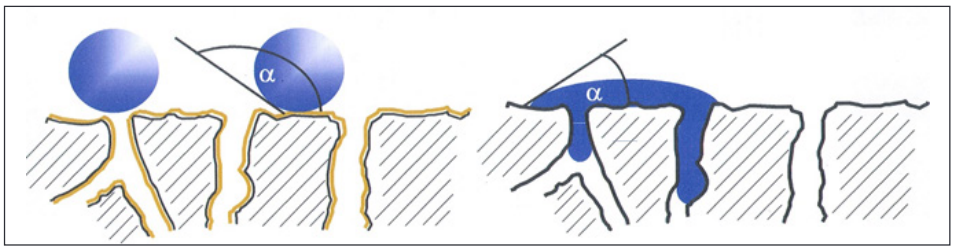
داده‌های پژوهش و بحث و تحلیل

الف) ارزیابی آزمون جذب قطره (تغییرات زاویه تماس آب با مصالح)

خیس شدن سطح مصالح ساختمانی در برابر رطوبت نزولی، به نیروهای داخلی مایع و ویژگی‌های سطح بستگی دارد که از طریق مفهوم کشش سطحی تعریف می‌شوند. کشش سطحی یک مایع نتیجه نیروهای جاذبه بین مولکولی آن است. مولکول‌های موجود در یک قطره مایع که روی سطح یک جسم قرار گرفته‌اند، تحت تأثیر دو گروه نیروی زیر خواهند بود: ۱ــ نیروهای جاذبه از داخل مایع؛ و ۲ــ نیروهای جاذبه از سطح جامد.

برآیند این نیروها، شکل قطره در نقطه‌ی تماس با سطح را تعیین می‌کند. زاویه تماس بین قطره‌ی آب و سطح مصالح، یک معیار کمّی برای اندازه‌گیری شدت خیس شدن سطح است. در صورتی که زاویه تماس قطره با سطح بیشتر از ۹۰ درجه باشد، مایع روی سطح جامد باقی می‌ماند و به ساختار آن نفوذ نمی‌کند. در حالتی که زاویه تماس صفر درجه باشد، مایع به‌طور کامل روی سطح گسترده شده و بلافاصله جذب آن می‌شود (شکل ۳ و ۴، جدول ۱). اگر مقدار زاویه تماس بین ۰ تا ۹۰ درجه قرار گیرد، مایع برای خیس کردن سطح به نیروی کمکی نیاز دارد. در مورد سطوح دارای خلل و فرج، هوای محبوس در داخل حفرات می‌تواند به‌مرور از سطح خارج شده و فرآیند جذب مایع را تسهیل کند (Torraca, 1982, p.9).

در مرحله اول، ساختمایه‌ای برای خشت از ترکیب خاک و کاه با نسبت ۹ به ۱ تهیه شد. شکل ۵ نتایج آزمون جذب قطره را برای سه نوع ماده استحکام‌بخش، بر



شکل ۳. اثر زاویه تماس در جذب آب سطح.

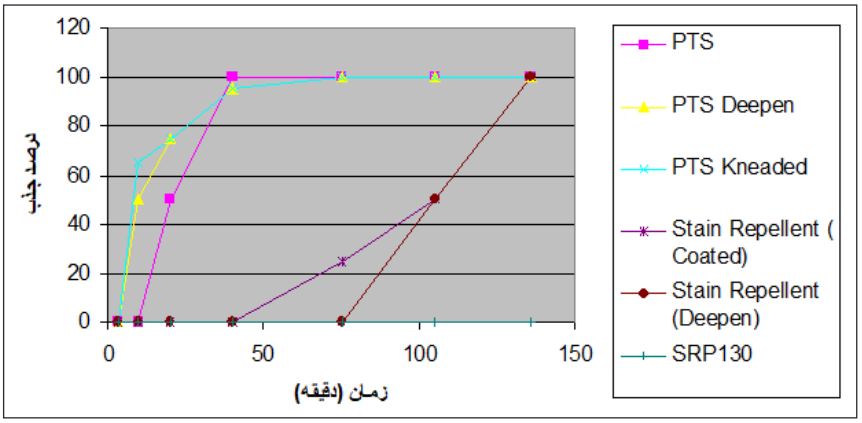
شکل ۴. زاویه تماس قطره با سطح نمونه‌های خشتی با ساخت‌مایه ماسه و خاک بعد از گذشت ۴۰ دقیقه؛
راست: نمونه درمان‌شده باLong Life و چپ: نمونه درمان شده با Stain Repellent AKEMI.

جدول ۱. تاثیر زاویه تماس در جذب آب.

درجه‌بندی شدت جذب آب	وضعیت ظاهری	زاویه تماس
۱	آب‌بندی بسیار خوب	> ۱۳۰
۲	آب‌بندی خوب	۱۱۰ _ ۱۳۰
۳	مرطوب‌شدن نسبی	۹۰ _ ۱۱۰
۴	مرطوب‌شدن قابل توجه	۳۰ _ ۹۰
۵	سطح کاملاً مرطوب	< ۳۰

اساس روش‌های مختلف استفاده‌شده برای درمان، نشان می‌دهد. آب‌گریزی ماده SRP 130 به حدی بود که اصولاً قطرات روی آن قرار نمی‌گرفتند و بلافاصله به محض برخورد با سطح به پایین می‌لغزیدند. به همین دلیل، قرار دادن چهار قطره که معمولاً در این اندازه‌گیری‌ها به کار می‌رود، بسیار دشوار بود. در نهایت، قطرات در گودی‌های سطح خشت گیر می‌افتادند. قطرات تشکیل‌شده از نظر شکل، نزدیک به کره بودند. جز SRP 130 که رفتار بسیار متفاوتی نسبت به خشت معمولی از خود نشان داد، دو استحکام‌بخش دیگر نیز تا حدودی در برابر جذب قطره مقاومت نشان دادند.

نحوه رساندن PTS^+ به ساختار خشت تأثیری در کیفیت درمان نداشت. این بدان معناست که خشت‌هایی که PTS^+ به خمیره آن‌ها افزوده شده بود و آن‌هایی که PTS^+ بعد از خشک شدن با قلم روی آن‌ها زده شده بود، رفتار مشابهی در برابر جذب قطره نشان دادند. همین مسأله در مورد Stain Repellent AKEMI



شکل ۵. مقایسه درصد جذب قطره در خشت‌های درمان شده.

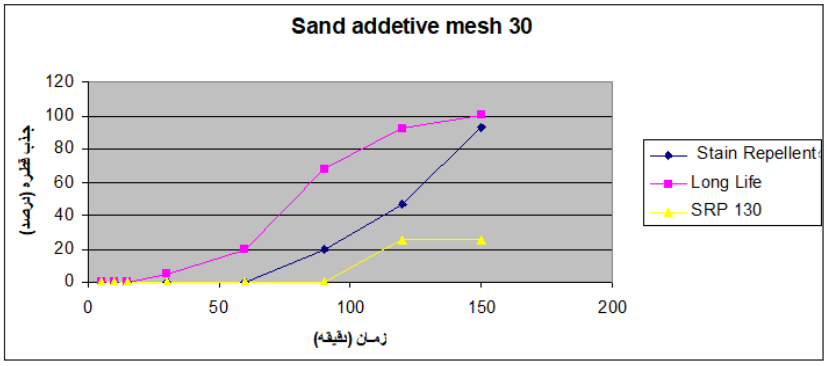
نیز مشاهده شد. در این مورد نیز افزودن ماده آب‌گریزکننده به خمیرمایه خشت تأثیر زیادی در بهبود مقاومت خشت در برابر جذب قطره نداشت. این مسأله نشان داد که اگرچه افزودن ماده آب‌گریز به خمیرمایه خشت امکان‌پذیر است، ولی با توجه به سمی بودن این مواد، بهتر است در مرحله ورز دادن و قالب‌زدن که مستلزم تماس پوستی زیاد خشت‌زن و گل است، به آن اضافه نشود. به همین دلیل، در بخش‌های بعدی از انجام این نوع درمان صرف‌نظر شد.

از میان نمونه‌های درمان‌شده، آن‌هایی که توسط PTS^+ آب‌گریز شده بودند، مقاومت خود را بعد از گذشت ۴۵ دقیقه از زمان تماس با قطره از دست دادند. این مسأله ناشی از زاویه تماس پایین‌تری بود که هنگام تماس قطرات با سطح آن‌ها ایجاد می‌شد.

همچنین Stain Repellent AKEMI نسبت به SRP ۱۳۰ از آب‌گریزی کمتری برخوردار بود، با این حال تا حدود ۱۰۰ دقیقه پس از تماس با سطح خشت، اثرگذاری خود را حفظ کرد.

در مرحله دوم، ساخت مایه خشت تا حدودی تغییر داده شد. در این حالت، ماسه عبور داده‌شده از الک شماره ۳۰ به خاک با نسبت یک به چهار افزوده شد. شکل ۶، نتایج مربوط به آزمون جذب قطره را برای این ترکیب نشان می‌دهد. در این مرحله، با توجه به نتایج ضعیفی که PTS^+ در مرحله قبلی کسب کرده بود، از ادامه مطالعه روی آن صرف‌نظر شد و به جای آن، ماده Long Life، محصول شرکت ساتکما جایگزین شد.

خشت‌های درمان‌شده با هر یک از سه ماده استحکام‌بخش، مقاومت بسیار خوبی در برابر جذب



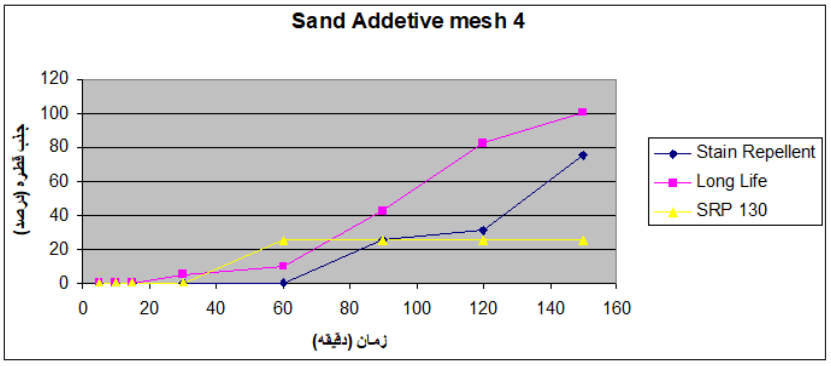
شکل ۶. مقایسه جذب قطره در خشت‌های درمان شده (ترکیب خشت‌ها: ماسه دانه‌بندی الک شماره ۳۰ و خاک با نسبت ۱ به ۴).

قطره از خود نشان دادند. همانند مرحله اول،SRP130 بهترین میزان آبگریزی را از خود نشان داد. با این حال، نسبت به مرحله اول از میزان آبگریزی آن کمی کاسته شد. در نقطه مقابل، Stain Repellent AKEMI، اگرچه همچنان در رتبه دوم قرار داشت، ولی بر مقاومت آن نسبت به مرحله قبل کمی افزوده شد. ماده Long Life نسبت به دو ماده دیگر رفتار نزدیک‌تری به خشت معمولی نشان داد. در مورد این ماده، زاویه تماس خیلی بالا نبود و قطرات در زمان تماس تقریباً روی سطح پخش شدند. با این وجود، خشت‌های درمان‌شده تا حدود ۶۰ دقیقه خشک باقی ماندند (جذب قطره زیر ۲۰ درصد).

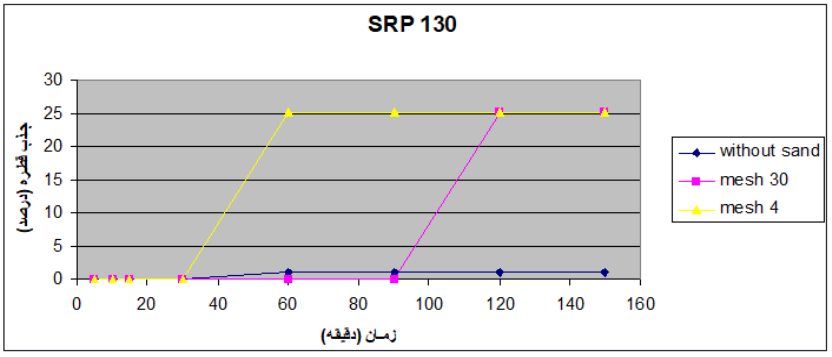
در مرحله سوم، ساخت مایه خشت مجدداً تغییر داده شد. در این حالت، ماسه عبور داده‌شده از الک شماره ۴ به خاک با نسبت یک به چهار افزوده شد. شکل ۷ نتایج مربوط به آزمون جذب قطره را برای این ترکیب نشان می‌دهد. در این حالت، فاصله نتایج مربوط به SRP130 و Stain Repellent AKEMI بازهم کمتر شد. این در حالی است که Long Life جذب ملایم قطره را در طی ۱۵۰ دقیقه با یک رفتار کمابیش خطی ادامه داد. با توجه به نتایج حاصله، می‌توان مواد شیمیایی موردمطالعه را بر اساس زاویه تماس حاصله در سطح خشت به ترتیب از بیشترین آبگریز کنندگی تا کمترین آن به شرح زیر معرفی کرد: 1ـ SRP130؛ 2ـ Stain Repellent AKEMI؛ 3ـ Long Life؛ و 4ـ PTS^+.

جهت بررسی دقیق‌تر اثر اجزاء سازنده خشت (کاه، ماسه و دانه‌بندی ذرات) بر کیفیت تأثیر هر یک از مواد شیمیایی، نتایج مربوط به آزمون جذب قطره در سه مرحله برای هر یک از مواد شیمیایی به‌صورت مجزا در قالب شکل‌های ۸ تا ۱۰ ارائه شده است. شکل ۸ به بررسی کیفیت درمان خشت‌های مختلف با ماده آبگریز SRP130 پرداخته است. در این مورد، چنان‌که مشاهده می‌شود، افزودن ماسه به ساختار خشت بر خلاف تصور موجود مبنی بر این‌که ماسه‌ها می‌توانند به‌عنوان پل سیلیکاته باعث جذب و نفوذ بیشتر استحکام‌بخش به ساختار خشت شوند، موفق نبوده است. افزایش اندازه دانه‌های ماسه موجب کاهش خاصیت آبگریزکنندگی SRP130 شده است.

شکل ۹ به بررسی کیفیت درمان خشت‌های مختلف با ماده آبگریز Stain Repellent AKEMI پرداخته

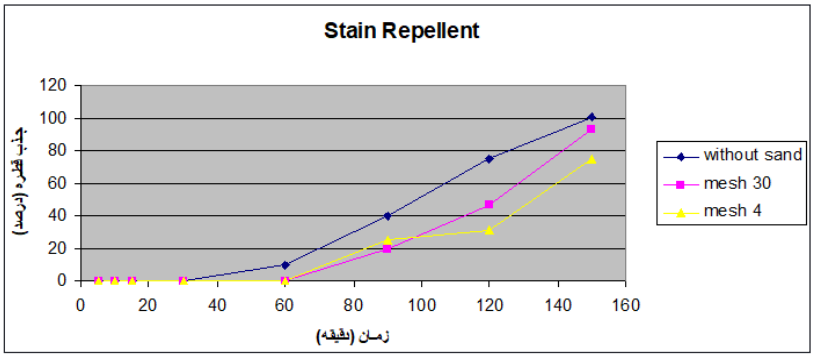


شکل ۷. مقایسه جذب قطره در خشت‌های درمان شده (ترکیب خشت‌ها: ماسه دانه‌بندی الک شماره ۴ و خاک با نسبت ۱ به ۴).

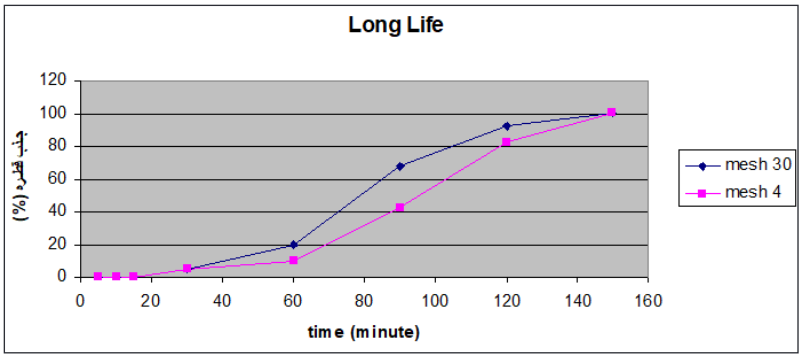


شکل ۸. مقایسه جذب قطره در خشت‌های درمان‌شده مختلف با ماده آبگریز SRP130.

(ترکیب خشت‌ها: خاک و کاه بدون ماسه با نسبت ۹ به ۱ و ترکیب ماسه دانه‌بندی الک‌های شماره ۳۰ و ۴ و خاک با نسبت ۱ به ۴).



شکل ۹. مقایسه جذب قطره در خشت‌های درمان‌شده مختلف با ماده آب‌گریز Stain Repellent AKEMI .
(ترکیب خشت‌ها: خاک و کاه بدون ماسه با نسبت ۹ به ۱ و ترکیب ماسه دانه‌بندی الک‌های شماره ۳۰ و ۴ و خاک با نسبت ۱ به ۴).



شکل ۱۰. مقایسه جذب قطره در خشت‌های درمان‌شده مختلف با ماده آب‌گریز Long Life.
(ترکیب خشت‌ها: ماسه دانه‌بندی الک‌های شماره ۳۰ و ۴ و خاک با نسبت ۱ به ۴).

است. فرضیه پل سیلیکاتی در این مورد به‌خوبی تأیید شده است. اختلاف کیفیت آب‌گریزکنندگی از دقیقه ۶۰ به‌خوبی آشکار شده است. نمونه‌هایی که دارای ماسه هستند، از دقیقه ۶۰ به بعد هر لحظه حداقل ۱۰ درصد کاهش جذب قطره داشته‌اند. در این مورد، خشت‌هایی که دارای دانه‌های ماسه بزرگ‌تر بودند، نتایج بهتری ارائه کرده‌اند.

شکل ۱۰ به بررسی کیفیت درمان خشت‌های مختلف با ماده آب‌گریز Long Life پرداخته است. چنان‌که ملاحظه می‌شود، خشت‌های دارای دانه‌بندی ماسه‌ای درشت‌تر آب‌گریزی بیشتری را از نظر افزایش زاویه تماس نشان داده‌اند. با این حال، اختلاف بین دو حالت خیلی زیاد نیست. بیشترین اختلافات در فاصله زمانی بین ۶۰ تا ۱۰۰ دقیقه اتفاق افتاده و پس از آن، مجدداً رفتار خشت‌ها به هم نزدیک شده است.

ب) ارزیابی جذب آب نمونه‌های درمان‌شده (آزمون غوطه‌وری)

تخریب نمونه‌های خشت در سه مرحله قابل مطالعه است: ۱ــ جذب آب و تورم خشت؛ ۲ــ بروز ترک‌ها؛ و ۳ــ تخریب کامل نمونه. مرحله ایجاد ترک و شکاف یکی از ویژگی‌های بارز نمونه‌های درمان‌شده با رزین است. اگرچه در تخریب نمونه‌های شاهد (خشت معمولی) نیز مرحله واپاشی خشت با ایجاد شکاف‌هایی همراه است، اما به دلیل پیوستگی و سرعت تخریب، معمولاً امکان تفکیک دو مرحله نهایی تخریب قابل مطالعه نیست. در نمونه‌های درمان‌شده، با تجمع بیشتر رزین در بخش‌های سطحی خشت، یک لایه دارای مقاومت رطوبتی و سایش بالاتر تشکیل می‌شود که این لایه در برابر تورم طبیعی توده درونی خشت پس از جذب آب مقاومت می‌کند و در نتیجه، تنش

به‌وجود آمده ترک برمی‌دارد.

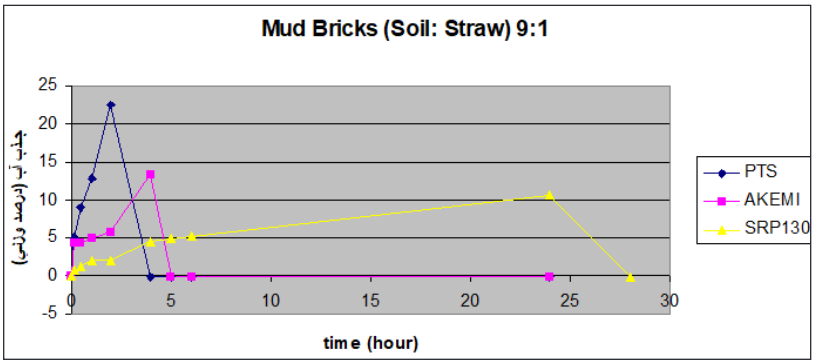
پس از باز شدن این ترک‌ها، زمینه برای نفوذ بیشتر آب در عمق خشت و تخریب شدیدتر آن فراهم می‌آید. به این ترتیب، ویژگی سطحی که رزین در خشت‌ها ایجاد می‌کند از این نظر که باعث ایجاد تنش در بافت خشت حین تورم رطوبتی می‌شود و از انعطاف طبیعی آن می‌کاهد، چندان مطلوب نیست. با این حال، باید این نکته را هم در نظر داشت که تا پیش از ایجاد این ترک‌ها، خشت می‌تواند تا چندین ساعت به‌خوبی در برابر نفوذ رطوبت مقاومت کند.

در مرحله اول، ساختار خشت از خاک و کاه به نسبت ۹ به ۱ تشکیل شده است. شکل ۱۱ نتایج آزمون جذب آب (غوطه‌وری) را برای سه نوع ماده استحکام‌بخش به تفکیک روش‌های مختلف استفاده شده برای درمان نشان می‌دهد. در عین حال، نمونه‌های درمان‌شده با رزین SRP130 (و تا حدودی رزین Stain Repellent AKEMI) توانستند حتی بعد از ایجاد ترک‌ها، پایدار باقی بمانند، به طوری که نمونه درمان‌شده با SRP130 تا بیش از یک روز دچار واپاشی کامل نشد.

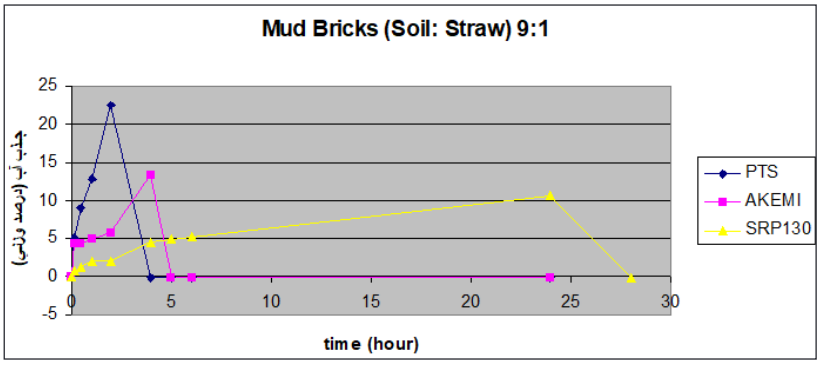
در مرحله دوم، ساختار خشت تا حدودی تغییر داده شد. در این حالت، ماسه عبور داده‌شده از الک شماره ۳۰ به خاک با نسبت ۱ به ۴ افزوده شد. شکل ۱۲ نتایج مربوط به آزمون جذب آب (غوطه‌وری) را برای این ترکیب نشان می‌دهد. همان‌طور که گفته شد، در این مرحله با توجه به نتایج ضعیفی که PTS+ کسب کرده بود، از ادامه مطالعه روی آن صرف‌نظر شد و به جای آن ماده Long Life جایگزین گردید.

در حالی که نمونه‌های درمان‌شده با SRP130 و Stain Repellent AKEMI در این مرحله نیز همچون مرحله اول پس از حدود ۸ ساعت به شدت ترک برداشتند و آسیب دیدند، نمونه درمان‌شده با Long Life از خود مقاومت بسیار خوبی نشان داد و تا پس از گذشت ۴۸ ساعت نیز نشانه‌ای از ترک یا هر نوع آسیب دیگر در آن مشاهده نشد. نکته قابل‌تأمل در فرسایش نمونه‌ها این است که جذب آب در دو مورد اول با شتاب قابل‌ملاحظه‌ای اتفاق می‌افتد و سرانجام در حدود ۲۰ درصد به اوج خود می‌رسد. نمونه‌ها جذب آب بیشتر از این حد را تاب نیاورده و در نتیجه‌بخش آب‌گریز شده که تا این مرحله به‌عنوان سدی در برابر رطوبت مقاومت می‌کند، دچار شکست می‌شود. در نقطه مقابل، فرآیند جذب آب در نمونه درمان‌شده با Long Life از یک شیب بسیار ملایم‌تر پیروی می‌کند که با مرور زمان از شدت آن کاسته می‌شود و به خط افقی نزدیک می‌شود.

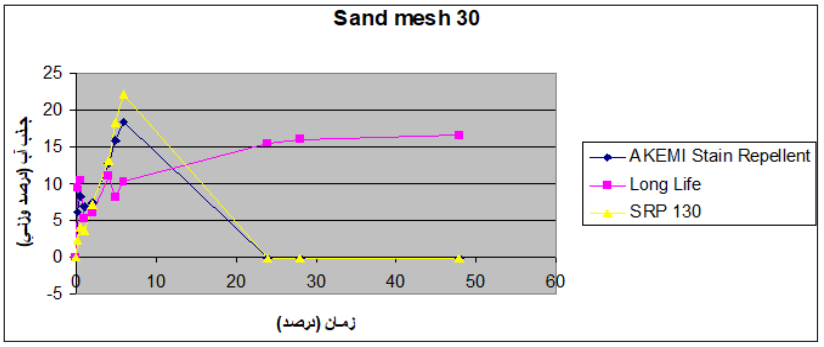
در مرحله سوم، ساختار خشت مجدداً تغییر داده شد. در این حالت، ماسه عبور داده‌شده از الک شماره ۴ به خاک با نسبت ۱ به ۴ افزوده شد. شکل ۱۳ نتایج مربوط به آزمون جذب آب (غوطه‌وری) را برای این ترکیب نشان می‌دهد. در نمودار این شکل نیز مشاهده می‌شود که خشت‌های درمان‌شده با دو ماده SRP130 و Stain Repellent AKEMI پس از گذشت چند ساعت تخریب شده‌اند. مقاومت خشت‌های درمان‌شده با SRP130 در یک ساعت اول بسیار خوب بوده و جذب آب آن نیز نسبت به سایر گزینه‌ها به



شکل ۱۱. مقایسه جذب آب (غوطه‌وری) در خشت‌های درمان‌شده با سه نوع ماده استحکام‌بخش (نسبت خاک به کاه در خشت: ۹ به ۱).



شکل ۱۲. مقایسه جذب آب (غوطه‌وری) در خشت‌های درمان‌شده با سه نوع ماده استحکام‌بخش (ترکیب خشت‌ها: ماسه دانه‌بندی الک شماره ۳۰ و خاک با نسبت ۱ به ۴).



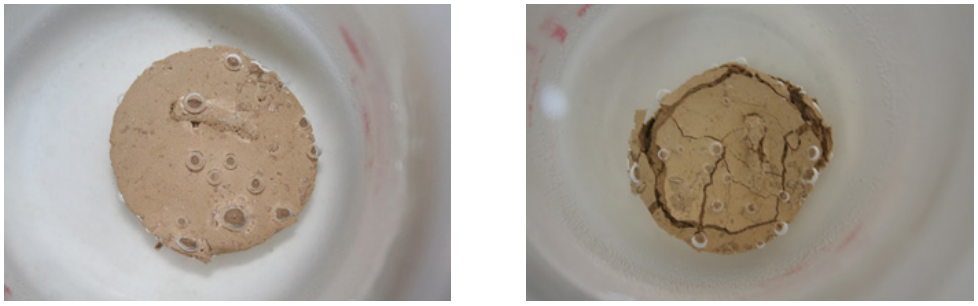
شکل ۱۳. مقایسه جذب آب (غوطه‌وری) در خشت‌های درمان‌شده با سه نوع ماده استحکام‌بخش (ترکیب خشت‌ها: ماسه دانه‌بندی الک شماره ۴ و خاک با نسبت ۱ به ۴).

مراتب پایین‌تر است. با این حال، این نوع خشت‌ها در کمتر از ده ساعت به نقطه اوج جذب آب خود رسیده و تخریب شدند.

این در حالی است که خشت‌های درمان‌شده با Long Life اگرچه در ابتدا آب بیشتری را جذب می‌کنند، اما روند جذب آن‌ها در طی زمان ۴۸ ساعته تقریباً ثابت باقی مانده و حتی در ۲۸ ساعت آخر خود تقریباً به خط افقی نزدیک می‌شود. این مسئله موجب ایجاد پایداری بسیار خوب در خشت‌های درمان‌شده به این طریق می‌شود که (اگرچه در نمودار حاضر نشان داده نشده است) این نوع خشت‌ها بعد از گذشت یک ماه غوطه‌وری در آب نیز تخریب نشدند (شکل ۱۴). با توجه به نتایج حاصله، می‌توان مواد شیمیایی مورد مطالعه را بر اساس مقاومت ایجاد شده در خشت‌ها در حالت غوطه‌وری، به ترتیب از بیشترین پایداری تا کمترین آن، به شرح زیر معرفی کرد: 1ـ Long Life؛ 2ـ SRP130؛ 3ـ Stain Repellent AKEMI؛ و 4ـ PTS^{+}.

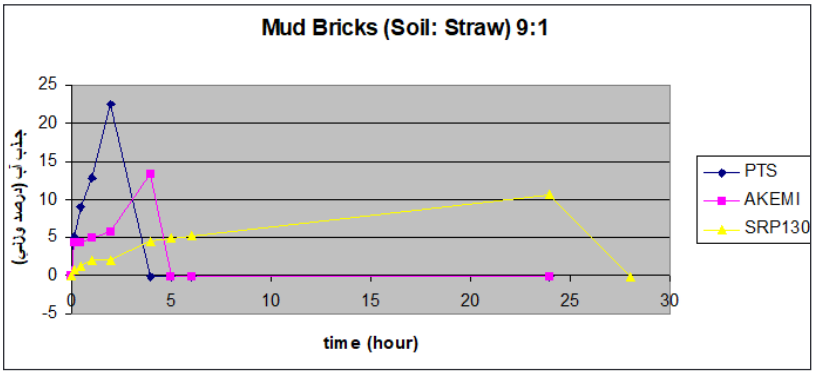
برای بررسی دقیق‌تر تأثیر اجزای سازنده خشت (کاه، ماسه و دانه‌بندی ذرات) بر کیفیت تأثیر هر یک از مواد شیمیایی، نتایج مربوط به آزمون جذب آب (غوطه‌وری) در سه مرحله، برای هر ماده به‌صورت مجزا در اشکال ۱۵ تا ۱۷ ارائه شده است. شکل ۱۵ به بررسی کیفیت درمان خشت‌های مختلف با ماده آب‌گریز SRP130 پرداخته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این مورد نیز خشت‌های دارای ساختمایه خاک و کاه (نسبت ۹ به ۱) بهترین نتایج را ارائه کرده‌اند. به نظر می‌رسد که این موفقیت رابطه مستقیمی با زاویه تماس ایجادشده در سطح دارد. در مورد خشت‌های دارای ساختمایه خاکی ـ ماسه‌ای، الگوی تخریب تقریباً مشابه است.

شکل ۱۶ کیفیت درمان خشت‌های مختلف با ماده



شکل ۱۴. انجام آزمون غوطه وری بر روی نمونه های خشتی درمان شده؛

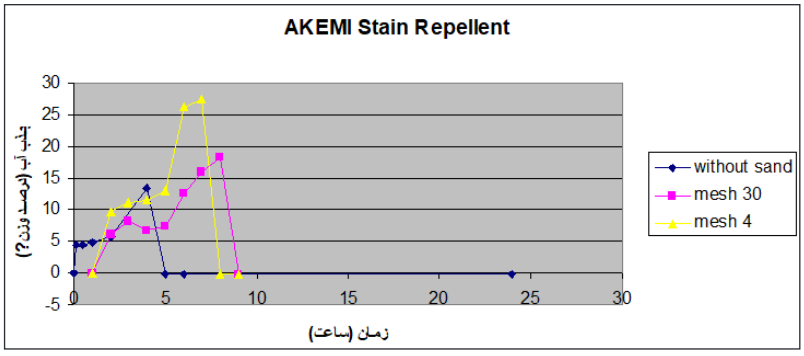
راست: پیشرفت مراحل تخریب در نمونه درمان‌شده باStain Repellent Akemi، چپ: مقاومت نمونه درمان‌شده با Ling Life.



شکل ۱۵. مقایسه جذب آب (غوطه‌وری) در ترکیب خشت‌های درمان‌شده مختلف با ماده آب‌گریز SRP130.

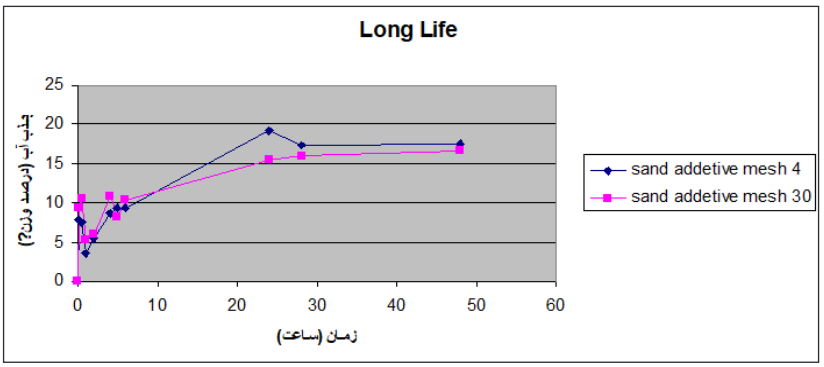
(ترکیب خشت‌ها: خاک و کاه بدون ماسه با نسبت ۹ به ۱ و ترکیب ماسه دانه‌بندی الک‌های شماره ۳۰ و ۴ و خاک با نسبت ۱ به ۴).

آب‌گریز Stain Repellent AKEMI را نشان می‌دهد. در این مورد نیز تناسب مستقیمی بین افزایش زاویه تماس و مقاومت در برابر جذب آب مشاهده می‌شود. نمونه خشت‌های دارای ساختمایه حاوی دانه‌های ماسه، نسبت به نمونه‌های دارای افزودنی کاه، مقاومت بیشتری را در برابر غوطه‌وری نشان داده‌اند. همچنین، نمونه‌هایی که در آن‌ها از ذرات ماسه با دانه‌بندی بزرگ‌تر استفاده شده است، زودتر به نقطه اوج جذب آب خود می‌رسند و حدود یک ساعت زودتر تخریب می‌شوند. میزان جذب آب در نمونه‌های دارای ماسه



شکل ۱۵. مقایسه جذب آب (غوطه‌وری) در ترکیب خشت‌های درمان‌شده مختلف با ماده آب‌گریز SRP130.

(ترکیب خشت‌ها: خاک و کاه بدون ماسه با نسبت ۹ به ۱ و ترکیب ماسه دانه‌بندی الک‌های شماره ۳۰ و ۴ و خاک با نسبت ۱ به ۴).



شکل ۱۷. مقایسه جذب آب (غوطه‌وری) در ترکیب خشت‌های درمان‌شده مختلف با ماده آب‌گریز Long Life.
(ترکیب خشت‌ها: ماسه دانه‌بندی الک‌های شماره ۳۰ و ۴ و خاک با نسبت ۱ به ۴).

دانه‌درشت بیشتر از نمونه‌های دارای ماسه ریزدانه است.

شکل ۱۷ به بررسی کیفیت درمان خشت‌های مختلف با ماده آب‌گریز Long Life پرداخته است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، به دلیل تأخیر در دریافت نمونه، آزمون مرحله اول انجام نشد؛ بنابراین، دو حالت مقایسه‌شده در این بررسی، هر دو شامل خشت‌هایی با ساختمایه حاوی ماسه هستند. نتایج نمودار نشان می‌دهد که نمونه‌های دارای ماسه دانه‌درشت، مقدار اندکی آب بیشتری جذب می‌کنند. بااین‌حال، این مسئله تأثیر محسوسی بر مقاومت آن‌ها در برابر رطوبت ندارد. میزان جذب آب نمونه‌ها پس از ۲۰ ساعت تقریباً ثابت می‌ماند و با توجه به روند نمودار، به نظر نمی‌رسد که حتی در بازه‌های زمانی بسیار طولانی، میزان جذب آب از ۲۰ درصد فراتر رود. پایداری خشت‌ها در شرایط غوطه‌وری پس از گذشت یک ماه نیز این فرضیه را تأیید می‌کند.

ج) بررسی عمق نفوذ مؤثر ماده آب‌گریز در خشت

برای بررسی میزان نفوذ آب‌گریز در عمق خشت، از نمونه‌های درمان‌شده مقاطع عرضی تهیه شد تا امکان مشاهده رفتار آب‌گریزی در لایه‌های داخلی فراهم گردد. در این آزمایش، نمونه‌ها از سطح بیرونی به‌تدریج مرطوب شده و میزان مقاومت آن‌ها در برابر نفوذ آب مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله اول، عمق نفوذ در خشت‌هایی با ساختمایه خاک و کاه (به نسبت ۹ به ۱) مطالعه شد. این بررسی چند ویژگی برجسته از روش‌های درمانی را آشکار کرد، از جمله اینکه هیچ‌یک از مواد شیمیایی مورداستفاده نتوانستند خشت‌ها را به‌طور کامل و یا حتی در یک ضخامت زیاد، آب‌گریز کنند. این مسئله زمانی آشکارتر می‌شود که ضخامت نمونه‌های آزمایشگاهی با خشت‌های واقعی مقایسه شود.

با وجود نتایج مثبتی که در آزمون‌های جذب قطره و غوطه‌وری مشاهده شد، میزان نفوذ مؤثر مواد شیمیایی به حدی نبود که بتواند تمام ضخامت خشت را آب‌گریز کند؛ بنابراین، بدنه خشت همچنان در برابر رطوبت آسیب‌پذیر باقی ماند. در نتیجه، سایش‌های مکانیکی همچنان یکی از چالش‌های اساسی این روش درمانی محسوب می‌شوند، زیرا می‌توانند اثرات مثبت آب‌گریزکننده‌ها را محدود کنند. یکی از مشکلات عمده محلول‌های سیلیکاتی قلیایی مانند PTS^{+}، عمق نفوذ پایین آن‌هاست. در این بررسی، بیشترین میزان نفوذ مربوط به SRP130 بود، اما این میزان نیز تنها چند میلی‌متر فراتر نرفت. علاوه بر کم‌عمق بودن نفوذ آب‌گریزکننده‌ها، بررسی مقاطع عرضی نمونه‌ها نشان داد که نفوذ مواد در سطوح فوقانی و تحتانی خشت نیز یکنواخت نیست. این عدم یکنواختی احتمالاً ناشی از تفاوت تخلخل در بخش‌های مختلف خشت است. به‌طور خاص، تجمع ذرات سنگین‌تر در لایه‌های پایینی خشت و سبک‌تر شدن نسبی بخش‌های فوقانی طی فرآیند خشک شدن، موجب تفاوت در میزان نفوذ آب‌گریزکننده در

جدول۲: عمق نفوذ مؤثر مواد استحکام‌بخش در نمونه‌های خشتی با افزودنی کاه (۹ : ۱)۰

نوع ماده درمان‌کننده	حداکثر نفوذ مؤثر استحکام‌بخش (mm)
Stain Repellent AKEMI	۰۲۵
SRP130	۱
PTS^+	۰/۱۰

ساختار خشت شده است۰

این یافته‌ها بار دیگر نشان داد که تخلخل و فشردگی بافت خشت، عامل مهمی در موفقیت یا عدم موفقیت روش‌های درمانی است. بر همین اساس، برای بهبود کیفیت خشت‌های مرمتی، مطالعه دقیق‌تری درباره نسبت بهینه تخلخل آن‌ها ضروری است. خشت‌های مرمتی باید علاوه بر برخورداری از استحکام و مقاومت فشاری مناسب، قابلیت جذب و نفوذ مواد آب‌گریز را نیز داشته باشند. جدول زیر میانگین عمق آب‌گریزسازی را برای هر یک از مواد بررسی‌شده در این مطالعه نشان می‌دهد۰

همان‌طور که در سطور فوق اشاره شد، برای پیشرفت در انجام درمان‌های پیشنهادی لازم بود تا در مورد نفوذ مواد در خشت اقداماتی انجام شود. نفوذ محلول‌های شیمیایی در یک ماده متخلخل علاوه بر ویژگی‌های حلال و همچنین به تخلخل مصالح وابسته است. به همین ترتیب برای افزایش نفوذ این محصولات در بافت خشت راهکارهای زیر وجود دارد۰

- تغییر خواص مربوط به محصول آبگریزکننده شامل: حلال، قطر ذرات آبگریزکننده، حذف عوامل محدودکننده واکنش.
- تغییر تخلخل در مصالح

دسته اول از این عوامل مربوط به خواص طراحی محصول می‌باشند. در این زمینه با توجه به عدم قابلیت ماده PTS^+ در نفوذ و آبگریزکردن مناسب خشت‌ها، نسبت به حذف این ماده از فهرست مواد مورد مطالعه و جایگزینی آن با ماده تجاری Long Life که بر اساس گزارش‌های فنی آن از وزن مولکولی پایین و قابلیت نفوذ بیشتری برخوردار بود، اقدام شد. همچنین با توجه به محدودیت‌های موجود در اصلاح خواص مواد شیمیایی، برای پژوهشگران در این مقطع نسبت به بهینه‌سازی نسبت‌های میان اجزاء سازنده خشت نیز مطالعه شد. در این مورد سعی شد به نحوی عمل شود که تخلخل خشت تا حد ممکن در جهت افزایش نفوذ مواد شیمیایی در ساختار خشت افزایش یابد. عواملی که در این مسیر باید در نظر گرفته می‌شد عبارت بودند از: ۱ــ تا حد امکان با افزایش تخلخل خشت، امکان نفوذ عامل آبگریزکننده در خشت افزایش یابد؛ ۲ــ مقاومت فشاری خشت در حد مناسبی باقی بماند؛ و ۳ــ نفوذ عامل آبگریزکننده در سطوح فوقانی و تحتانی خشت در موقع قالب‌گیری مشابه بماند. برای رسیدن به این منظور، اقدامات زیر قابل پیشنهاد به نظر می‌رسد: ۱ــ افزایش میزان کاه در بافت خشت از نسبت ۱ به ۹ به نسبت‌های ۱ به ۸، ۱ به ۷ و ۱ به ۶ (البته این کار از استحکام خشت می‌کاهد)؛ ۲ــ افزودن ماسه به بافت خشت؛ و ۳ــ برگرداندن خشت در حال خشک شدن پس از قالب‌گیری.

در مرحله دوم، از خشت‌های دارای ساختار ماسه و خاک (۱ به ۴) استفاده شد. استفاده از ماسه در ساختار خشت می‌تواند به سبب ساختار سیلیسی خود همچون پلی برای رساندن ایجاد خاصیت آب‌گریزی در عمق بیشتری از خشت عمل کند. همچنین دانه‌های بزرگ و کوچک ماسه می‌توانند به افزایش تخلخل خشت کمک کرده و مانع از فشردگی بیش از حد ساختار شوند که مانع نفوذ کافی محلول شیمیایی به عمق ساختار خشت شود. چنان‌که در بخش‌های قبلی مشاهده شد، کاربرد ماسه الزاماً به بهبود خواص آب‌گریزی منجر نشد و در مورد خشت‌های درمان‌شده با SRP130، منجر به کاهش زاویه تماس قطرات آب با سطح خشت و در نتیجه افت خواص آن گردید. در مقابل، این کار در مورد Stain Repellent AKEMI و همچنین Long Life موفقیت‌آمیز بود (شکل ۱۸). جدول زیر عمق نفوذ محاسبه‌شده را برای این سه ماده استحکام‌بخش در مورد خشت‌های دارای ساختار

جدول ۳: عمق نفوذ مؤثر مواد استحکام‌بخش در نمونه‌های خشتی با افزودنی ماسه (۴ :۱).

ردیف	دانه‌بندی ماسه	نوع ماده درمان‌کننده	حداکثر نفوذ مؤثر استحکام‌بخش (mm)
۱	الک ۴	Stain Repellent AKEMI	۰/۳
۲	الک ۳۰	Stain Repellent AKEMI	۰/۹
۳	الک ۴	SRP130	۰/۸۴
۴	الک ۳۰	SRP130	۱/۱۵
۵	الک ۴	Long Life	۲/۴
۶	الک ۳۰	Long Life	۲/۶

ماسه‌ای درشت‌دانه (عبور کرده از الک ۴) و ریزدانه (عبور کرده از الک ۳۰) نشان می‌دهد.

نتایج حاصل از بررسی عمق نفوذ بسیار قابل‌توجه است. رزین سیلوکسان تجاری Long Life در مقایسه با سایر گزینه‌ها از نفوذ به‌مراتب بیشتری برخوردار است. این ویژگی امتیازات کاربردی خاصی را برای

شکل ۱۸. عمق نفوذ مواد استحکام‌بخش در بافت مقاطع نمونه خشتی با ترکیب ماسه دانه‌بندی الک شماره ۳۰ و خاک با نسبت ۱ به ۴؛ راست: عمق نفوذ ماده SRP130 و چپ: عمق نفوذ Long Life.

این ماده فراهم می‌کند که می‌تواند در برابر نقاط ضعف آن جبران‌کننده باشد. عمق نفوذ بالا موجب افزایش پایداری درمان در برابر سایش می‌شود، زیرا حذف لایه‌ای از سطح خشت در گذر زمان نمی‌تواند اثرات این ماده را به‌راحتی از بین ببرد. علاوه بر این، نفوذ بالای ماده آب‌گریز، دلیل پایداری بیشتر آن در شرایط غوطه‌وری را نیز توضیح می‌دهد. این قابلیت‌ها به‌خوبی ضعف Long Life در ایجاد زاویه تماس مناسب با قطرات باران را جبران می‌کند.

اهمیت این مسئله به‌ویژه زمانی آشکار می‌شود که انتقادات مربوط به رفتار غیرطبیعی مصالح پس از درمان با سایر گزینه‌ها را در نظر بگیریم. در سایر موارد، عدم جذب آب و جاری شدن ناگهانی قطرات، مانند آنچه در مورد SRP130 مشاهده شد، نگرانی‌هایی را در مورد انتقال رطوبت بیشتر به بخش‌های مجاور و محافظت‌نشده ایجاد کرده بود. در مقابل، در نمونه‌های درمان‌شده با Long Life، قطرات باران به‌آرامی با سطح خشت تماس برقرار کرده، بخش اندکی از آن که قادر به تخریب خشت نیست جذب می‌شود و باقی‌مانده آن نیز به‌صورت کنترل‌شده و تدریجی از سطح خشت سُر می‌خورد. افزودن ماسه به ساختار خشت‌های درمان‌شده با Stain Repellent AKEMI موجب بهبود خواص آب‌گریزی و افزایش نفوذ این ماده در بافت خشت شده است؛ اما در مورد SRP130 تغییر محسوسی در عمق نفوذ مشاهده نشد و با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از آزمون غوطه‌وری، به نظر می‌رسد که بخشی از خواص خود را نیز از دست داده است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در مجموع، آزمون‌های انجام‌شده به نتایج زیر منجر شد.

- استفاده از محصولات شیمیایی مورد بررسی در این مطالعه، یا مواد مشابه آن‌ها، امکان افزایش مقاومت خشت در برابر رطوبت را به‌طور قابل‌توجهی فراهم می‌کند.
- در صورتی که این مواد برای حفاظت از بقایای معماری خشتی مورد استفاده قرار گیرند، لازم است رفتار آن‌ها در تماس‌های طولانی‌مدت با رطوبت و در نقاطی که به‌طور مداوم مرطوب هستند، به‌طور

دقیق مورد بررسی قرار گیرد. این مطالعه نشان داد که مجموعه‌ای از مواد شیمیایی تجاری که در نگاه اول ویژگی‌های مشابهی دارند، در واقع دارای خواص کاملاً متفاوتی هستند. این تفاوت‌ها تنها در یک بررسی دقیق در ابعاد ماکرو و میکروسکوپی قابل شناسایی است؛ بنابراین، انتخاب ماده مناسب باید تنها پس از انجام مطالعات کافی آزمایشگاهی و در نظر گرفتن ویژگی‌های ساختاری خشت‌های مورد درمان صورت گیرد.

– نفوذ کم این محصولات در بافت خشت منجر به تشکیل یک لایه نازک آب‌گریز در سطح آن می‌شود که از نظر رفتاری با بخش داخلی خشت تفاوت زیادی دارد. این مسئله، از یک‌سو، می‌تواند در تماس طولانی با رطوبت منجر به ایجاد تنش‌هایی شود که احتمال تخریب جدی‌تر، به‌ویژه در سازه‌های خشتی بزرگ را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، تمام خواص مطلوب ناشی از این درمان، به وجود همین لایه نازک سطحی وابسته است که در برابر فرسایش بسیار آسیب‌پذیر است. سایش‌های مکانیکی طبیعی در سازه‌های خشتی، نظیر اثر باد، تردد بازدیدکنندگان و سایر عوامل محیطی، می‌تواند این لایه نازک را خیلی زود از سطح خشت جدا کند و در نتیجه، تمام خواص درمانی از بین برود. با توجه به این مسئله، لازم است اقداماتی برای افزایش میزان نفوذ ماده استحکام‌بخش در ساختار خشت و توزیع همگن‌تر خاصیت آب‌گریزی در ضخامت آن انجام شود. این امر می‌تواند مقاومت خشت را هم در برابر تماس طولانی‌مدت با رطوبت و هم در برابر عوامل فرسایش مکانیکی، به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد. از میان موادی که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفتند، تنها ماده تجاری Long Life توانست عمق نفوذ مناسبی را فراهم کند و در بخش‌های مختلف خشت به‌طور همگن توزیع شود.

همچنین در تکمیل و توسعه پژوهش موارد زیر پیشنهادی می‌گردد:

– با توجه به نتایج موفق این مطالعه در مقیاس آزمایشگاهی، اجرای آزمایش‌های میدانی مشابه برای مصالح خشتی می‌تواند بسیار مفید باشد. به‌ویژه با در نظر گرفتن نزدیکی فصل بارندگی، فراهم‌سازی شرایطی برای درمان بخشی از یک سازه خشتی نمونه در معرض فرسایش واقعی، ضروری به نظر می‌رسد. در این راستا، می‌توان برنامه‌ریزی جامعی برای مطالعه میدانی رفتار خشت‌های درمان‌شده انجام داد. این برنامه شامل اندازه‌گیری عوامل مربوط به کارایی پوشش حفاظتی در محل، نظیر سنجش میزان جذب آب، آزمون قطره، رنگ‌سنجی و سایر آزمایش‌های مرتبط، با بهره‌گیری از تجربیات به‌دست‌آمده در بخش آجر خواهد بود؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود که تحقیقات به مقیاس میدانی گسترش یابد و به‌صورت محدود در یکی از محوطه‌های خشتی اجرا شده و نتایج آن مورد بررسی قرار گیرد.

– طراحی و بهینه‌سازی یک ماده استحکام‌بخش مناسب برای حفاظت از آثار خشتی از اهمیت و اولویت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به اینکه اغلب مواد تجاری موجود در بازار مرمت عمدتاً برای حفاظت از سنگ و آجر طراحی شده‌اند و کمتر به درمان خشت و مصالح مشابه آن پرداخته شده است، این موضوع نیازمند مطالعات گسترده‌تری است. با توجه به نتایج ارزشمند مطالعه مقدماتی حاضر، ماده شیمیاییLong Life، بسیاری از ویژگی‌های مطلوب برای کاربرد گسترده در حفاظت از مصالح گلی را دارد، به‌ویژه در مواردی که مرمتگر قصد ندارد سطح خشت یا تزئینات گلی را با کاه‌گل بپوشاند. مطالعه بر روی ساختار و خواص این ماده تجاری و تلاش برای بهینه‌سازی آن، می‌تواند نتایج ارزشمندی را در راستای بومی‌سازی و توسعه فناوری‌های پلیمری در حفاظت از بقایای معماری حاصل از کاوش‌های باستان‌شناسی و همچنین بافت‌های شهری خشتی به همراه داشته باشد.

حامیان مالی و معنوی

مقاله حاضر بخشی از نتایج طرح پژوهشی نگارندگان با عنوان "بررسی کاربرد مواد پلیمری در حفاظت مواد و مصالح تاریخی" است که در سال‌های ۱۳۸۷–۱۳۸۸ با حمایت مادی و معنوی پژوهشکده حفاظت و مرمت

آثـار تاریـخی – فرهنـگی بـه انجـام رسیـده اسـت.

پی‌نوشت‌ها

۱. جهـت اطلاعـات مـاده Stain Repellent AKEMI بـه وبـگاه مقابـل رجـوع گـردد: https://stein.akemi.de .

۲. جهـت اطلاعـات مـاده Hawisil SRP130 بـه وبـگاه مقابـل رجـوع گـردد: https://www.wacker.com .

۳. جهـت اطلاعـات مـاده PTS^{+} بـه وبـگاه مقابـل رجـوع گـردد: http://www.dynacreat.com .

۴. جهـت اطلاعـات مـاده Impermeabilizante 10 AG Long Life بـه وبـگاه مقابـل رجـوع گـردد: https://satecma.es.

۵. در ایـن پژوهـش نسـبت‌های ترکیـب خـاک، ماسـه و کاه در نمونه‌هـای خشـتی بـر اسـاس تجـارب تهیـه خشـت‌های مرمـتی در محوطـه تاریـخی چغازنبیـل تعیین‌شـده اسـت.

منابع

ارشـاد لنگـرودی، امیـر؛ رحیـمی، اعظـم؛ وطن‌دوسـت، عبدالرسـول؛ فـدایی، حمیـد؛ و وحیـدزاده، رضـا. (۱۳۹۱). مقایسـه دو رزیـن سیلوکسـان تجـاری بـرای حفاظـت آجرهـای چغازنبیـل. در: مجموعـه مقـالات هشـتمین همایـش حفاظـت و مرمـت اشیـاء تاریـخی ــ فرهنـگی و تزئینـات وابسـته بـه معمـاری، تهـران، ۱۳۸۶. (صـص. ۲۷۸-۲۷۳). تهـران: پژوهشـگاه میـراث فرهنـگی و گردشـگری.

تیتونیکـو، ج. م. (۱۳۸۵). راهنمـای آزمایشـگاهی بـرای حفاظتگـران بنـا. مترجـم منیـژه هادیـان دهکـردی، مترجم. نشـر هادیـان.

رحیـمی، اعظـم. (۱۳۸۳). سیلیکون‌ها. انجمن پلیمر ایران.

فـدایی، حمیـد؛ و وحیـدزاده، رضـا. (۱۳۸۹). بـررسی حفاظـت پلیمـری تزئینـات آجـری موجـود در فضـای بـاز چغازنبیـل. فصلنامـه اثـر، ۵۱، ص ۵۸-۷۲.

Al-Dosari, M.A., Darwish, S.S., Adam, M.A., Elmarzugi, N.A., Al-Mouallimi, N., & Ahmed, S.M. (2017). Ca(OH)2 Nanoparticles Based on Acrylic Copolymers for the Consolidation and Protection of Ancient Egypt Calcareous Stone Monuments. J. Phys.: Conference Series, 829, 1-8.

Ashurst, J., & Ashurst, N. (1998). Brick, terracotta and earth (Vol. 2). Gower Technical Press.

Aslanidou, D., Karapanagiotis, I., & Panayiotou, C. (2016). Tuning the wetting properties of siloxane-nanoparticle coatings to induce superhydrophobicity and superoleophobicity for stone protection. Materials & Design, 108, 736-744. https://doi.org/10.xxxx/yyyy.

Ershad-Langroudi, A., & Sadat-Shojai, M. (2009). Siloxane-Based Coatings as Potential Materials for Protection of Brick-Made Monuments. J. Color Sci. Tech, 3, 177-187.

Guillaud, H. (2000). CRATerre-EAG course notes, workshop on conservation and management of earthen architecture, Haft Tappeh and Tchogha Zanbil, Iran.

Mohammadi, F., & Ershad-Langroudi, A. (2014). Structural Characteristics and Corrosion Behavior of Acrylic/Silica Nanocomposite Coatings. Adv. Mat. New Coat. (AMNC), 9, 643-652.

Mora, P., Mora, L., & Philippot, P. (1984). Conservation of wall paintings. Butterworths.

Tesser, E., Antonelli, F., Sperni, L., Ganzerla, R., & Maravelaki, N. P. (2014). Study of the stability of siloxane stone strengthening agents. Polymer Degradation and Stability, 110, 232-240. https://doi.org/10.xxxx/yyyy.

Torraca, G. (1982). Porous building materials (2nd ed.). ICCROM.

Wacker-Chemie GmbH. (1999). Wacker BS® silicones for stone conservation. Munich.

Wacker-Chemie GmbH. (2002). Wacker BS® damp-proofing with silicones. Munich.