

Evaluation of the Impact of Nano-Absorptive Waterproofing on the Reduction of Water Absorption in Sand-Cement Mortar Used in the Historical Restoration of Persepolis

Habib Meshkinfam Fard ¹, Mohammad Hassan Talebian ^{2*}

1. Master's Degree in Restoration and Conservation of Architectural Heritage, Department of Restoration of Historic Buildings and Textures, School of Architecture, College of Fine Arts, University of Tehran, Tehran, Iran.

2. Professor, Department of Architecture, School of Architecture, College of Fine Arts, University of Tehran, Tehran, Iran.

Abstract

The structure of Persepolis is subjected to various factors that cause erosion and decay due to moisture. The cement mortars used in past restorations are one of the challenges in preserving this grand stone monument. Over time, these mortars, due to higher water absorption than the stone, have exacerbated the destructive effects of moisture, causing serious but gradual and irreversible damage. Since removing these mortars and replacing the past restorative measures to improve the current situation is extremely difficult and may have damaging consequences for these valuable artifacts, this research aims to evaluate the impact of nano waterproof coatings on reducing the moisture absorption of the used cement mortars through comprehensive studies on the current state of these monuments and the restorations carried out with cement. Therefore, this research aims to provide a suitable solution without needing to remove the cement mortar and with minimal intervention to protect these artifacts. This study employs an experimental research method and considers theoretical concepts within laboratory studies. In this process, two types of Iranian and foreign nano waterproof coatings named Zycosil Max and FarazSil were applied on similar cement mortar samples, and their permeability and water absorption were evaluated using water absorption percentage and capillarity tests. The results showed that both waterproof coatings effectively reduced the cement mortars water absorption. Zycosil Max, with a performance of %60.5, and Faraz Sil, with a performance of %48.02, significantly reduced the water absorption of the cement mortar, with Zycosil Max showing better performance than FarazSil. However, considering that the water absorption percentage did not reach close to that of the stone samples of Persepolis and the more than tenfold difference in water absorption percentage, none of the studied materials are recommended for waterproofing the cement mortar used in the restoration of the Persepolis monument.

Keywords: Persepolis, Stone Conservation, Nanotechnology, Cement Mortar, Waterproofing.



**Knowledge of
Conservation and
Restoration.**

Vol. 7(1) No.19
May 2024

<https://kcr.richt.ir>

Pages: 1 to 20

Corresponding Author

**Mohammad Hassan
Talebian**

Professor, Department of
Architecture, School of
Architecture, College of Fine
Arts, University of Tehran,
Tehran, Iran.

Email

mh.talebian@ut.ac.ir

ارزیابی تأثیر عایق رطوبتی جذبی نانو بر کاهش جذب آب ملاط ماسه‌سیمان مورد استفاده در مرمت‌های گذشته تخت‌جمشید

حبیب مشکین‌فام فرد^۱، محمدحسن طالبیان^۲

۱. کارشناسی ارشد مرمت و احیای ابنیه و بافت‌های تاریخی، دانشکده‌گان هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲. استاد گروه معماری، دانشکده معماری، دانشکده‌گان هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

چکیده

بنای تخت‌جمشید تحت تأثیر عوامل مختلف در معرض فرسایش و تخریب ناشی از رطوبت است و ملاط‌های سیمانی مورد استفاده در مرمت‌های گذشته، یکی از چالش‌های حفاظت این مجموعه فاخر سنگی است. این ملاط‌ها با گذشت زمان، به دلیل جذب آب بیشتر نسبت به سنگ، موجب تشدید نتایج مخرب رطوبت و بروز آسیب‌های جدی اما تدریجی و غیرقابل جبران شده‌اند. از آنجا که حذف این ملاط‌ها و جایگزین کردن اقدامات مرمتی گذشته به‌منظور بهبود وضعیت موجود کار بسیار دشواری است و ممکن است پیامدهای آسیب‌زایی برای این آثار ارزشمند داشته باشد، در این پژوهش تلاش شده است تا با انجام مطالعات جامع پیرامون وضعیت موجود این آثار و مرمت‌های انجام شده با سیمان، تأثیر عایق‌های رطوبتی نانو بر کاهش جذب رطوبت ملاط‌های سیمانی استفاده‌شده، ارزیابی شود؛ بنابراین، هدف از این پژوهش ارزیابی راه‌کاری نوین بدون نیاز به حذف ملاط سیمانی و با مداخله محدودتر، برای حفاظت از این آثار است. در این مطالعه از روش تحقیق کاربردی و ترکیبی بهره گرفته شده و با درنظر گرفتن مفاهیم نظری در قالب مطالعات آزمایشگاهی انجام شده است. در این فرایند، آزمون‌های موینگی و درصد جذب آب نمونه‌های شاهد ملاط سیمانی و دو نوع عایق رطوبتی نانو ایرانی و خارجی با نام‌های فرازیل^۱ و زایکوسیل‌مکس^۲ بر روی نمونه‌های شاهد ملاط سیمان مشابه اعمال شده و نفوذپذیری و میزان جذب آب آنها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بررسی‌ها نشان داد که هر دو عایق رطوبتی در کاهش جذب آب ملاط سیمانی مؤثر هستند. زایکوسیل‌مکس با عملکرد ۶۰/۵ درصد و فرازیل با عملکرد ۴۸/۰۲ درصد، جذب آب ملاط سیمانی را کاهش دادند و زایکوسیل‌مکس عملکرد بهتری از فرازیل نشان داد؛ اما با توجه به عدم دستیابی به درصد جذب آب نزدیک به نمونه سنگ‌های تخت‌جمشید و اختلاف بیش از ۱۰ برابری درصد جذب آب، هیچ یک از مواد مورد مطالعه برای ضدآب‌سازی ملاط سیمانی مورد استفاده در مرمت بنای تخت‌جمشید پیشنهاد نمی‌شوند.

واژگان کلیدی: تخت‌جمشید، حفاظت سنگ، فناوری نانو، ملاط سیمان، ضدآب کردن.



فصل‌نامه دانش حفاظت و مرمت

سال هفتم، شماره ۱

شماره پیاپی ۱۹، بهار ۱۴۰۳

<https://kcr.richt.ir>

صفحات: ۱ تا ۲۰

نویسنده مسئول

محمدحسن طالبیان

استاد گروه معماری، دانشکده معماری،

دانشکده‌گان هنرهای زیبا، دانشگاه تهران،

تهران، ایران.

رایانامه

mh.talebian@ut.ac.ir

مقدمه

زیرا تخریب معمولاً از لایه‌های بیرونی آغاز می‌شود. این پوشش‌ها با کمک به حفاظت پیشگیرانه و پایدار می‌تواند آسیب‌ها و هزینه‌های تحمیلی مکرر را کاهش دهند. فناوری نانو همچنین می‌تواند با کاهش تأثیر آلودگی‌های سطحی و دفع رطوبت مانع فرآیندهای مخرب و خدشه‌دار شدن وجه زیبایی‌شناسی آثار شود (Quagliarini et al., 2013). بنابراین، با توجه به محدودیت‌هایی که در مطالعه و پژوهش پیرامون حفاظت و مرمت آثار سنگی تاریخی وجود دارد و نیز شرایط اضطراری این آثار در فضاهای باز، استفاده از فناوری نانو با توجه به خصوصیات و پیشینه استفاده از آن، می‌تواند بسیار مفید باشد (Razani & Nemani, 2020). این فناوری، با ارائه راه‌حل‌های نوین و مؤثر، پتانسیل بالایی در کاهش آسیب‌های ناشی از رطوبت و بهبود عملکرد مواد مورد استفاده برای مرمت دارد. در این راستا، تلاش شده است با بررسی تأثیر عایق‌های رطوبتی نانو بر کاهش جذب رطوبت ملاط‌های سیمانی، کارایی آنها را بر روی ملاط‌های مورد استفاده در مرمت‌های گذشته تخت‌جمشید ارزیابی کنیم تا بتوانیم راهکاری عملی و پایدار برای حفاظت بهتر از این میراث ارزشمند ارائه دهیم. نتایج این پژوهش می‌تواند گامی مؤثر در ترویج استفاده از فناوری‌های پیشرفته در فرایند حفاظت و مرمت آثار تاریخی و فرهنگی باشد.

پیشینه پژوهش

حفاظت از اثر از زمان ساخت آن آغاز می‌شود و این فرایند برای برخی از آثار معماری تاریخی، قرن‌ها است که ادامه دارد. این فرایند طولانی و پیوسته است و نیاز به توجه و مراقبت دائمی دارد (Kennedy, 2015). با ارزش‌ترین سند جهانی حفاظت از آثار کهن ایران در ستون چهارم کتیبه بیستون بند ۶۵ قرار دارد که "داریوش شاه گوید: تو که از این پس این نوشته را که نوشتم یا این پیکره‌ها را ببینی تا هنگامی که توانا هستی آن‌ها را نگاهدار" (Nikooei, 2010) که بیانگر تاریخ و تمدن و توجه به حفاظت از آثار تاریخی برای ارسال پیام و اندیشه به نسل‌های بعدی است.

یکی از چالش‌های اصلی حفاظت گران و پژوهشگرانی که بر روی مرمت سنگ کار می‌کنند، یافتن راه‌کارهایی برای جلوگیری یا به تأخیر انداختن فرسایش آثار تاریخی سنگی است که گنجینه‌های بسیار ارزشمند و غیرقابل جایگزین هستند. حفاظت از میراث سنگی به دلیل وجود متغیرهای متعددی که در فرایند شناسایی آسیب‌ها و اقدام‌ها حفاظتی وجود دارد، اقدامی بسیار حساس و پیچیده است (Capitelli et al., 2021). تخت‌جمشید یکی از پایتخت‌های مهم امپراتوری هخامنشی است که توسط داریوش بزرگ در ۵۱۸ ق.م ساخته شده است. این مجموعه یکی از بناهای وسیع و شاخص سنگی ایران است که در سال ۱۳۱۰ به ثبت ملی در ایران رسیده است (Abdollahi & Samanian, 2018). این مجموعه همچنین، در سال ۱۳۵۸ با شماره ۱۱۴ در فهرست میراث جهانی یونسکو با معیارهای (i, iii, vi) قرار گرفت (Ibid). فرسودگی یک آسیب برگشت‌ناپذیر است و متأسفانه، میراث جهانی تخت‌جمشید و آثار موجود در عرصه‌های آن نیز از گزند عوامل دخیل در فرسودگی در امان نبوده‌اند. طی سال‌ها، این آثار با ارزش در معرض عوامل فرساینده قرار گرفته‌اند (Sohrabi et al., 2020). یکی از عوامل فرسایش مهم در بناهای تاریخی، می‌تواند ناشی از مواد و روش‌های به‌کار گرفته شده در مرمت‌های قبلی باشد. برای مثال، در تخت‌جمشید، استفاده از ملاط ماسه‌سیمان برای انجام مرمت، باعث آسیب‌های جدی به سنگ‌های باستانی شده است. آثار تخریبی ملاط ماسه سیمان باقی‌مانده از مرمت‌های گذشته در محل اتصال به سنگ‌ها کاملاً مشخص است (Abed, 2008) (Isfahani & Harati Ardestani, 2008).

از سوی دیگر، حذف و جایگزین کردن این ملاط‌ها نیز می‌تواند آسیب‌رسان باشد؛ بنابراین، مطلوب است در صورت امکان روش‌هایی به‌کار گرفته شود که عوارض رطوبت، ملاط سیمانی مورد استفاده در مرمت‌های گذشته بدون حذف و با روش کاهش جذب رطوبت سطحی کاهش دهد پوشش‌های سطحی نانو می‌توانند بهبود قابل توجهی در مصالح مورد استفاده در مرمت و حفاظت از میراث معماری داشته باشند.

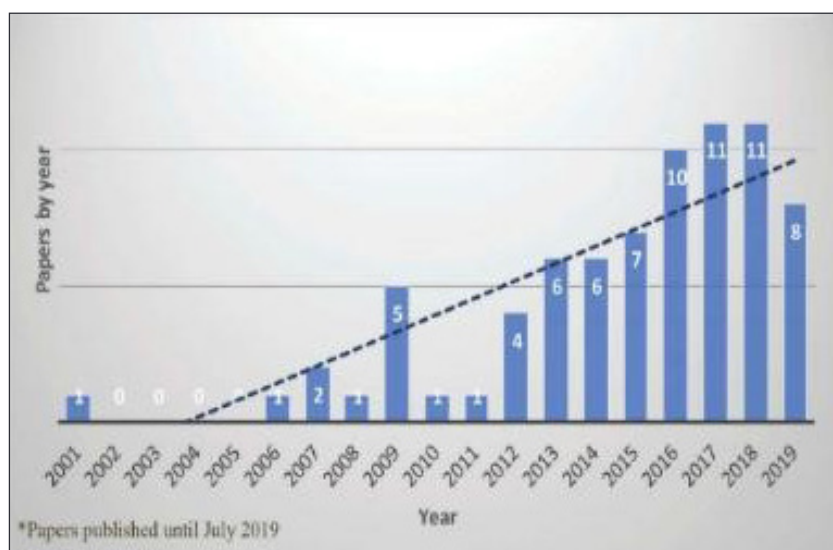
رویکرد علمی نوین در تمامی عرصه‌های علمی به ویژه در حوزه حفاظت و مرمت آثار تاریخی مورد توجه قرار گرفته است. متخصصان حفاظت به همراه پژوهشگران فناوری‌های نوین به دنبال روش‌های بهبود مواد حفاظتی و مرمت پایدار با از پژوهش‌های متعدد بین‌المللی هستند. از این رو تعداد مقاله‌های سالانه استفاده از فناوری نانو در حفاظت از آثار تاریخی، بخصوص آثار سنگی افزایش داشته است (شکل ۱) که بیانگر کارایی و احساس نیاز به پژوهش‌های بیشتر در این حوزه است.

علی‌رغم اهمیت موضوع، در دو دهه گذشته تا سال ۱۳۹۹ در ایران، تنها چهار عنوان پایان‌نامه (جدول ۱) با عنوان فناوری نانو در حوزه حفاظت سنگ در ایران وجود دارد که میراث جهانی پاسارگاد مرکز توجه این پژوهش‌ها بوده است.

با بررسی این پایان‌نامه‌ها از منظر آسیب‌شناسی آثار سنگی و با در نظر گرفتن تفاوت ساختار سنگ‌ها، رطوبت به عنوان عامل مشترک در فرسایش آنها معرفی شده است و از نانو ذرات برای بهرگیری در

در اواخر قرن نوزدهم تا بیستم میلادی و در فاصله دو جنگ جهانی، موضوع حفاظت هنوز به صورت علمی مورد توجه قرار نگرفته بود، مداخلات حفاظتی به شکل امروز گسترده نبود و مرمت با مواد شیمیایی در مراحل اولیه بود. تا اینکه بتدریج با برپایی نشست‌های علمی بین‌المللی و تبادل اطلاعات بین مرمتگران، استفاده از محصولات شیمیایی برای حفاظت از سنگ رواج پیدا کرد. یکی از این رویدادهای بین‌المللی که نقش مهمی در شکل‌گیری مطالعات و روش‌های حفاظت و مرمت علمی آثار سنگی داشت، نشست بین‌المللی حفاظت از آثار سنگی تحت عنوان «سمپوزیوم بین‌المللی در مورد زوال و حفاظت از سنگ ساختمانی»^۳ بود که برای اولین بار در سال ۱۹۷۲ م، در لاروشل برگزار شد. از آن زمان، ده جلسه دیگر این سمپوزیوم نیز به طور منظم تشکیل شد و نام آن به «فرسایش و حفاظت از سنگ»^۴ تغییر کرد. اجلاس‌های بین‌المللی دیگری مانند نشست‌های «حفاظت از بناهای تاریخی در حوزه مدیترانه»^۵ نیز برگزار شد (Winkler, 2011).

در حدود دو دهه اخیر، فناوری نانو به عنوان یک



شکل ۱. تعداد مقاله‌های سالانه استفاده از فناوری نانو در حفاظت از سنگ 2001-2019 (Becerra et al., 2021).

Figure 1. Diffusion over the time of the papers related to the application of nanoparticles in stones 2001-2019 (Becerra et al., 2021).

جدول ۱. فهرست پایان‌نامه‌های فناوری نانو در حوزه حفاظت سنگ در دو دهه اخیر مأخذ (مشکین‌فام فرد، ۱۴۰۰).

Table 1. List of Nanotechnology Theses in the Field of Stone Conservation in the Last Two Decades
(Meshkinfam Fard, 2021).

عنوان، نام پژوهشگر و سال انتشار	اثر مورد بررسی	نوع سنگ	علت فرسودگی	آزمون‌ها	مواد مصرفی
بررسی استحکام بخشی و حفاظت از سنگ سیاه در محوطه میراث جهانی پاسارگاد با استفاده از پلیمر، امکان‌سنجی استفاده از نانوذرات (عطاری ۱۳۸۸).	میراث جهانی پاسارگاد	سنگ آهکی	ترک و ریز ترک‌ها و رطوبت	مقاومت فشاری زاویه تماس میکروسکوپ الکترونی	پارالوئید بی ۷۲ آلکوکسی سیلان واکر لعاب آکریلیکی لاسکو نانوذرات رس
مقایسه کاربرد دیسپرسیون نانوذرات کلسیم هیدروکسید در الکل با روش شیرآهک در استحکام بخشی آثار آهکی - (زمانیان ۱۳۸۸).	میراث جهانی پاسارگاد و تخت‌جمشید	سنگ آهکی	سختی کم سنگ و رطوبت	میکروسکوپ الکترونی درصد جذب آب درصد پوکی و تخلخل	نانوذرات کلسیم هیدروکسید
نانو فن آوری و حفاظت یادمان‌های سنگی میراث فرهنگی مطالعه موردی آرامگاه کوروش (حیدری ۱۳۹۵).	میراث جهانی پاسارگاد	سنگ کربناته	تخلخل بالا	میکروسکوپ نوری سایش سطحی	نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید کلسیم تیتانات
ارزیابی نانوذرات سیلیس در استحکام بخشی سنگ‌های ازاره بنای برج شیخ حیدر مشکین‌شهر (نعمانی خیاوی ۱۴۰۰).	ازاره سنگی برج شیخ حیدر مشکین‌شهر	سنگ سفید	شرایط آب‌وهوا و جوی منطقه	آزمون‌های مقاومت فیزیکی، پیرسازی و دوام‌داری	نانوذرات سیلیس

است (Harati Ardestani, 2003)، شیخ‌الاسلامی استفاده از ملاط ماسه‌سیمان تهیه شده با میکروسیلیس را در مرمت آثار سنگی مجموعه جهانی پارسه پاسارگاد مورد مطالعه قرار داده است (Sheikholeslami, 2008). همه پژوهش‌های انجام شده صرفاً در راستای بهبود ملاط سیمانی برای استفاده در فرایند مرمت و یا جایگزینی ملاط‌های استفاده‌شده پیشین انجام شده است و تاکنون مطالعه‌ای در راستای بررسی کاهش جذب آب ملاط‌های سیمانی و بخصوص ارزیابی عایق رطوبتی جذبی نانو بر کاهش جذب آب در ملاط ماسه‌سیمان مورد استفاده در مرمت‌های تخت‌جمشید انجام نشده است.

فرایند مرمت ترک و ریز ترک‌ها استفاده‌شده است. موضوع این پژوهش که استفاده از عایق‌های رطوبتی نانو در جهت کاهش میزان جذب رطوبت مصالح مورد استفاده مرمت کمتر مورد توجه بوده است. در راستای بهبود ملاط ماسه‌سیمان مورد استفاده در فرایند جاری مرمت‌های تخت‌جمشید، پژوهش‌های متعددی صورت گرفته است. مهدی‌نژاد با بررسی و آسیب‌شناسی سنگ‌های تخت‌جمشید، طرح مرمتی را با استفاده از نوعی جدید از ملاط سیمان آمیخته با پوزولان^۷ و آهک ساپا^۸ پیشنهاد کرده است (Mahdinejad, 1995). هراتی اردستانی با مطالعه شناخت و بهینه‌سازی ملاط ماسه‌سیمان یک قطعه از سنگ تاج طاغچه کاخ صد ستون را مرمت کرده

مواد و روش‌ها

روش تحقیق

این پژوهش بر اساس ماهیت و هدف، کاربردی است و از رویکرد ترکیبی (آمیخته) بهره می‌برد. راهبردهای مورد استفاده شامل تفسیری تاریخی، نمونه موردی، استدلال منطقی و تحلیلی و روش‌های تجربی (آزمایشگاهی مختلف) است. در این پژوهش، داده‌ها از طریق مطالعات کتابخانه‌ای، بررسی‌های آزمایشگاهی و مطالعات میدانی گردآوری شده‌اند و از روش‌های تجربی-تحلیلی بهره‌گیری شده است. در بعد نظری با راهبرد تاریخی در خصوص حفاظت نوین و منشورهای بین‌المللی، علم حفاظت و حفاظت پیشگیرانه با مطالعه کتابخانه‌ای انجام شده است. در بعد عملی با شناخت روش‌های آزمون رطوبت که در بخش روش نمونه‌سازی و شرح آزمایش‌ها توضیح داده شده است با مقایسه نمونه‌های شاهد و نمونه‌های نانو تهیه شده از نمونه‌های ملاط ماسه‌سیمان شبیه‌سازی شده مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین با راهبرد استدلال منطقی نتایج آزمون مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است.

مبانی نظری پژوهش

با بررسی و مطالعه تاریخچه شکل‌گیری، اسناد و مبانی حفاظت و مرمت مشخص می‌شود که این علم میان‌رشته‌ای بایستی از دستاوردهای سایر علوم بهره‌بردار. برای مثال، منشور آتن ۱۹۳۱ م در بخش پنجم نتایج کنفرانس توصیه می‌کند که از متخصصین علوم فیزیک، شیمی و علوم طبیعی استفاده شود. همچنین، توصیه‌نامه حفاظت ملی میراث فرهنگی و طبیعی ۱۹۷۲ م در ماده سوم و منشور ونیز ۱۹۶۴ م در ماده دوم و دهم، بهره‌گیری از فنون مدرن و پیشرفت‌های علمی و فنی در تمام شاخه‌های مطالعاتی مرتبط را الزامی دانسته‌اند؛ بنابراین، دانش حفاظت و مرمت در برهه‌ای از تغییرات خود با تمرکز بر جنبه‌های کالبدی، به سمت حفاظت علمی حرکت کرده است که بر پایه شناخت و تثبیت اجزای مادی آثار بوده است (Saadvandi & Kalantari, 2020).

علم حفاظت، یک حوزه میان‌رشته‌ای است که علوم مختلفی از علم مواد، تاریخ هنر و سایر زمینه‌ها را

برای حل مسائل مختلف به کار می‌گیرد. این مسائل شامل فرایندهای تخریب مواد، بررسی روش‌های جدید حفظ، مطالعه مواد و فناوری‌های باستانی است (Doehne, 2006). حفاظت و مرمت براساس درک و شناخت اثر و حوزه‌های متنوعی که در شکل‌گیری و حیات آن در طول تاریخ تأثیرگذار بوده، استوار است. ابنیه تاریخی در دنیای واقعی به‌صورت منفرد شناخته نمی‌شوند و با عوامل شکل‌دهنده کالبد خود همانند سبک تاریخی، تکنیک‌های ساخت، بانیان، سازندگان، اقلیم، بستر قرارگیری و تغییر و تحولات محیطی پیوند برقرار می‌کنند و از آن‌ها تأثیر می‌گیرند (Andaroodi, 2013). حفاظت، مفهومی گسترده با دامنه‌ای وسیع از مفاهیم و رویکردها، دارای لایه‌ها و تفاوت‌های نظری و عملی مختلفی است. با توجه به تنوع آثار موجود در میراث فرهنگی و لزوم انتقال آنها به نسل‌های آینده، نیاز به حفاظت پایدار و پایش دائمی آنها وجود دارد. حفاظت پیشگیرانه، به‌عنوان روشی مؤثر برای حفاظت از آثار فرهنگی، کاربرد دارد. امروزه، این روش برای حفظ آثار تاریخی، بیش از پیش اهمیت یافته است (Kennedy, 2015).

حفاظت پیشگیرانه برای تحقق هدف حداقل مداخله در حفاظت از آثار تاریخی از اواسط دهه نود میلادی به‌طور فزاینده‌ای در سیاست‌های بین‌المللی و اروپایی مورد تأیید قرار گرفت که به‌نوبه خود در پروژه‌های تحقیقاتی مختلف در بودجه اتحادیه اروپا و سازمان‌های بین‌المللی که شروع به اجرای یک رویکرد فعالانه برای نظارت و نگهداری کردند منعکس شد (Vandesande et al., 2020). پیامدهای ناشی از عدم استفاده از روش‌های حفاظت پیشگیرانه در سه سطح قابل بیان هستند؛ سطح اول، فرسودگی و تخریب آثار موجود است؛ سطح دوم، شامل از بین رفتن ارزش آثار؛ و سطح سوم، ایجاد خسارت‌های مادی و معنوی است (Salehiyoun et al., 2020). بنابراین، واضح است که هر اقدام حفاظتی یک مورد منحصر به فرد تلقی می‌شود و انتخاب مناسب‌ترین روش در زمینه پژوهش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Sacchi et al., 2020). استفاده از فناوری نانو به‌عنوان یک اقدام پیشگیرانه در برابر رطوبت می‌تواند در مواردی که سازگاری وجود

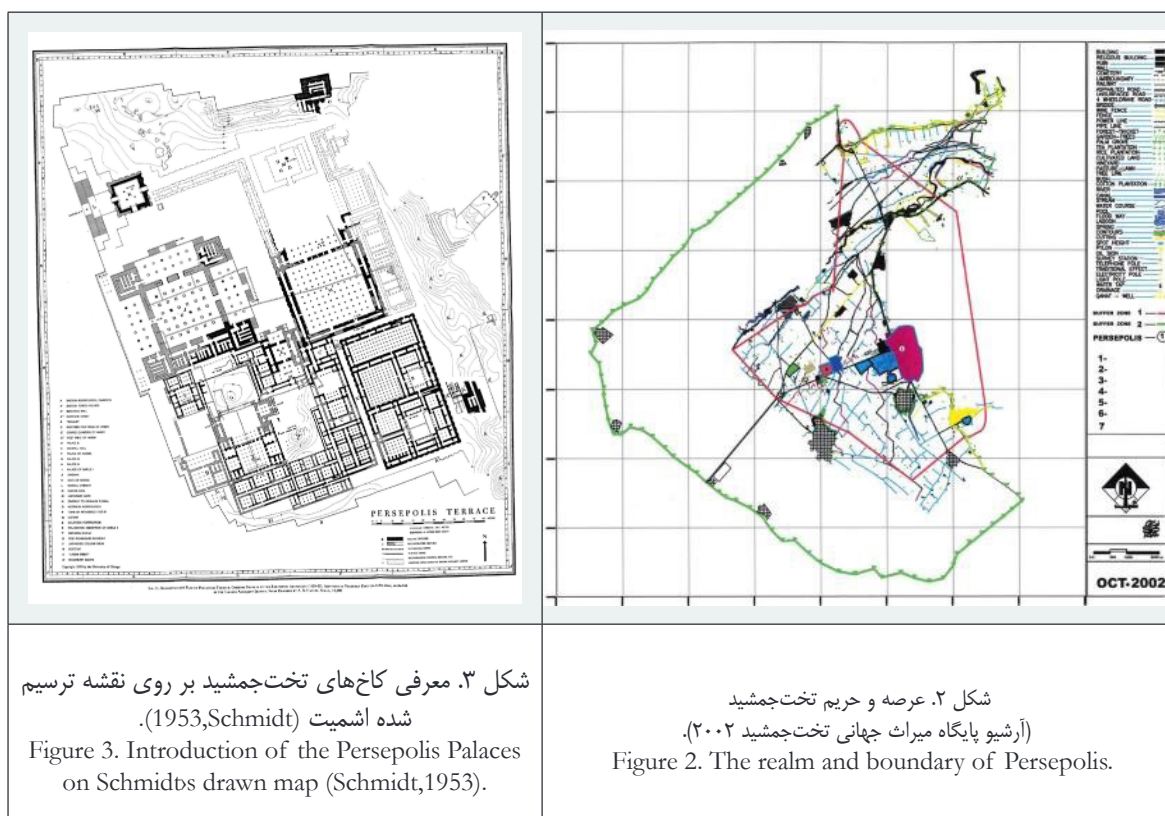
دارد و موثر واقع می‌شود، بعد از مطالعه مورد استفاده قرار گیرد.

معرفی تخت‌جمشید

ایران، سرزمینی با تاریخی کهن، مهد تمدن‌های بزرگ و باستانی بوده است. در میان این تمدن‌ها، پادشاهی هخامنشیان قابل توجه است. این پادشاهی با داشتن آگاهی از تمدن‌های میان‌رودان، مصر، یونان و روم، نه تنها از آن‌ها الهام گرفته بلکه بر آن‌ها نیز تأثیر گذاشته است. این تأثیر و الهام در شکل‌گیری و ساخت تخت‌جمشید، یکی از آثار برجسته هخامنشیان، دیده می‌شود. تخت‌جمشید به دلیل موقعیت جغرافیایی منحصر به فرد، معماری بی‌نظیر و نقش مؤثر آن در تحولات تاریخ باستان ایران، از اهمیت بالایی برخوردار است (سلطانی و دیگران، ۱۳۹۹). تخت‌جمشید (پارسه، پرسپولیس، پرسه‌پلیس، صد ستون یا چهل‌منار) به فاصله ۵۷ کیلومتری شمال شرقی شیراز و در مختصات جغرافیایی (N 52.890 E 29.935) در ارتفاع ۱۷۷۰ متر از سطح دریا بر روی صخره‌ای در دامنه

یکی از پایه‌های کوه مهر (کوه رحمت) بنا شده است (Shahbazi, 2017). از زمان آغاز ساخت تخت‌جمشید توسط داریوش بزرگ در سال ۵۲۲ ق.م، به‌نظر می‌رسد که این مکان به‌عنوان نمادی از مفهوم ایرانی هخامنشی تلقی شده است. ممکن است تنها چند سال پس از به قدرت رسیدن داریوش، تخت‌جمشید به‌عنوان نمایانگر هویت و ارزش‌های فرهنگی این تمدن شناخته شده باشد (Mousavi, 2012). صفه تخت‌جمشید بیش از ۱۲۵ هزار مترمربع وسعت دارد (شکل ۲). خود صفه، بر فراز و متکی به صخره‌ای است که از سمت شرق پشت به کوه مهر داده و از شمال، جنوب و مغرب، در درون جلگه مرودشت پیش رفته است (Shahbazi, 2017).

صفه آن را می‌توان یک چهارضلعی تصور کرد که ابعاد آن تقریباً چنین است ۴۵۵ متر در جبهه غربی، ۳۰۰ متر در طرف شمالی، ۴۳۰ متر در سوی شرقی و ۳۹۰ متر در سمت جنوبی است. تخت‌جمشید که در شهر باستانی پارسه واقع شده است، یکی از



عهدۀ مؤسسۀ ایتالیایی شرق میانه و دور ایزمئو به سرپرستی جوزپه تیلیا^{۱۱} و در دورۀ چهارم ۱۳۵۸-۱۳۸۰ بر عهدۀ سازمان ملی حفاظت آثار باستانی و سازمان میراث فرهنگی و به سرپرستی افراد مختلف از جمله حسن راهساز، یکی از دستیاران تیلیا بوده است. در دورۀ پنجم ۱۳۸۰ تاکنون این امر مهم بر عهدۀ بنیاد پژوهشی پارسه پاسارگاد و پایگاه میراث جهانی تخت جمشید بوده و توسط کارگروه‌های پارسه و کارگروه حفاظت و مرمت صورت گرفته است (Abdollahi et al., 2020). ملاط ماسه و سیمان به عنوان یک ماده مرمتی در نقش استحکام بخش، پرکننده، چسباننده، ملاط و اندود در مرمت سنگ‌های تخت جمشید (شکل ۴) به فراوانی و به عنوان درزگیر، جهت وصالی، پرکنندگی، اندود سطحی و برای بازسازی سبکی قطعات سنگی در بخش‌های مختلف تخت جمشید استفاده شده است (Harati Ardestani, 2004).

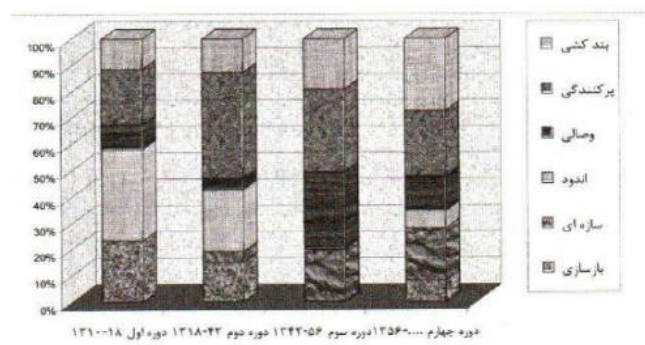
کاربرد ملاط سیمانی و اقدام‌های گذشته مرمتی در دورۀهای مختلف به دو صورت مشهود است.

- استفاده از ترکیبی همانند بتن، از سیمان و شن و ماسه که برای پرکردن جاهای خالی و شکاف‌های وسیع استفاده شده است.

- استفاده از ترکیب ماسه و دوغاب سیمانی یا ماسه‌بادی با سیمان که برای پرکردن شکاف و ترک‌ها، زیرسازی، اندود، درزگیری و پرداخت نهایی سطح استفاده شده است (شکل ۵).

شهرهای باستانی ایران است. طی سال‌ها، این مکان به‌طور مداوم به عنوان پایتخت تشریفاتی امپراتوری هخامنشیان عمل کرده است. تخت جمشید شامل چهار بخش اصلی است: کاخ‌های تشریفاتی، سراهای نشیمن، کاخ‌های کوچک اختصاصی و خزانه شاهی. همچنین دژ و باروی حفاظتی نیز در این مجموعه وجود دارد. بخش‌های مهم این مجموعه (شکل ۳) عبارت‌اند از: ۱. پلکان‌ها ورودی ۲. کاخ دروازه ملل ۳. روازۀ ناتمام ۴. کاخ صد ستون ۵. کاخ آپادانا ۶. کاخ تچر ۷. کاخ هدیش ۸. کاخ سه در ۹. حرم سرا و موزه ۱۰. خزانه ۱۱. مجلس بارعام ۱۲. آرامگاه اردشیر سوم ۱۳. آرامگاه اردشیر دوم ۱۴. تخته سنگ حوض ۱۵. کاخ نیمه تمام اردشیر سوم. (همان) این مجموعه شامل ساختارهای معماری باشکوهی است که هر یک نقش مهمی در تاریخ و فرهنگ ایران ایفا کرده‌اند.

آسیب شناسی سنگ‌های مرمت شده در مجموعه تخت جمشید: محوطه تاریخی تخت جمشید از حدود سال ۱۳۱۰ تاکنون توسط گروه‌های متخصصین خارجی و داخلی مورد مطالعه، بررسی و اقدامات حفاظتی و مرمتی قرار گرفته است. در دورۀ اولیه در بین سال‌های ۱۳۱۰-۱۳۱۸ بر عهدۀ مؤسسۀ شرق شناسی دانشگاه شیکاگو با سرپرستی ارنست هرتسفلد^۹ و اریک اشمیت^{۱۰} و در دورۀ دوم در بین سال‌های ۱۳۲۰-۱۳۴۰ بر عهدۀ بنگاه علمی تخت جمشید با سرپرستی علی سامی و در دورۀ سوم حدود سال‌های ۱۳۴۳-۱۳۵۷ بر



شکل ۴. حجم مرمت‌های صورت گرفته با ملاط ماسه سیمان در دورۀهای مختلف تخت جمشید (هراتی اردستانی، ۱۳۸۳).

Figure 4. The extent of restorations carried out using sand-cement mortar during various periods of Persepolis restoration (Harati Ardestani, 2004).



شکل ۵. کاربردهای مختلف ملاط سیمانی در پلکان ورودی در مرمت‌های گذشته تخت‌جمشید.

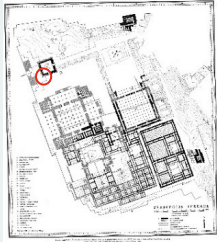
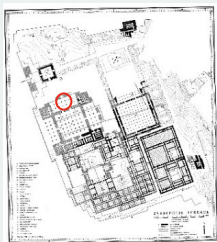
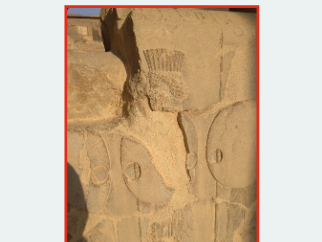
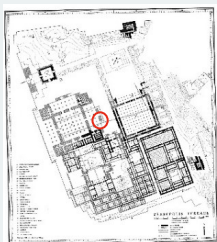
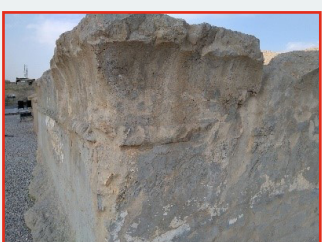
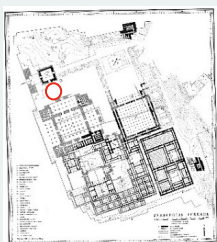
Figure 5. Various Applications of Cement Mortar in the Entrance Stairs during the Past Restorations of Persepolis.

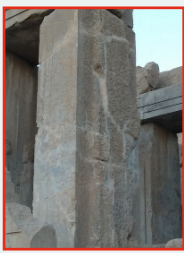
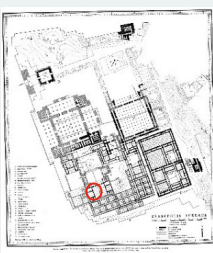
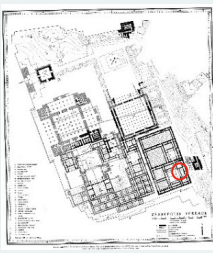
از ملاط ماسه‌سیمان به‌عنوان عاملی برای افزایش استحکام و تقویت قطعات سنگی و به‌عنوان پرکننده‌ای برای شکاف‌ها و فضاهای خالی بین قطعات سنگی به کار رفته است. علاوه بر این، از این ملاط برای چسباندن قطعات سنگی مجزا و نیز به‌عنوان اندود محافظتی استفاده شده است. در (جدول ۲) به برخی از

جدول ۲. معرفی بخش‌های مختلف تخت‌جمشید که از ملاط سیمانی جهت مرمت آنها استفاده شده است (کادر قرمز).

Table 2. Introduction of various sections of Persepolis that have been restored using cement mortar (highlighted in red).

شکل نزدیک Close-up View	شکل دور Distant View	محل بر روی نقشه Location on the Map	محل Location	
			صفه جنوبی Southern Platform	۱
			پلکان‌ها ورودی Entrance Staircase	۲

شکل نزدیک Close-up View	شکل دور Distant View	محل بر روی نقشه Location on the Map	محل Location	
			دروازه ملل Gate of All Nations	۳
			کاخ صد ستون Palace of 100 Columns/ Sad Sotoon	۴
			پلکان شمالی کاخ آپادانا Northern Staircase of the Apadana Palace	۵
			پلکان شرقی کاخ آپادانا Eastern Staircase of the Apadana Palace	۶
			کاخ آپادانا Apadana Palace	۷
			حوض سنگی Stone Pool	۸

شکل نزدیک Close-up View	شکل دور Distant View	محل بر روی نقشه Location on the Map	محل Location	
			کاخ تچر Tachar Palace	۹
			کاخ هدیش Hadish Palace	۱۰
			حرم‌سرا موزه Haremsara Museum	۱۱
			مجلس بارعام Throne Hall	۱۲

در محوطه تخت‌جمشید، این تنش‌ها باعث جداشدگی سنگ از ملاط شده و شرایط را برای عملکرد سایر عوامل فرساینده، به‌ویژه برای سنگ‌های فرسوده فراهم کرده است.

اختلاف ترکیب شیمیایی سنگ و ملاط این اختلاف باعث عکس‌العمل‌های متفاوت آن‌ها در برابر شرایط محیطی می‌شود. به‌عنوان مثال، نفوذپذیری زیاد ماسه‌سیمان و جذب رطوبت زیاد به هنگام بارندگی، باعث انتقال رطوبت به سنگ شده و هوازگی‌های رطوبت-محور را تسریع می‌کند. همچنین، عمل

قسمت‌ها به‌صورت مستند اشاره شده است.

بر اساس نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی و مطالعات میدانی انجام شده پیرامون آسیب‌شناسی نمونه‌های سنگ و ملاط ماسه و سیمان در بنای تخت‌جمشید، عوامل آسیب‌رسان به شرح زیر است: ضریب انبساط حرارتی متفاوت سنگ و ملاط؛ این اختلاف باعث می‌شود که در شرایط تغییرات دمایی عمده و مکرر، در نقاط اتصال سنگ و ملاط تنش‌هایی ایجاد شود. این تنش‌ها باعث خرابی در سطح پیوند یا در سطح ماده ضعیف‌تر می‌شود. در بعضی از مرمت‌های انجام شده

مرمت‌های گذشته در تخت‌جمشید به میزان ۸۰۸ الی ۱۲۴۲ درصد بوده است و درصد جذب آب نمونه سنگ رحمت ۰.۵۱ درصد و سنگ مجدآباد حدود ۰.۲ درصد است که به دلیل برگشت‌پذیر نبودن ملاط ماسه سیمان، در مواردی که آسیب‌ها و مشکلاتی ایجاد کرده‌اند، قابل حذف کردن نیستند (Abed Isfahani & Harati Ardestani, 2008).

روش نمونه‌سازی و شرح آزمایش‌ها

دو نمونه ملاط سیمانی با شماره‌های ۱ و ۲ با استفاده از ترکیب پودر سنگ و سیمان و با نسبت ۳ به ۱ و افزودن ۳۰ درصد آب، در قالب‌های مکعبی با ابعاد ۵ سانتیمتری تهیه شدند (شکل ۷).

از میان دو نوع ماده‌ی نانو انتخابی، نمونه شماره ۱ با زایکوسیل مکس و نمونه شماره ۲ با ماده فراز سیل اشباع شدند. در گام اول، نمونه‌های شاهد آماده شده مورد آزمون‌های مویینگی و درصد جذب آب قرار گرفته و نتایج ثبت شد. در گام دوم و به منظور بررسی دقیق‌تر تغییرات از همان نمونه‌های شاهد آزموده



شکل ۷. از راست به چپ: نمونه‌های شاهد ۱ و ۲ قبل از اعمال مواد نانو، نمونه‌های شاهد ۱ و ۲ بعد از اعمال مواد نانو شکل (مشکین‌فام‌فرد، ۱۴۰۰).

Figure 7. From right to left: Control samples 1 and 2 before the application of Nano materials 1 and 2, control samples 1 and 2 after the application of Nano materials on the right side, and Nano samples 1 and 2 on the left side of the image (Meshkinfam Fard, 2021).

انتقال یون‌های فعال از ملاط به سنگ را تشدید کرده و باعث تغییر ساختار سنگ در مرز مشترک سنگ و ملاط می‌گردد. با گذشت زمان، بخش‌های سیمانی ملاط ماسه‌سیمان شسته شده و از بافت اصلی خارج می‌شود و در نتیجه، بخش سنگ‌دانه‌ها (شن و ماسه) باقی مانده که علاوه بر تغییر ظاهر آثار سنگی، باعث افزایش تخلخل ملاط شده و در نتیجه نفوذ رطوبت را افزایش خواهد داد (Soltani et al., 2019).

شوره‌زدگی نتیجه رسوب املاح معدنی و نمک‌های موجود در آب باران یا آب نفوذی است. پس از تبخیر آب، این رسوبات بر روی سنگ باقی می‌مانند و به آن‌ها شوره سنگ اطلاق می‌شود. شوره معمولاً از ترکیبات سولفات سدیم و کلسیم تشکیل یافته است. شوره‌زدگی و نفوذ رطوبت در محل اتصال و بخش‌های سیمانی نسبت به قسمت‌های سنگی از دیگر آسیب‌های وارده به بخش‌های مرمت شده با ملاط سیمانی است. مجموعه آسیب‌های حبس رطوبت و شوره زدگی و از بین رفتن اتصال بین سطح سیمانی و سنگی در بخش‌های مختلف تخت جمشید مشهود است (شکل ۶).

طی ارزیابی انجام شده بر روی ملاط‌های ماسه‌سیمان به کار رفته در مرمت‌های مجموعه تخت‌جمشید، درصد جذب آب ملاط ماسه‌سیمان مورد استفاده در



شکل ۶. وضعیت ملاط‌های ماسه‌سیمان در مرمت‌های مجموعه تخت‌جمشید از راست به چپ: صفحه جنوبی، آپادانا و کاخ صد ستون.

Figure 6. The condition of sand-cement mortars in the restorations of the Persepolis complex, from right to left: the Southern Platform, Apadana, and the Hundred Columns Palace.



شکل ۸. از راست به چپ: آزمون موینگی نمونه شاهد قبل از نانو کردن، نمونه شاهد بعد از نانو کردن (مشکین‌فام‌فرد، ۱۴۰۰).

Figure 8. From right to left: the capillarity test of the control sample on the right before nanocoating, the control sample after nanocoating, and the nano sample on the left (Meshkinfam Fard, 2021).

میزان جذب رطوبت در آزمون موینگی بین نمونه ملاط سیمانی قبل و بعد از اعمال مواد نانو تفاوت قابل توجهی دارد. تفاوت میزان جذب رطوبت در آزمون موینگی بین نمونه‌های نانو ملاط سیمانی بسیار کم ثبت شده است. این نشان می‌دهد که مواد نانو می‌توانند به‌طور قابل توجهی خصوصیات جذب رطوبت این مصالح را تغییر دهند.

شده در گام اول که به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه خشک شده بودند برای اعمال مواد نانو استفاده شدند. مواد نانو تا اشباع شدن کامل نمونه‌ها و با رعایت اصول ایمنی، بر روی آنها اسپری شدند. هیچ یک از دو ماده عایق نانو استفاده‌شده بعد از اجرا بر روی سطح بی‌بو نبودند. ارزیابی نمونه‌های نانو، آزمون‌های رطوبت که بر روی نمونه‌های شاهد قبل از نانو کردن انجام‌شده بود، با شرایط مشابه تکرار شد. با مقایسه نتایج، میزان تأثیر مواد نانو بر نفوذپذیری رطوبت مشخص می‌شود.

آزمون موینگی: در این آزمایش برای بررسی میزان کشش جذبی آب، نمونه‌های ملاط سیمانی شاهد و نمونه‌های ملاط سیمانی اعمال شده با عایق رطوبتی نانو در تماس با آب مقطر به ارتفاع هشت میلی‌متر قرار گرفته‌اند (شکل ۸).

این آزمون برای مدت ۱۲ ساعت انجام شده و در طول مدت آزمون، ارتفاع رطوبت جذب شده در نمونه‌ها طبق جدول ۳ ثبت شد. ارتفاع رطوبت بالارونده معیار بخش‌های سالم است و در نمونه‌های دارای ریزترک که یک بخش از نمونه دارای ارتفاع بیشتری است، در جدول صرف‌نظر شده است.

جدول ۳. ارتفاع رطوبت حاصل از جذب موینگی به میلی‌متر و میزان آب جذب شده در نمونه‌های شاهد، قبل و بعد از اعمال مواد نانو (مشکین‌فام‌فرد، ۱۴۰۰).

Table 3. The moisture height of the control samples and nano samples resulting from capillary absorption in millimeters, and the amount of water absorbed in the control samples, before and after the application of nanomaterials (Meshkinfam Fard, 2021).

Nano Sample Number 2	Nano Sample Number 1	Control Sample Number 2	Control Sample Number 1	Time
5 mm	5 mm	8 mm	8 mm	Start of Test
6 mm	5 mm	24 mm	22 mm	One Hour Later
7 mm	6 mm	25 mm	23 mm	Two Hours Later
9 mm	8 mm	26 mm	23 mm	Three Hours Later
15 mm	13 mm	32 mm	28 mm	Twelve Hours Later
%0.236	%0.319	%17.16	%16.61	Water Absorption Percentage/ Twelve-Hour Period

آزمون درصد جذب آب: در این آزمایش وزن نمونه‌ها قبل و بعد از اعمال مواد نانو بصورت دقیق اندازه‌گیری شد. آزمایش تا زمان کسب نتایج حد مجاز ادامه داده می‌شود.

سپس نمونه‌ها برای مدت ۵۰ ساعت در آب با یک سانتی‌متر ارتفاع آب بر روی نمونه‌ها قرار داده شدند و در طول زمان آزمون، وزن ثانویه نمونه‌ها ثبت شد (شکل ۱۰).

درصد جذب آب نمونه‌ها در زمان‌های تعیین شده آزمایش با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد. نتایج این محاسبات در جدول ۴ آمده است.

$$\text{درصد جذب آب} = \frac{\text{وزن اولیه} - \text{وزن ثانویه}}{\text{وزن اولیه}} \times 100$$

نتایج به‌دست‌آمده از نمونه‌های نانو نشان می‌دهد که استفاده از مواد نانو بر روی سطح، باعث کاهش درصد و سرعت جذب آب نمونه‌های ملاط سیمانی شده است.



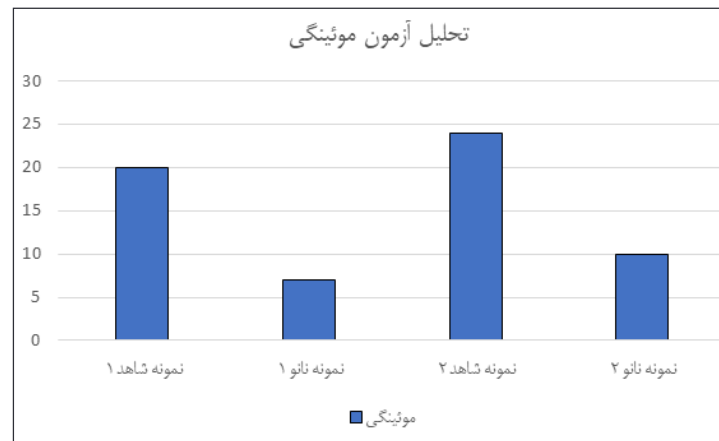
شکل ۹. از راست به چپ: نمونه شاهد قبل از اعمال مواد نانو، نمونه شاهد بعد از اعمال مواد نانو در ظرف آب دیونیزه (مشکین‌فام‌فرد، ۱۴۰۰).

Figure 9. From right to left: the control sample before the application of nano materials, the control sample after the application of nano materials, with the control samples positioned on the right and the nano samples on the left in a container of deionized water (Meshkinfam Fard, 2021).

جدول ۴. آزمون درصد جذب آب در نمونه‌های شاهد، قبل و بعد از اعمال مواد نانو (مشکین‌فام‌فرد، ۱۴۰۰).

Table 4. Water Absorption Percentage Test in Control Samples, Before and After Nano Material Application.

Nano Sample 2		Nano Sample 1		Control Sample 2		Control Sample 1		Time
WA(%)	W(g)	WA(%)	W(g)	WA(%)	W(g)	WA(%)	W(g)	
0	228.45	0	225.10	0	225.06	0	224.42	0
0.555	229.72	0.817	226.94	15.569	260.10	16.179	260.73	1 hour
0.700	230.05	0.986	227.32	15.689	260.37	16.232	260.85	2 hour
0.726	230.11	1.061	227.49	15.786	260.59	16.339	261.09	3 hour
0.805	230.29	1.172	227.74	15.795	260.61	16.348	261.11	4 hour
0.849	230.39	1.212	227.83	15.800	260.62	16.353	261.12	5 hour
1.050	230.85	1.279	227.98	15.826	260.68	16.415	261.26	6 hour
3.554	236.57	1.488	228.45	15.840	260.71	16.429	261.29	9 hour
3.729	236.97	1.790	229.13	15.906	260.86	16.469	261.38	12 hour
4.342	238.37	3.331	232.60	16.049	261.18	16.620	261.72	24 hour
5.813	241.73	4.793	235.89	16.186	261.49	16.785	262.09	36 hour
8.636	248.18	6.788	240.38	16.613	262.45	17.186	262.99	50 hour
Water Absorption: WA Weight in Grams: W(g)								



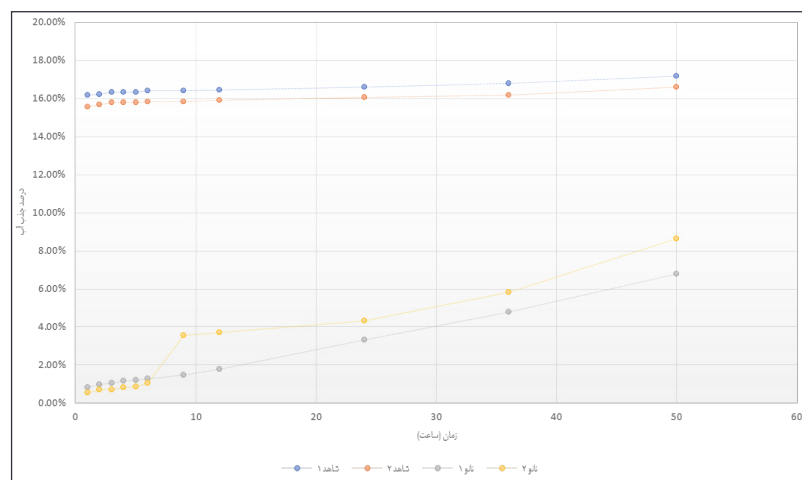
شکل ۱۰. نمونه شاهد قبل و بعد از اعمال مواد نانو در آزمون موئینگی (مشکین فام فرد، ۱۴۰۰).

Figure 10. Nano Samples Before and after of application Nano Material in Capillarity Tests.

تحلیل یافته‌ها و بحث

مقایسه نتایج بررسی انجام شده بر روی نمونه‌های شاهد قبل و بعد از اعمال، دو ماده فراز سیل و زایکوسیل مکس نشان می‌دهد که ویژگی جذب سطحی نمونه‌های شاهد ملاط سیمانی با استفاده از ماده نانو ۵۰ درصد باعث کاهش جذب رطوبت شده است. این نشان‌دهنده عملکرد نسبتاً ضعیف این ماده در بازه زمانی طولانی است. میزان حفاظت در برابر رطوبت در آزمون درصد جذب آب در (شکل ۱۱) آورده شده است.

با مقایسه نتایج بررسی انجام شده بر روی نمونه‌های شاهد قبل و بعد از اعمال مواد نانو، تأثیر هر دو ماده نانو به عنوان عایق رطوبتی و در کاهش جذب رطوبت، مثبت ارزیابی شد (شکل ۱۰). این یافته‌ها نشان می‌دهند که استفاده از مواد نانوی مورد مطالعه در این پژوهش می‌تواند به بهبود عملکرد و مقاومت ملاط سیمان استفاده شده در مرمت‌ها در برابر شرایط سخت آب و هوایی کمک کند.



شکل ۱۱. مقایسه نمونه‌های شاهد قبل و بعد از اعمال مواد نانو در آزمون درصد جذب آب با گذر زمان (مشکین فام فرد، ۱۴۰۰).

Figure 11. Comparison of Control Samples and Nano Samples Before and After Nano Material Application in Water Absorption Percentage Tests Over Time (Meshkinfam Fard, 2021).

گفت که نیازمند موادی با کیفیت بهتر از نظر میزان نفوذپذیری در برابر آب برای مرمت سنگ به خصوص در این محوطه ارزشمند میراث جهانی هستیم؛ و برای دستیابی به این مهم، پژوهش‌های بیشتر و استفاده از سایر مواد نانو با ماندگاری و ویژگی‌های مطلوب‌تر نیاز است. از این رو به پژوهشگران علاقمند به مطالعه در این حوزه توصیه می‌شود که با توجه به اهمیت تأثیر رطوبت بر افزایش سرعت تخریب آثار تاریخی، در پرتو افزایش مشکلات حاصل از تغییرات اقلیمی و زیست محیطی، مطالعه پیرامون استفاده از فناوری‌های نوین را برای بهبود شیوه‌های حفاظتی در برابر رطوبت برای این آثار در دستور کار خود قرار دهند؛ و در این مسیر، علاوه بر بررسی تأثیرات جانبی دیگر عوامل فرساینده و ارزیابی این مواد تحلیل سایر اقدامات مرمتی انجام شده در تخت جمشید در دهه گذشته را نیز مورد توجه قرار دهند.

سپاسگزاری

بدینوسیله از آقایان دکتر حمید فدایی، مدیریت سابق محترم و پرتلاش پایگاه میراث جهانی تخت جمشید، بابت همکاری و داوری پایان‌نامه‌ای که این مقاله مستخرج از آن است، دکتر علیرضا عسکری چاوردی، مدیریت محترم فعلی پایگاه میراث جهانی تخت جمشید، برای همکاری و هماهنگی‌های لازم جهت پیشبرد این پژوهش قدردانی می‌نمایم. از استاد سیروس زارع، استادکار باتجربه و دارای درجه یک هنری، به‌خاطر مشاوره و راهنمایی‌های ارزشمند در خصوص مرمت‌های صورت‌گرفته با ملاط سیمان در تخت جمشید، تشکر ویژه دارم. همچنین از خانم مهناز بردبار بابت همکاری و دسترسی به آرشیو کتابخانه تخت جمشید و از جناب آقای مهندس مسعود تقی‌زاده به دلیل همکاری در انجام آزمون‌ها صمیمانه قدردانی می‌کنم.

حامیان مالی و معنوی

این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد در رشته مرمت و احیای ابنیه و بافت‌های تاریخی گرایش حفاظت میراث معماری نگارنده اول با عنوان «روش‌های حفاظت از بناهای سنگی در برابر رطوبت با بهره‌گیری از فناوری نانو؛ نمونه موردی میراث جهانی

بر اساس مقایسه نتایج بین نمونه‌های شاهد قبل و بعد از اعمال فراز سیل و زایکوسیل مکس مشخص شد که ملاط سیمانی، ماده نانو زایکوسیل مکس عملکرد بهتری از فراز سیل دارد، اگرچه هر تأثیر نسبتاً کمی در کاهش جذب رطوبت داشته‌اند. میزان جذب آب با گذر زمان نشان می‌دهد در هر دو نمونه ملاط سیمانی این میزان افزایش یافته و این موضوع نشان‌دهنده کاهش بازدهی و عملکرد این ماده با گذر زمان است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که میزان جذب آب بهترین نمونه ملاط سیمان نانو شده ۶ درصد و حدوداً ده برابر بیشتر از میزان جذب آب اندازه‌گیری شده در نمونه سنگ‌های تخت جمشید است (کمتر از ۰/۲ درصد که در پژوهش عابدی‌اصفهانی و هراتی‌اردستانی، ۱۳۸۷) ثبت شده است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عملکرد دو ماده نانو با نام‌های زایکوسیل مکس و فراز سیل در کاهش جذب آب ملاط سیمانی مورد بررسی قرار گرفت. عملکرد زایکوسیل مکس و فراز سیل در ملاط سیمانی کاملاً متفاوت بود. به‌عنوان مثال، زایکوسیل مکس عملکرد ۶۰/۵ درصدی و فراز سیل عملکرد ۴۸/۰۲ درصدی برای ملاط سیمانی داشتند. در نتیجه می‌توان گفت که زایکوسیل مکس عملکرد بهتری بر روی سطوح سیمانی مرمت شده در تخت جمشید را داشت. در خصوص کیفیت و کارایی نمونه مواد به‌کار رفته در این مطالعه که به‌عنوان نانو مواد عایق رطوبتی با پایداری ده ساله در برابر رطوبت معرفی شده‌اند، می‌توان گفت که خلاف واقعیت است؛ زیرا (۱) این مواد در کمتر از دو روز مقاومت و نفوذپذیری خود را در برابر رطوبت از دست دادند و تقریباً تا چند ساعت اول نتایج آزمون درصد جذب آب قابل قبول بود و با گذشت زمان میزان جذب آب آن افزایش یافت نتایج ارزیابی کاهش رطوبت موینگی در مورد نمونه‌های نانو شده با هر دو ماده، مناسب ارزیابی شد. هر دوی این مواد تغییر رنگ بسیار جزئی در نمونه‌های شاهد ایجاد کردند؛ و در نهایت با توجه به تفاوت بیش از ده برابری میزان جذب آب ملاط‌های سیمانی مورد استفاده برای مرمت در مجموعه تخت جمشید با سنگ‌های آن، می‌توان

[حیدری، مرتضی. (۱۳۹۵). نانو فن آوری و حفاظت یادمان‌های سنگی میراث‌فرهنگی، مطالعه موردی: آرامگاه کوروش. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد پژوهش هنر، دانشگاه تربیت‌مدرس].

Razani, M. & Nemani Khiavi, L. (2020). A Review of Stone Reinforcement Using Nanotechnology. Studies in the World of Color, 3, 55-64. [In Persian].

[رازانی، مهدی؛ نعمانی خیای، لیلی. (۱۳۹۹). مروری بر استحکام‌بخشی سنگ با استفاده از فناوری نانو. مطالعات در دنیای رنگ، ۳، ۶۴-۵۵].

Zamanian, M. (2009). Comparison of the Use of Calcium Hydroxide Nanoparticle Dispersion in Alcohol with the Limewater Method in the Reinforcement of Limestone Artifacts. Master's Thesis in Conservation of Historical and Cultural Objects, University of Art, Isfahan. [In Persian].

[زمانیان، مجید. (۱۳۸۸). مقایسه کاربرد دیسپرسیون نانوذرات کلسیم هیدروکسید در الکل با روش شیرآهک در استحکام‌بخشی آثار سنگ‌آهکی. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد مرمت اشیاء تاریخی و فرهنگی، دانشگاه هنر اصفهان].

Saadvandi, M. & Kalantari, M. (2020). Levels of Conservation of Architectural Heritage. Conservation and Architecture of Iran (Conservation of Historical and Cultural Objects and Textures), 24(10), 31-42. [In Persian].

[سعدوندی، مهدی؛ کلانتری، مائده. (۱۳۹۹). مراتب حفاظت از میراث معماری. مرمت و معماری ایران (مرمت آثار و بافت‌های تاریخی، فرهنگی)، ۲۴(۱۰)، ۳۱-۴۲].

Soltani, A.H.; Firouzmandi, B.; Shabani-Samagh-Abadi, R. & Khomseh, H. (2019). An Investigation into the Recognition of Destructive Factors of the Persepolis Complex. Islamic Art Studies, 36(15), 61-79. [In Persian].

[سلطانی، امیرحسین؛ فیروزمندی، بهمن؛ شعبانی‌صمغ‌آبادی، رضا؛ خسته، هاید. (۱۳۹۸). کنکاشی پیرامون بازشناسی عوامل تخریب مجموعه تخت‌جمشید. مطالعات هنر اسلامی، ۳۶(۱۵)، ۷۹-۶۱].

Soltani, A.H.; Firouzmandi, B.; Shabani-Samagh-

تخت‌جمشید» است که با راهنمایی نگارنده دوم در دانشکده معماری دانشگاه تهران انجام شده است.

پی‌نوشت‌ها

۱. FarazSil محلول سیلیکونی بر پایه سیلان و سیلوکسان، ساخت شرکت نانوفرز سپاهان.

۲. Zycosil Max محلول ارگانوسیلان، ساخت شرکت زایدکس هندوستان.

3. International Symposium on the Deterioration and Conservation of Building Stone.

4. Deterioration and Conservation of Stone.

5. Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin.

6. Contact angle.

۷. Pozzolan نوعی خاکستر آتشفشانی ریزدانه

۸. آهک ساپا: این نوع آهک، به دلیل خواص ویژه‌ای که دارد، مانند چسبندگی بالا، مقاومت فشاری و کششی و همچنین مقاومت در برابر عوامل جوی دارد.

9. Ernst Herzfeld.

10. Erich Friedrich Schmidt.

11. Giuseppe Tilia.

منابع

Andaroodi, E. (2013). Documentation of Knowledge-Based Architectural Heritage in Iran. Journal of Fine Arts - Architecture and Urban Planning, 53, 70-79. [In Persian].

[اندرودی، الهام. (۱۳۹۲). مستندسازی دانش‌بنیان میراث معماری در ایران. هنرهای زیبا - معماری و شهرسازی، ۵۳، ۷۹-۷۰].

Heydari, M. (2016). Nanotechnology and the Conservation of Stone Monuments in Cultural Heritage, Case Study: Tomb of Cyrus. Master's Thesis in Art Research, Tarbiat Modares University. [In Persian].

Abadi, R.; & Khomseh, H. (2020). The Ascension of Darius the Great and Artaxerxes I and Their Role in the Urban Development of Persepolis. *Quarterly Journal of History*, 15(57), 79-94. [In Persian].

[سلطانی، امیرحسین؛ فیروزمندی، بهمن؛ شعبانی صمغ آبادی، رضا؛ خمسه، هاید. (۱۳۹۹). به تخت نشستن داریوش بزرگ و اردشیر اول و نقش آنها در توسعه عمرانی تخت جمشید. فصلنامه تاریخ، ۱۵ (۵۷)، ۷۹-۹۴].

Sheikholeslami, R. (2008). Investigation and Feasibility of Using Sand-Cement Mortar Made with Microsilica in the Restoration of Stone Artifacts of the World Heritage Site of Persepolis - Pasargadae. Master's Thesis in Conservation of Historical Artifacts, University of Art, Isfahan. [In Persian].

[شیخ الاسلامی، رضا. (۱۳۸۷). بررسی و امکان سنجی استفاده از ملاط ماسه سیمان تهیه شده با میکروسیلیس در مرمت آثار سنگی مجموعه جهانی پارسه - پاسارگاد. پایان نامه کارشناسی ارشد مرمت آثار تاریخی، دانشگاه هنر اصفهان] Shahbazi, A.S. (2017). Persepolis Documentation [Guide]. Tehran: Saffran Publishing. [In Persian].

[شهبازی، علیرضا شاپور. (۱۳۹۶). راهنمای مستند تخت جمشید. تهران: نشر سفیران].

Salehiyoun, L.; Azadi, M.; Vahidzadeh, R.; & Taghipour, F. (2020). The Impact of Preventive Conservation on the Cultural Values of Private Collections of Ancient Heritage. *Parseh Archaeological Studies*, 13(4), 193-205. [In Persian].

[صالحیون، لیلا؛ آزادی، مهرناز؛ وحیدزاده، رضا؛ تقی پور، فائزه. (۱۳۹۹). تأثیر حفاظت پیشگیرانه بر ارزش های فرهنگی مجموعه های خصوصی میراث کهن. مطالعات باستان شناسی پارسه، ۱۳ (۴)، ۱۹۳-۲۰۵].

Abed Isfahani, A. & Harati Ardestani, N. (2008). Investigating the Effects of Sand and Cement Mortar in the Restoration of Stone Artifacts in the World Heritage Site of Persepolis. *Conservation and Research*, 4(2), 78-84. [In Persian].

[عابد اصفهانی، عباس؛ هراتی اردستانی، ناهید. (۱۳۸۷).

بررسی تأثیرات ملاط ماسه و سیمان در مرمت آثار سنگی محوطه میراث جهانی تخت جمشید. مرمت و پژوهش، ۴ (۲)، ۷۸-۸۴].

Abdollahi, P. & Samanian, K. (2018). The Place of Value and Valuation in Past Approaches to Conservation and Restoration in the World Heritage Site of Persepolis. *Archaeological Studies*, 18(10), 185-203. [In Persian].

[عبداللهی، پریسا و سامانیان، کورس. (۱۳۹۷). جایگاه ارزش و ارزش شناسی در رویکردهای گذشته ی حفاظت و مرمت در محوطه ی میراث جهانی تخت جمشید. مطالعات باستان شناسی ۱۰ (۲). ۱۸۵-۲۰۳].

Abdollahi, P.; Vatandoost, R.; & Samanian, K. (2020). A Study of Supplementary Restorations in the Stone Reliefs of the Historical Site of Persepolis from the Worldview of the Achaemenid Era: A Comparative Study. *Conservation and Architecture of Iran*, 10(21), 63-76. [In Persian].

[عبداللهی، پریسا؛ وطن دوست، رسول؛ و سامانیان، کورس. (۱۳۹۹). بررسی مرمت های تکمیلی در نقش برجسته های سنگی محوطه تاریخی تخت جمشید از منظر جهان بینی دوران هخامنشی: مطالعه ای تطبیقی. مرمت و معماری ایران، ۱۰ (۲۱)، ۶۳-۷۶].

Attari, M. (2009). Investigation of the Strengthening and Conservation of Black Limestone in the World Heritage Site of Pasargadae Using Polymers and the Feasibility of Using Nanoparticles. Master's Thesis in Conservation of Cultural and Historical Objects, University of Art. [In Persian].

[عطاری، مهشید. (۱۳۸۸). بررسی استحکام بخشی و حفاظت از سنگ آهک سیاه در محوطه میراث جهانی پاسارگاد با استفاده از پلیمرها امکان سنجی استفاده از نانوذرات. پایان نامه کارشناسی ارشد مرمت اشیاء فرهنگی و تاریخی، دانشگاه هنر].

Meshkinfam Fard, H. (2021). Conservation methods for stony monuments against dampness applying nanotechnology; Case study: The World Heritage Site of the Persepolis. Master's Thesis in

Conservation and Rehabilitation of Historic Sites and Buildings, Faculty of Architecture, University of Tehran. [In Persian].

[مشکین‌فام‌فرد، حبیب. (۱۴۰۰). روش‌های حفاظت از بناهای سنگی در برابر رطوبت با بهره‌گیری از فناوری نانو؛ نمونه موردی میراث جهانی تخت‌جمشید. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد در رشته مرمت و احیای ابنیه و بافت‌های تاریخی گرایش حفاظت میراث معماری، دانشکده معماری، دانشگاه تهران].

Mahdinejad, J. (1995). Pathology of the Stones of Persepolis and Proposing a Restoration Plan Based on New Mixtures of Pozzolan and Sapa Lime Cement Mortar. Master's Thesis in Conservation of Historical and Cultural Objects. [In Persian].

[مهدی‌نژاد، جمال‌الدین. (۱۳۷۴). آسیب‌شناسی سنگ‌های تخت‌جمشید و ارائه طرح مرمتی بر اساس ترکیبات جدید ملاط سیمان آمیخته پوزولان و آهک ساپا، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد مرمت اشیاء تاریخی و فرهنگی].

Nemani Khiavi, L. (2021). Evaluation of Silica Nanoparticles in Consolidation of Sheikh Haidar Tomb Tower's Dadui in Meshkinshahr, Iran. Master's Thesis in Conservation and Restoration of Historical Buildings and Textures, Tabriz Islamic Art University. [In Persian].

[نعمانی‌خیای، لیلی. (۱۴۰۰). ارزیابی نانوذرات سیلیس در استحکام‌بخشی سنگ‌های ازاره بنای برج شیخ حیدر مشکین‌شهر. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد مرمت و احیای بناها و بافت‌های تاریخی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز].

Nikoui, A. (2010). The Bisotun Inscription. Tehran: Afraz Publishing. [In Persian].

[یکویی، علی. (۱۳۸۹). کتیبه‌ی بیستون. تهران: نشر افراز].

Harati Ardestani, N. (2003). Study, Identification and Optimization of Sand-Cement Mortar in the Restoration of Stone Artifacts of Persepolis: Restoration of a Piece of the Crown Stone of the Hundred-Columns Palace. Bachelor's Thesis in Conservation of Historical Artifacts, University of Art, Isfahan. [In Persian].

[هراتی‌اردستانی، ناهید (۱۳۸۲). مطالعه شناخت و بهینه‌سازی ملاط ماسه‌سیمان در مرمت‌های آثار سنگی تخت‌جمشید مرمت یک قطعه از سنگ تاج طاقچه کاخ صد ستون. پایان‌نامه کارشناسی مرمت آثار تاریخی، دانشگاه هنر اصفهان].

Harati Ardestani, N. (2004). Investigation of the Damages Caused by the Use of Sand-Cement Mortar in the Restoration of Stone Artifacts of Persepolis. Knowledge of Conservation and Cultural Heritage, 1(1), 13-22. [In Persian].

[هراتی‌اردستانی، ناهید. (۱۳۸۳). بررسی آسیب‌های وارده کاربرد ملاط ماسه‌سیمان در مرمت آثار سنگی تخت‌جمشید. دانش مرمت و میراث‌فرهنگی، (۱)، ۲۲-۱۳].

Harati Ardestani, N. (2005). Investigation of the Destructive Effects of Sand and Cement Mortar in the Restoration of Stone Artifacts at the World Heritage Site of Persepolis. Master's Thesis in Conservation of Cultural and Historical Objects, University of Art, Isfahan. [In Persian].

[هراتی‌اردستانی، ناهید (۱۳۸۴). بررسی تأثیرات مخرب ملاط ماسه و سیمان در مرمت آثار سنگی محوطه میراث جهانی تخت‌جمشید. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد مرمت اشیاء فرهنگی و تاریخی، دانشگاه هنر اصفهان].

Becerra, J., Zaderenko, A. P., Gómez-Morón, M. A., & Ortiz, P. (2021). Nanoparticles Applied to Stone Buildings. International Journal of Architectural Heritage, 15(9), 1320–1335. <https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1672828>.

Capitelli, F., Dida, B., Della Ventura, G., Baldassarre, F., Capelli, D., Senesi, G., Mele, A., & Siliqi, D. (2021). Functional nano-hydroxyapatite for applications in conservation of stony monuments of cultural heritage. Proceedings of the 2nd International Online Conference on Crystals, 7315. https://doi.org/10.3390/iocc_2020-07315.

Doehne, E. (2006). ESEM Applications: From Cultural Heritage Conservation to Nano-Behaviour. Microchimica Acta, 155(1–2), 45–50. <https://doi.org/10.1007/s00604-006-0505-1>.

Schmidt, E. (1953). *Persepolis, Volume I: Structures, Reliefs, Inscriptions*. University of Chicago Press.

Kennedy, C. J. (2015). The Role of Heritage Science in Conservation Philosophy and Practice. *The Historic Environment: Policy & Practice*, 6(3), 214–228. <https://doi.org/10.1080/17567505.2015.1099925>.

Mousavi, A. (2012). Persepolis: Discovery and afterlife of a world wonder. In *Persepolis: Discovery and Afterlife of a World Wonder* (pp. 1–238).

Quagliarini, E., Bondioli, F., Goffredo, G. B., Licciulli, A., & Munafò, P. (2013). Self-cleaning materials on Architectural Heritage: Compatibility of photo-induced hydrophilicity of TiO₂ coatings on stone surfaces. In *Journal of Cultural Heritage* (Vol. 14, Issue 1, pp. 1–7). <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.02.006>.

Sacchi, B., Vettori, S., Andreotti, A., Rampazzi, L., Colombini, M. P., & Tiano, P. (2020). Assessment of Water Repellent Treatments for the Stone of the Matera Cathedral Facade (Italy). *International Journal of Architectural Heritage*, 1–9. <https://doi.org/10.1080/15583058.2020.1782532>.

Sohrabi, M., Esmacillou, M., Fadaei, H., Talebian, M. H., & Noohi, N. (2020). The field monitoring of influential biodeteriogenic agents on the historic rock surfaces in Persepolis-UNESCO World Heritage Site. *Journal of Research on Archaeometry*, 6(1), 175–192. <https://doi.org/10.29252/jra.6.1.175>.

Vandesande, A., Verstrynghe, E., & van Balen, K. (Eds.). (2020). *Preventive Conservation - From Climate and Damage Monitoring to a Systemic and Integrated Approach*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003004042>.

Winkler, E. M. (2011). Stone in Architecture. In S. Siegesmund & R. Snethlage (Eds.), *Stone in Architecture*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-14475-2>.