Research Paper

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.

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.

مقاله پژوهشی

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

حبیب مشکین‌فام فرد[1]، محمدحسن طالبیان [2*]

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

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

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، دانشکدگان هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

رایانامه

mh.talebian@ut.ac.ir

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، به‌دلیل جذب آب بیشتر نسبت به سنگ، موجب تشدید نتایج مخرب رطوبت و بروز آسیب‌های جدی اما تدریجی و غیرقابل‌جبران 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 درقالب مطالعات آزمایشگاهی انجام شده است. در این فرایند، آزمون‌های مویینگی و درصد جذب آب نمونه‌های شاهد ملاط سیمانی و دو نوع عایق رطوبتی نانو ایرانی و خارجی با نام‌های فرازسیل[1] و زایکوسیل‌مکس[2] 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. زایکوسیل مکس با عملکرد ۶۰/۵ درصد و فراز سیل با عملکرد۴۸/۰۲ درصد، جذب آب ملاط سیمانی را کاهش دادند و زایکوسیل‌مکس عملکرد بهتری از فرازسیل 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.

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

مقدمه

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 به‌دلیل 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 ۵۱۸ق.م ساخته‌شده 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 مرمت های گذشته در محل اتصال به سنگ‌ها کاملا مشخص است (Abed 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 مرمت های 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، زیرا تخریب معمولاً از لایه‌های بیرونی آغاز می‌شود. این پوشش‌ها با کمک به حفاظت پیشگیرانه و پایدار می‌توانند 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 Khiavi, 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، کارآیی 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 هنگامی‌که 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.

در اواخر قرن نوزدهم تا بیستم میلادی و در فاصله دو جنگ جهانی، موضوع حفاظت هنوز به‌صورت 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 نشست های 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»[3] بود که برای اولین بار در سال ۱۹۷۲ م، در لاروشل برگزار شد. از آن زمان، ده جلسه دیگر این سمپوزیوم نیز به‌طور منظم تشکیل شد و نام آن به «فرسایش و حفاظت از سنگ»[4] تغییر کرد. اجلاس‌های بین‌المللی دیگری مانند نشست‌های «حفاظت از بناهای تاریخی در حوزه مدیترانه»[5] نیز برگزار شد (Winkler, 2011).

در حدود دو دهه اخیر، فناوری نانو به‌عنوان یک 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 به‌دنبال روش‌های بهبود مواد حفاظتی و مرمت پایدار با از پژوهش‌های متعددبین‌المللی هستند. از این‌رو 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 درنظر گرفتن تفاوت ساختار سنگ‌ها، رطوبت به‌عنوان عامل مشترک در فرسایش آنها معرفی شده است و از نانو ذرات برای بهرگیری در

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 استحکام‌بخشی و حفاظت از سنگ سیاه در محوطه میراث جهانی پاسارگاد با استفاده از پلیمر، امکان‌سنجی استفاده از نانوذرات (عطاری ۱۳۸۸).	میراث جهانی پاسارگاد	سنگ‌آهکی	ترک و ریزترک‌ها 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 استحکام‌بخشی آثار آهکی – (زمانیان ۱۳۸۸).	میراث جهانی پاسارگاد و تخت‌جمشید	سنگ‌آهکی	سختی کم سنگ و رطوبت	میکروسکوپ الکترونی درصد جذب آب درصد پوکی و تخلخل	نانوذرات کلسیم هیدروکسید
نانو فن آوری و حفاظت یادمان‌های سنگی میراث‌فرهنگی 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 استحکام‌بخشی 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

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

فرایند مرمت ترک و ریزترک‌ها 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 طاقچه کاخ صد ستون را مرمت کرده 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 ملاط های 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.

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 بهره ببرد. برای مثال، منشور آتن ۱۹۳۱م در بخش پنجم نتایج کنفرانس توصیه می‌کند که از متخصصین علوم فیزیک، شیمی و علوم طبیعی استفاده شود. همچنین، توصیه‌نامه حفاظت ملی میراث‌فرهنگی و طبیعی ۱۹۷۲م در ماده سوم و منشور ونیز ۱۹۶۴م 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 به‌کار 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 میراث‌فرهنگی 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).

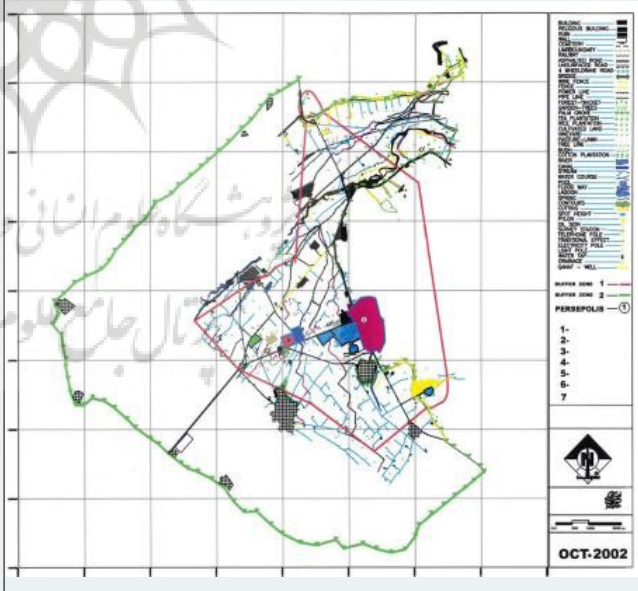
حفاظت پیشگیرانه برای تحقق هدف حداقل مداخله در حفاظت از آثار تاریخی از اواسط دهه نود میلادی به‌طور فزاینده‌ای در سیاست‌های بین‌المللی و اروپایی مورد تأیید قرار گرفت که به‌نوبه خود در پروژه‌های تحقیقاتی مختلف در بودجه اتحادیه اروپا و سازمان‌های بین‌المللی که شروع به اجرای یک رویکرد فعالانه برای نظارت و 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 بین‌رفتن ارزش آثار؛ و سطح سوم، ایجاد خسارت‌های مادی و معنوی (Salehiyoun et al., 2020) . بنابراین، واضح است که هر اقدام حفاظتی یک مورد منحصربه‌فرد 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 می شود، بعد از مطالعه مورد استفاده قرار گیرد.

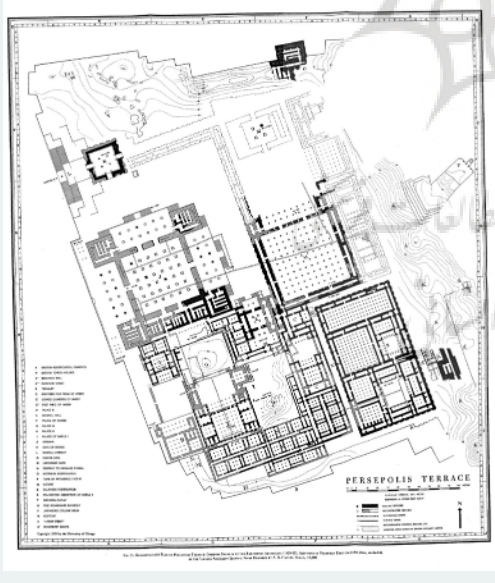
معرفی تخت‌جمشید

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 منحصربه‌فرد، 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) بناشده 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 بیشتر 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



شکل ۲. عرصه و حریم تخت‌جمشید
(آرشیو پایگاه میراث جهانی تخت‌جمشید ۲۰۰۲).
Figure 2. The realm and boundary of Persepolis.



شکل ۳. معرفی کاخ‌های تخت‌جمشید بر روی نقشه ترسیم شده اشمیت (1953,Schmidt).
Figure 3. Introduction of the Persepolis Palaces on Schmidts drawn map (Schmidt,1953).

شهرهای باستانی ایران است. طی سال‌ها، این مکان به‌طور مداوم به‌عنوان پایتخت تشریفاتی امپراتوری هخامنشیان عمل کرده است. تخت‌جمشید 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. روازه ناتمام ۴. کاخ صد ستون ۵. کاخ آپادانا ۶. کاخ تچر ۷. کاخ هدیش ۸. کاخ سه در ۹. حرم‌سرا و موزه ۱۰. خزانه ۱۱. مجلس بارعام ۱۲. آرامگاه اردشیر سوم ۱۳. آرامگاه اردشیر دوم ۱۴. تخته‌سنگ حوض ۱۵. کاخ نیمه‌تمام اردشیر سوم. (همان) این مجموعه شامل ساختارهای معماری باشکوهی است که هر یک نقش مهمی در تاریخ و فرهنگ ایران ایفا کرده‌اند.

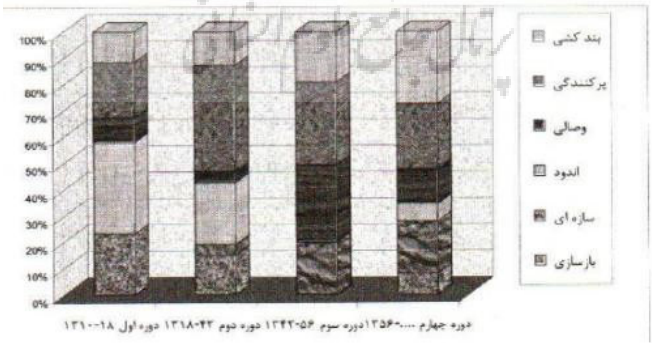
آسیب‌شناسی سنگ‌های مرمت شده در مجموعه تخت‌جمشید: محوطه تاریخی تخت‌جمشید از حدود سال ۱۳۱۰ تاکنون توسط گروه‌های متخصصین خارجی و داخلی مورد مطالعه، بررسی و اقدامات حفاظتی و مرمتی قرار گرفته است. در دوره اولیه در بین سال‌های ۱۳۱۰–۱۳۱۸ بر عهده مؤسسه شرق‌شناسی دانشگاه شیکاگو با سرپرستی ارنست هرتسفلد[9] و اریک اشمیت[10] و در دوره دوم در بین سال‌های ۱۳۲۰–۱۳۴۰ برعهده بنگاه علمی تخت‌جمشید با سرپرستی علی سامی و در دوره سوم حدود سال‌های ۱۳۴۳–۱۳۵۷ بر عهده مؤسسه ایتالیایی شرق میانه و دور ایزمئو به سرپرستی جوزپه تیلیا[11] و در دوره چهارم ۱۳۵۸–۱۳۸۰ بر عهده 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 دوره پنجم ۱۳۸۰ تاکنون این امر مهم برعهده بنیاد پژوهشی پارسه پاسارگاد و پایگاه میراث جهانی تخت‌جمشید بوده و توسط کارگروه‌های پارسه و کارگروه حفاظت و مرمت صورت گرفته است (Abdollahi et al., 2020).

ملاط ماسه و سیمان به‌عنوان یک ماده مرمتی در نقش استحکام‌بخش، پرکننده، چسباننده، ملاط و اندود در مرمت سنگ‌های تخت‌جمشید (شکل ۴) به فراوانی و به‌عنوان درزگیر، جهت وصالی، پرکنندگی، اندود سطحی و برای بازسازی سبکی قطعات سنگی در بخش‌های مختلف تخت جمشید استفاده‌شده است (Harati Ardestani, 2004).

کاربرد ملاط سیمانی و اقدام‌های گذشته مرمتی در دوره‌های 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 استفاده‌شده 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).



شکل ۴. حجم مرمت‌های صورت‌گرفته با ملاط ماسه‌سیمان در دوره‌های مختلف مرمت تخت‌جمشید (هراتی‌اردستانی، ۱۳۸۳).

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

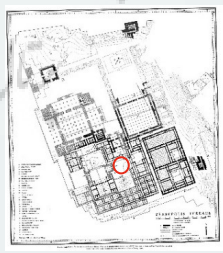
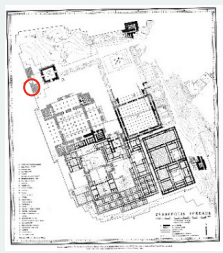
شکل ۵. کاربردهای مختلف ملاط سیمانی در پلکان ورودی در مرمت‌های گذشته تخت‌جمشید.

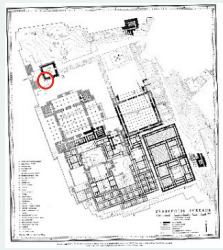
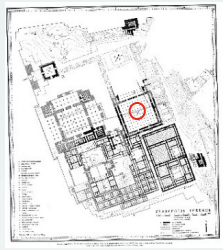
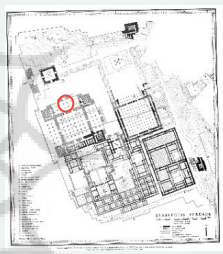
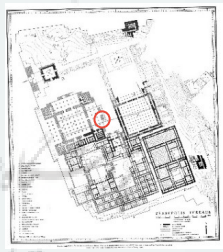
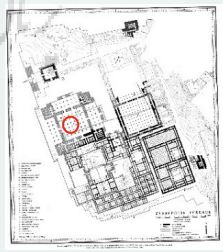
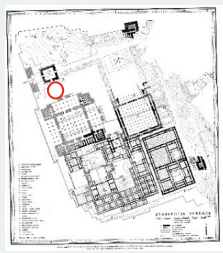
Figure 5.Various Applications of Cement Mortar in the Entrance Stairs during the Past Restorations of Persepolis.

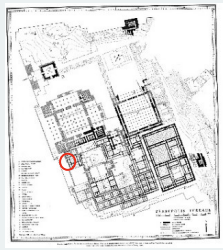
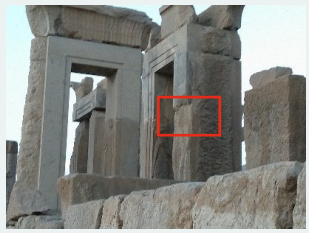
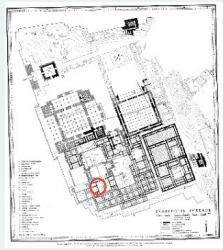
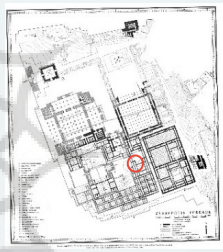
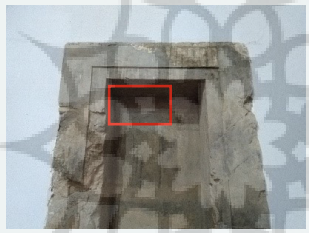
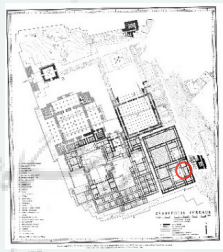
از ملاط ماسه‌سیمان به‌عنوان عاملی برای افزایش استحکام و تقویت قطعات سنگی و به‌عنوان پرکننده‌ای برای شکاف‌ها و فضاهای خالی بین قطعات سنگی به کار رفته است. علاوه بر این، از این ملاط برای چسباندن قطعات سنگی مجزا و نیز به‌عنوان اندود محافظتی استفاده‌شده است. در (جدول ۲) به برخی از

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

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

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

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

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

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 مادهٔ ضعیف‌تر می‌شود. در بعضی از مرمت‌های انجام شده 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 هوازدگی‌های رطوبت- محور را تسریع می‌کند. همچنین، عمل

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 به‌کار رفته در مرمت‌های مجموعه تخت‌جمشید، درصد جذب آب ملاط ماسه‌سیمان مورد استفاده در مرمت‌های گذشته در تخت‌جمشید به میزان ۸.۰۸ الی ۱۲.۴۲ درصد بوده است و درصد جذب آب نمونه سنگ رحمت ۰.۵۱ درصد و سنگ مجدآباد حدود ۰.۲ درصد است که به‌دلیل برگشت‌پذیر نبودن ملاط ماسه سیمان، در مواردی که آسیب‌ها و مشکلاتی ایجاد کرده‌اند، قابل حذف کردن نیستند (Abed Isfahani & Harati Ardestani, 2008).

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.

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 به‌منظور 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).

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 مویینگی: 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.

شکل ۸. از راست به چپ: آزمون مویینگی 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 مویینگی بین نمونه ملاط سیمانی قبل و بعد از اعمال مواد نانو تفاوت قابل توجهی دارد. تفاوت میزان جذب رطوبت در آزمون مویینگی 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.

جدول ۳. ارتفاع رطوبت حاصل از جذب مویینگی 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

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).

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.

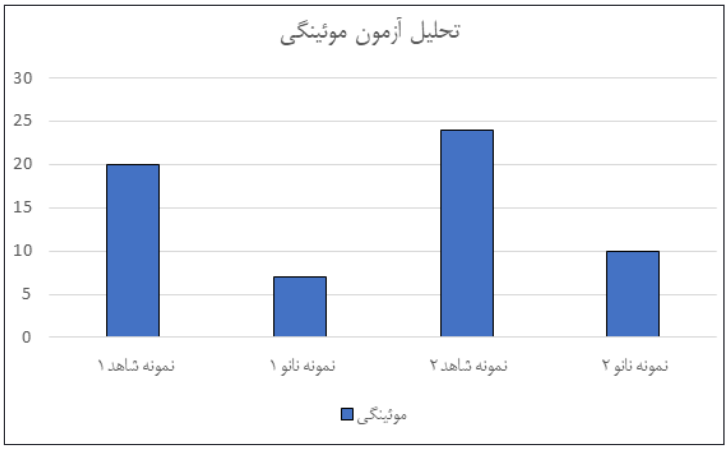
$$\text{درصد جذب آب} = \frac{\text{وزن اولیه} - \text{وزن ثانویه}}{\text{وزن اولیه}} \times ۱۰۰$$

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.

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 مویینگی (مشکین‌فام‌فرد، ۱۴۰۰).

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

تحلیل یافته‌ها و بحث

با مقایسه نتایج بررسی انجام شده بر روی نمونه‌های شاهد قبل و بعد از اعمال مواد نانو، تأثیر هر دو ماده نانو به‌عنوان 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 پژوهش‌می‌تواند به بهبود عملکرد و مقاومت ملاط سیمان استفاده‌شده در مرمت‌ها در برابر شرایط سخت آب و هوایی کمک کند.

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.

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).

بـر اسـاس مقایسـه نتایـج بیـن نمونه‌هـای شـاهد قبـل و بعـد از اعمـال فـراز سیـل و زایکوسیـل مکـس مشخص‌شـد کـه ملاط سیمـانی، مـاده نانـو زایکوسیـل مکـس عملکـرد بهتـری از فـراز سیـل دارد، اگرچـه هـر تأثیـر نسـبتاً کـمی در کاهـش جـذب رطوبـت داشـته‌اند. میـزان جـذب آب بـا گـذر زمـان نشـان می‌دهـد در هـر دو نمونـه ملاط سیمـانی ایـن میـزان افزایـش یافتـه و ایـن موضـوع نشـان‌دهنده کاهـش بـازدهی و عملکـرد ایـن مـاده بـا گـذر زمـان اسـت. همچنیـن نتایـج نشـان می‌دهد کـه میـزان جـذب آب بهتریـن نمونـه ملاط سیمـان نانـو شـده ۶ درصـد و حـدوداً ده برابـر بیشـتر از میـزان جـذب آب اندازه‌گیـری شـده در نمونـه سـنگ‌های تخت‌جمشیـد اسـت (کمتـر از ۰/۲ درصـد کـه در پژوهـش عابداصفهـانی و هراتی‌اردسـتانی، ۱۳۸۷) ثبـت شـده اسـت.

نتیجه‌گیری

در ایـن پژوهـش، عملکـرد دو مـاده نانـو بـا نام‌هـای زایکوسیـل مکـس و فـراز سیـل در کاهش جـذب آب ملاط سیمـانی مـورد بـررسی قـرار گرفـت. عملکـرد زایکوسیـل مکـس و فـراز سیـل در ملاط سیمـانی کاملاً متفـاوت بـود. به‌عنـوان مثـال، زایکوسیـل مکـس عملکـرد ۶۰/۵ درصدی و فـراز سیـل عملکـرد ۴۸/۰۲ درصـدی بـرای ملاط سیمـانی داشـتند. در نتیجـه می‌تـوان گفـت کـه زایکوسیـل مکـس عملکـرد بهتـری بـر روی سـطوح سیمـانی مرمـت شـده در تخت‌جمشیـد را داشـت. در خصـوص کیفیـت و کارایی نمونـه مـواد بـه‌کار رفتـه در ایـن مطالعـه کـه به‌عنـوان نانـو مـواد عایـق رطوبـتی بـا پایـداری ده سـاله در برابـر رطوبـت معـرفی شـده‌اند، می تـوان گفـت کـه خلاف واقعیـت اسـت؛ زیـرا ۱) ایـن مـواد در کمتـر از دو روز مقاومـت و نفوذناپذیـری خـود را در برابـر رطوبـت از دسـت دادنـد و تقریبـاً تـا چنـد سـاعت اول نتایـج آزمـون درصـد جـذب آب قابل‌قبـول بـود و بـا گذشـت زمـان میـزان جـذب آب آن افزایـش یافـت نتایـج ارزیـابی کاهش رطوبـت موینـگی در مـورد نمونـه هـای نانـو شـده بـا هـر دو مـاده، مناسـب ارزیـابی شـد. هـر دوی ایـن مـواد تغییـر رنـگ بسیـار جـزئی در نمونه‌هـای شـاهد ایجـاد کردنـد؛ و در نهایـت بـا توجـه بـه تفـاوت بیـش از ده برابـری میـزان جـذب آب ملاط‌هـای سیمـانی مـورد اسـتفاده بـرای مرمت در مجموعـه تخت‌جمشیـد بـا سـنگ‌های آن، می‌تـوان گفـت کـه نیازمنـد مـوادی بـا کیفیـت بهتـر از نظـر میـزان نفوذپذیـری در برابـر آب بـرای مرمـت سـنگ به‌خصـوص در ایـن محوطـه ارزشـمند میـراث جهـانی هسـتیم؛ و بـرای دسـتیابی بـه ایـن مهـم، پژوهش‌هـای بیشـتر و اسـتفاده از سـایر مـواد نانـو بـا مانـدگاری و ویژگی‌هـای مطلوب‌تـر نیـاز اسـت. از ایـن رو بـه پژوهشـگران علاقمنـد بـه مطالعه در ایـن حـوزه توصیـه می‌شـود کـه بـا توجـه بـه اهمیـت تأثیـر رطوبـت بـر افزایـش سـرعت تخریـب آثـار تاریـخی، در پرتـو افزایـش مشـکلات حاصـل از تغییـرات اقلیـمی و زیسـت محیـطی، مطالعـه پیرامـون اسـتفاده از فناوری‌هـای نویـن را بـرای بهبـود شیوه‌هـای حفاظـتی در برابـر رطوبـت بـرای ایـن آثـار در دسـتور کار خـود قـرار دهنـد؛ و در ایـن مسیـر، علاوه بـر بـررسی تأثیـرات جانـبی دیگـر عوامـل فرسـاینده و ارزیـابی ایـن مـواد تحلیـل سـایر اقدامـات مرمـتی انجـام شـده در تخت‌جمشیـد در دهـه گذشـته را نیـز مـورد توجـه قـرار دهنـد.

سپاسگزاری

بدینوسیلـه از آقایـان دکتـر حمیـد فـدایی، مدیریـت سـابق محتـرم و پـرتلاش پایـگاه میـراث جهـانی تخت‌جمشیـد، بابـت همـکاری و داوری پایان‌نامـه‌ای کـه ایـن مقالـه مسـتخرج از آن اسـت، دکتـر علیرضـا عسـکری چـاوردی، مدیریـت محتـرم فعـلی پایگاه میـراث جهـانی تخت‌جمشید، بـرای همـکاری و هماهنگی‌هـای لازم جهـت پیشـبرد ایـن پژوهـش قـدردانی می‌نمایـم. از اسـتاد سیـروس زارع، اسـتادکار باتجربـه و دارای درجـه یـک هنـری، به‌خاطـر مشـاوره و راهنمایی‌هـای ارزشـمند در خصـوص مرمت‌هـای صورت‌گرفتـه بـا ملاط سیمـان در تخت‌جمشیـد، تشـکر ویـژه دارم. همچنیـن از خانـم مهنـاز بردبـار بابـت همـکاری و دسـترسی بـه آرشیـو کتابخانـه تخت‌جمشیـد و از جنـاب آقـای مهنـدس مسـعود تـقی‌زاده بـه دلیـل همـکاری در انجـام آزمون‌هـا صمیمانـه قـدردانی می‌کنـم.

حامیان مالی و معنوی

ایـن مقالـه برگرفتـه از پایان‌نامـه کارشناسی‌ارشـد در رشـته مرمـت و احیـای ابنیـه و بافت‌هـای تاریـخی گرایـش حفاظـت میـراث معمـاری نگارنـده اول بـا عنـوان «روش‌هـای حفاظـت از بناهـای سـنگی در برابـر رطوبـت با بهره‌گیـری از فنـاوری نانـو؛ نمونـه مـوردی میـراث جهـانی

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 نانوفراز 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].

[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 خیاوی، 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.; Firouzmendi, 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؛ خمسه، هایده. (۱۳۹۸). کنکاشی پیرامون بازشناسی عوامل تخریب مجموعهٔ تخت‌جمشید. مطالعات هنر اسلامی، ۳۶(۱۵)، ۷۹-۶۱].

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

بـررسی تأثیـرات ملاط ماسـه و سیمـان در مرمـت آثـار سـنگی محوطـه میـراث جهـانی تخت‌جمشیـد. مرمـت و پژوهـش، ۴(۲)، ۸۴-۷۸].

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].

[عبدالـهی, پریسـا و سـامانیان, کـورس . (۱۳۹۷). جایـگاه ارزش و ارزش‌شـناسی در رویکردهـای گذشـته‌ی حفاظـت و مرمـت در محوطـه‌ی میـراث جهـانی تخـت جمشیـد. مطالعـات باسـتان شـناسی ۱۰(۲) . ۲۰۳-۱۸۵].

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].

[عبدالـهی، پریسـا؛ وطن‌دوسـت، رسـول؛ و سـامانیان، کـورس. (۱۳۹۹). بـررسی مرمت‌هـای تکمیـلی در نقش‌برجسـته‌های سـنگی محوطـه تاریـخی تخت‌جمشیـد از منظـر جهان‌بیـنی دوران هخامنـشی: مطالعـه‌ای تطبیـقی. مرمـت و معمـاری ایران، ۱۰(۲۱)، ۷۶-۶۳].

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].

[عطـاری، مهشیـد. (۱۳۸۸). بـررسی اسـتحکام‌بخشی و حفاظـت از سـنگ‌آهک سیـاه در محوطـه میـراث جهـانی پاسـارگاد بـا اسـتفاده از پلیمرهـا امکان‌سـنجی اسـتفاده از نانـوذرات. پایان‌نامـه کارشناسی‌ارشـد مرمـت اشیـاء فرهنـگی و تاریـخی، دانشـگاه هنـر].

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

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].

[سـلطانی، امیرحسیـن؛ فیروزمنـدی، بهمـن؛ شـعبانی‌صمغ‌آبادی، رضا؛خمسـه، هایـده. (۱۳۹۹). بـه تخـت نشسـتن داریـوش بزرگ و اردشیـر اول و نقـش آن‌هـا در توسـعه عمـرانی تخت‌جمشیـد. فصلنامه تاریـخ، ۱۵(۵۷)، ۹۴-۷۹].

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].

[شیـخ‌الاسلامی، رضـا. (۱۳۸۷). بـررسی و امکان‌سـنجی اسـتفاده از ملاط ماسـه‌سیمان تهیه‌شـده بـا میکروسیلیـس در مرمـت آثـار سـنگی مجموعـه جهـانی پارسـه – پاسـارگاد. پایان‌نامـه کارشناسی‌ارشـد مرمـت آثـار تاریـخی، دانشـگاه هنـر اصفهـان]

Shahbazi, A.S. (2017). Persepolis Documentation Guide. Tehran: Safiran Publishing. [In Persian].

[شـهبازی، علیرضـا شـاپور. (۱۳۹۶). راهنمـای مسـتند تخت‌جمشیـد. تهـران: نشـر سـفیران].

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].

[صالحیـون، لیلا؛ آزادی، مهرنـاز؛ وحیـدزاده، رضـا؛ تقی‌پـور، فائـزه. (۱۳۹۹). تأثیـر حفاظـت پیشـگیرانه بـر ارزش‌هـای فرهنـگی مجموعه‌هـای خصـوصی میـراث کهـن. مطالعـات باستان‌شـناسی پارسـه، ۱۳(۴)، ۲۰۵-۱۹۳].

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].

[عابـد اصفهـانی، عبـاس؛ هـراتی اردسـتانی، ناهیـد. (۱۳۸۷).

[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(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.

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].

[نعمانی‌خیاوی، 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].

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., Esmaeillou, 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., Verstrynge, 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.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی