Journal of Research on
ARCHAEOMETRY
A Peer-Reviewed Academic Journal of Archaeological and Conservation Science Studies

Tabriz Islamic Art University

Review Paper

Bibliometric Analysis of the Use of Microorganisms in the Restoration of Cultural Heritage Substrates

Azam Aliasghari Veshareh [1, 2], **Parisa Mohammadi** [2, 3*]

1. Assistant Professor, Department of Microbiology, Faculty of Biological Sciences, Alzahra University, Tehran, Iran
2. Research Center for Applied Microbiology and Microbial Biotechnology, Alzahra University, Tehran, Iran
3. Professor, Department of Microbiology, Faculty of Biological Sciences, Alzahra University, Tehran, Iran

* Correspondence: p.mohammadi@alzahra.ac.ir

Abstract

Cultural heritage materials and objects are constantly vulnerable to physical, chemical, and biological damage. Preserving these valuable works requires preventive and restorative efforts to protect this precious heritage. Traditional restoration techniques, primarily dependent on physical and chemical approaches, often is encountered limitations like temporary results, potential damage during the restoration process, health hazards due to toxic substances, and risks to the environment. However, advances in the field of restoration have paved the way for the use of biological approaches. In these new methods, microorganisms are not only not considered as a threat to works of art, but are used as effective tools in the restoration process. This study employed a bibliometric analysis based on data from the Web of Science to investigate the structure, trends, and research networks in this field. The findings indicate an exponential growth of publications since 2015, concentrated in leading countries such as Italy, Spain, and China. The keyword analysis revealed three research main clusters, including bioconsolidation, biocleaning, and biopreservation in co-occurrence. This bibliometric analysis not only provides a comprehensive map of literatures, but also identifies future directions of researches, and emphasis the need to develop standardized frameworks for applying biotechnological methods in the conservation of cultural heritage.

Keywords: Biocalcification, Bioconsolidation, Biocleaning, Biopreservation, Enzyme, Microbial Treatment

Received: 2026/02/1
Revised: 2026/06/10
Accepted: 2026/06/12
Published: 2026/06/30

Copyright: ©2026 by the Authors. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license)

https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0

Downloaded from jra-tabriziau.ir at 22:37 +0330 on Sunday November 15th 2026

[DOI: 10.66224/jra.2026.12.112]

Downloaded from jra-tabriziau.ir at 22:37 +0330 on Sunday November 15th 2026

Introduction

Stone cultural heritage undergoes deterioration, due to physical, chemical, and biological weathering processes, which weaken its structure over time. To preserve historically valuable monuments, interventions such as cleaning, consolidation, and replacement of damaged sections are essential to return their structures to their original state. In recent years, biotechnological approachs have suggested as a promising alternative to traditional conservation methods. This approach utilizes microorganisms and their metabolic processes for biocleaning, bioconsolidation and biocontrol. These biological treatments offer advantages such as low cost, minimal invasiveness, and high precision. This study reviews the applications and innovations in biorestoration, and utilizes bibliometric analysis to map research trends, knowledge gaps, and future direction for applying sustainable biological strategies in cultural heritage conservation.

Methodology

In this study, based on indexed articles from authoritative databases such as Scopus and Web of Science, the overview of the use of microorganisms in the restoration and the conservation of cultural heritage substrates was done. A systematic search was also conducted using the Web of Science database with the combined keywords: (Microorganism OR Bacteria OR fungi) AND (Bioconsolidation OR Carbonatogenes OR Biocalcification OR biocleaning OR bioconservation OR Biomineralisation) AND (cultural heritage OR Stone OR marble OR paper). The search was performed in the title, abstract, and keywords of papers. For the purpose of collecting the most comprehensive dataset, the time frame was set from the beginning of the database's indexing until January 4, 2026. No document type restrictions were applied to retrieve all relevant research articles, review papers, conference abstracts, and other related documents. From the initial 108 papers, irrelevant papers were removed, and the final selection was made based on thematic relevance and access to empirical data. For the bibliometric analysis and the creation of scientific maps, the software VOSviewer (version 1.6.20) and the Bibliometrix package were used. The bibliographic data were analyzed with Bibliometrix after extraction and standardization, and then imported into VOSviewer to visualize keyword co-occurrence networks. The co-occurrence analysis was performed on keywords with a minimum frequency of 5, and the conceptual maps were generated.

Results

The results of the keyword co-occurrence analysis using VOSviewer, with a minimum frequency of 5, revealed that research on the use of microorganisms in heritage restoration is primarily concentrated mainly in three thematic clusters. The first cluster, centered on bioconsolidation focuses on using carbonate producing bacteria to precipitate calcium carbonate and strengthen stone and marble surfaces. The second cluster, labeled biocleaning investigates the use of bacteria and fungi to remove organic and inorganic pollutants from cultural artifacts. The third cluster, under the title bioconservation focuses particularly on microbial applications for conserving organic materials like paper. The generated map shows nodes representing keywords, where their size denotes frequency, and the links between them indicate co-occurrence and conceptual link strength. This map reveals a strong, meaningful connection between keywords such as 'Biocleaning' and 'Cultural Heritage,' as well as 'Carbonatogenes' and 'Stone,' indicating a current research trend toward biocleaning and mineral consolidation. Simultaneously, despite significant advancements, a noticeable research gap exists in applying these methods to non-stone materials like wood, metals, and wall paintings, as well as in long-term studies to evaluate the stability and safety of biorestoration technologies.

Analysis of annual scientific production data shows that papers in this field have followed a growing, and accelerating trend from the 1990s to the present. The number of publications was limited and scattered in the initial decade (1993 to the early 2000s), indicating the experimental phase of research. From the mid-2000s, publications gradually increased with exponential growth observed after 2015. The highest volume of articles was recorded in 2021. This growth pattern clearly demonstrates the increasing attention from researchers and the continuous development of knowledge and technology in biorestoration over the last two decades.

The geographical distribution analysis based on the corresponding authors' countries shows that Italy and Spain are the primary countries, accounting for the largest share of publications. China and India also show significant contributions, indicating the expansion of research beyond Europe. While most studies are single-country publications (SCP), a notable share of multi-country publications (MCP) are in countries like Spain, Italy, and the UK points to international research networks. Citation analysis further confirms the leader of Italy and Spain not only in production but also in scientific impact, with China ranking third. Interestingly, countries like Belgium and Portugal rank high in citations despite

[DOI: 10.66224/jra.2026.12.112]

Downloaded from jra-tabriziau.ir at 22:37 +0330 on Sunday November 15th 2026

a lower article count, suggesting their focus on innovative, foundational studies widely referenced by the international community.

Discussion

A primary factor leading to the erosion of stone in historical buildings is moisture and rainwater penetration. Over decades, this gradually increases substrate porosity, resulting in the detachment and disintegration of mineral components. The traditional commercial consolidants often are not very efficient and can cause harmful side effects, such as reduced structural coherence, aesthetic alteration, and accelerated deterioration. Therefore, a promising alternative is the use of bacterial calcium carbonate precipitation. The biomineralization process occurs widespread in nature where microorganisms precipitate minerals as part of their metabolic pathway. This aims to restore the weathered lime matrix of the stone.

Bioconsolidation can occur through passive or active microbial metabolic pathways. The passive pathway involves bacterial activity that chemically alters the micro-environment, and leading to the accumulation of carbonate and bicarbonate ions and subsequent their deposition via nitrogen or sulfur cycles. Active pathway involves direct ionic exchange across cell membranes. The process can be autotrophic or heterotrophic, and common heterotrophic mechanisms including ammonification of amino acids, nitrate reduction, and urea hydrolysis. A novel approach is using indigenous microorganisms isolated from the stone itself.

Studies demonstrate that microbially-induced carbonate precipitation can improve the physical and mechanical properties of porous stones. For instance, treatment of weathered limestone with Bacillus subtilis created uniform consolidation up to 30 mm deep, restored drilling resistance values comparable with fresh stone (9-15 N), and maintained a low porosity of stone (~6%). However, this positive effect is not consistently observed on low-porosity stones like marble. Alternative approaches involve stimulating the stone's native microbial community with nutrient solutions, which can enrich the population with carbonate-producing genera like Arthrobacter and Bacillus. Their consolidating efficacy requires further validation.

Recently, in research on the biocleaning of cultural heritage microorganisms are used as biological agents that play an effective role in the recovery and conservation of works of art and historical monuments. In these innovative biological approaches, it was shown only a few known microorganisms play a destructive role, and on the contrary, their role in most environmental processes is beneficial. In this approach, biological reactions that occur naturally in ecosystems are reproduced under controlled conditions and optimized for the protection of cultural heritage. This method has significant advantages, such as greater safety, high efficiency, cost reduction and sustainability in the preservation and restoration of cultural heritage.

The use of enzymes in the conservation of cultural relics began in the 1970s, and today, hydrolytic enzymes in particular have replaced chemical methods due to their ability to gently and purposefully decompose disturbing organic materials such as adhesives, protein deposits, and fat spots. Despite the advancement of knowledge and access to pure enzymes, there are still challenges such as the low stability and limited performance of enzmyes. Novel research has increased their stability and efficiency by immobilizing enzymes such as alpha amylase on gold nanoparticles. Also, the use of enzymes such as glucose oxidase to produce hydrogen peroxide and remove biofilm from stony surfaces is a successful example of the application of enzymes.

Conclusion

The use of microorganisms in the restoration of cultural heritage objects represent a novel, targeted, environmentally compatible, and safe approach for human health and the ecosystem. This method not only offers a sustainable solution, but also has the potential to become an accepted and effective technique for the conservation of existing architectural and building heritage. Overall, these innovative biological achievements emphasis the undeniable significance of microorganisms and their metabolites in the restoration and preservation of cultural heritage objects and buildings. These agents can act not only as safe alternatives to conventional chemicals and methods, but also contribute to environmental sustainability and enhance the durability of historical artifacts by emulating natural processes. However, despite quantitative and qualitative expansion in research, existing gaps particularly regarding their application on non-stone materials and the long-term evaluation of their efficacy and stability indicate that this field still requires further investigation.

Author Contributions: The article was written by two authors. The idea and overall design of the study were carried out by the second author, Parisa Mohammadi. The bibliometric analysis and writing of the draft of the article were carried out by the first author, Azam Aliasghari Veshareh. The structural review, corrections, and final editing of the text were carried out by the second author, Parisa Mohammadi. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This study did not receive any external funding.

[DOI: 10.66224/jra.2026.12.112]

Downloaded from jra-tabriziau.ir at 22:37 +0330 on Sunday November 15th 2026

Data Availability Statement: All data used and analyzed in this study were extracted from the Web of Science database, and the raw datasets will be available upon reasonable request from the corresponding author.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

[DOI: 10.66224/jra.2026.12.112]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 22:37 +0330 on Sunday November 15th 2026

پژوهه باستان سنجی
دانشگاه هنر اسلامی تبریز

مقاله مروری

تحلیل کتاب‌سنجی استفاده از میکروارگانیسم‌ها در مرمت بسترهای میراث فرهنگی

اعظم علی اصغری وشاره [۱،۲]، پریسا محمدی [۲،۳]*

۱. استادیار،گروه میکروبیولوژی، دانشکده علوم زیستی، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران
۲. مرکز تحقیقات میکروبیولوژی کاربردی و بیوتکنولوژی میکروبی، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران
۳. استاد، گروه میکروبیولوژی، دانشکده علوم زیستی، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران
* مسئول مکاتبات: p.mohammadi@alzahra.ac.ir

چکیده

مواد و اشیای میراث فرهنگی همواره در معرض آسیب‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و زیستی قرار دارند. برای حفظ این آثار ارزشمند، نیاز به اقدامات پیشگیرانه و درمانی مستمر وجود دارد تا از تخریب این میراث گران‌بها جلوگیری شود. روش‌های سنتی مرمت، که عمدتاً بر فناوری‌های فیزیکی و شیمیایی تمرکز دارند، با چالش‌هایی همچون تأثیرات کوتاه‌مدت، خطر ایجاد آسیب بیشتر حین فرآیند ترمیم، اثرات سمی بر سلامت انسان و تهدیدات زیست‌محیطی روبه‌رو هستند. با این حال، پیشرفت‌های تحقیقاتی در حوزه مرمت، زمینه را برای بهره‌گیری از رویکردهای بازیابی زیستی فراهم کرده است. در این روش‌های نوین، میکروارگانیسم‌ها نه‌تنها به‌عنوان تهدیدی برای آثار هنری شناخته نمی‌شوند، بلکه به‌عنوان ابزارهای مؤثر در فرآیند مرمت استفاده می‌شوند. این پژوهش، با به‌کارگیری روش تحلیل کتاب‌سنجی بر اساس داده‌های پایگاه Web of Science، به مطالعه ساختار، روندها و شبکه‌های پژوهشی این حوزه از علم پرداخته است. یافته‌ها حاکی از رشد تصاعدی انتشارات از سال ۲۰۱۵ به بعد با تمرکز پژوهشی در کشورهای پیشرویی چون ایتالیا، اسپانیا و چین است. تحلیل هم‌رخدادی کلیدواژه‌ها، سه خوشه اصلی استحکام بخشی‌زیستی، پاک‌سازی‌زیستی و حفاظت زیستی را آشکار ساخت. این تحلیل کتاب‌سنجی نه‌تنها نقشه‌ای جامع از پژوهش‌های انجام شده در این موضوع را ارائه می‌دهد، بلکه چشم‌اندازهای پژوهشی آینده و ضرورت توسعه چارچوب‌های استاندارد در به‌کارگیری فناوری‌های زیستی در مرمت میراث فرهنگی را مشخص می‌سازد.

واژگان کلیدی: آنزیم، پاکسازی زیستی، تثبیت زیستی، تیمار میکروبی، زیست‌آهکی‌سازی، حفاظت زیستی

دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۲
آخرین اصلاح: ۱۴۰۵/۳/۲۰
پذیرش: ۱۴۰۵/۳/۲۲
انتشار: ۱۴۰۵/۴/۹

Copyright: ©2026 by the Authors. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license)

https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0

[DOI: 10.66224/jra.2026.12.112]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 22:37 +0330 on Sunday November 15th 2026

۱. مقدمه

میراث فرهنگی سنگی در گذر زمان تحت تأثیر فرآیند هوازدگی قرار می‌گیرد. این فرآیند تخریبی در اثر عملکرد هم‌زمان و متقابل عوامل فیزیکی، شیمیایی و زیستی رخ می‌دهد و پیامدهایی همچون تغییر شکل، انحلال اجزای سنگ، افزایش تخلخل و تضعیف ساختار کلی آن را به دنبال دارد. هنگامی که یک بنا از ارزش تاریخی و فرهنگی برخوردار باشد، انجام اقدامات مرمتی دقیق و اصولی برای بازگردلدن آن به وضعیت اولیه، تا حد امکان، ضرورت می‌یلبد. این اقدامات می‌توانند شامل حذف رسوبات و آلودگی‌های سطحی ناخواسته (پاک‌سازی)، تقویت بخش‌های آسیب‌دیده سازه (استحکام‌بخشی) و در نهایت، جایگزینی بخش‌های فرسوده باشند (Ortega-Morales and Gaylarde, 2021).

در دو دهه اخیر، فناوری‌های زیستی در حوزه حفاظت از میراث فرهنگی به‌عنوان جایگزینی کارآمد برای برخی روش‌های سنتی نگهداری و مرمت آثار فرهنگی مطرح شده‌اند. این رویکردهای نوین، امکان بهره‌گیری از میکروارگانیسم‌ها و فرآیندهای متابولیکی آن‌ها را در حفاظت و مرمت آثار هنری و تاریخی فراهم کرده‌اند (Ranalli and Zanardini, 2021). محور اصلی این رویکردها، استفاده از میکروارگانیسم‌های مفید به‌عنوان عوامل مرمتی (Restorative Agents) است. این فناوری‌های زیستی نوآورانه، با تکیه بر فعالیت‌های آنزیمی و متابولیکی میکروارگانیسم‌ها، هم در فرآیند بازسازی و هم در حفاظت از آثار فرهنگی کاربرد دارند. میکروارگانیسم‌های موردنظر را می‌توان از محیط‌های مختلف جداسازی و غربالگری کرد و بر اساس قابلیت‌ها و ویژگی‌های عملکردی آن‌ها مورد ارزیابی قرار داد. از جمله این قابلیت‌ها می‌توان به حذف رسوبات آلی و معدنی ناخواسته (پاک‌سازی زیستی)، انجام فرآیند کانی‌سازی زیستی (Biomineralization) با هدف تقویت سنگ‌ها و بناهای تاریخی (استحکام‌بخشی زیستی یا Bioconsolidation) و استفاده از آن‌ها به‌عنوان عوامل بالقوه ضدعفونی‌کننده در فرآیند کنترل زیستی اشاره کرد (Soffritti et al., 2019). ترکیبات زیستی، از جمله کربنات کلسیم، می‌توانند در فرآیند مرمت زیستی سنگ‌های فرسوده به کار گرفته شوند. همچنین، لایه‌های اگزالات کلسیم که در نتیجه فعالیت میکروارگانیسم‌ها تشکیل می‌شوند، قابلیت ایفای نقش به‌عنوان پوشش‌های محافظ را دارند. روش‌های مرمت زیستی، در مقایسه با فنون متداول فیزیکوشیمیایی، از مزایایی همچون هزینه کمتر، تهاجم حداقلی به بستر، دقت بیشتر و سهولت کنترل برخوردارند (Pyzik et al., 2021).

پژوهش حاضر با هدف مرور کاربردها و نوآوری‌های حوزه مرمت زیستی میراث فرهنگی و تحلیل ساختار و روندهای پژوهشی آن، با بهره‌گیری از روش کتاب‌سنجی انجام شده است. در این راستا، مطالعه حاضر دو رویکرد مفهومی و کمّی را به‌طور هم‌زمان دنبال می‌کند. در رویکرد نخست، اصول و سازوکارهای بهره‌گیری از میکروارگانیسم‌ها و فرآورده‌های حاصل از فعالیت آن‌ها در حفاظت از آثار فرهنگی بررسی می‌شود. در رویکرد دوم، با استفاده از تحلیل داده‌های استخراج‌شده از پایگاه‌های اطلاعاتی معتبر، نقشه علمی این حوزه از نظر تولیدات علمی، شبکه‌های پژوهشی، خوشه‌های موضوعی و شکاف‌های دانشی ترسیم می‌شود. در نهایت، این مقاله می‌کوشد با تلفیق یافته‌های نظری و نتایج تحلیل‌های کتاب‌سنجی، ضمن ارائه تصویری روشن از دستاوردهای کنونی این حوزه، چشم‌اندازها و اولویت‌های پژوهشی آینده را در راستای توسعه فناوری‌های زیستی پایدار و استاندارد در حفاظت از میراث فرهنگی مشخص کند.

۲. مواد و روش‌ها

در این پژوهش، با استناد به مقالات معتبر نمایه‌شده در پایگاه‌های اطلاعاتی علمی، از جمله Scopus و Web of Science، مروری اجمالی بر کاربرد میکروارگانیسم‌ها در بازسازی و مرمت بسترهای مرتبط با میراث فرهنگی انجام شده است. همچنین، به‌منظور گردآوری و تحلیل نظام‌مند داده‌های کتاب‌شناختی، جست‌وجویی ساختاریافته در پایگاه Web of Science با استفاده از ترکیب کلیدواژه‌های زیر صورت گرفت:

(Microorganism OR Bacteria OR Fungi) AND (Bioconsolidation OR Carbonatogenesis OR Biocalcification OR Biocleaning OR Bio-conservation OR Biomineralisation) AND (Cultural Heritage OR Stone OR Marble OR Paper)

جست‌وجو در فیلدهای عنوان، چکیده و کلیدواژه‌های نویسندگان انجام شد. به‌منظور گردآوری جامع‌ترین مجموعه داده‌های در دسترس، بازه زمانی جست‌وجو از آغاز نمایه‌سازی در پایگاه تا ۴ ژانویه ۲۰۲۶ در نظر گرفته شد. همچنین، هیچ محدودیتی از نظر نوع سند اعمال نشد تا انواع مدارک علمی مرتبط، از جمله مقالات پژوهشی و مروری، چکیده‌های کنفرانسی و سایر اسناد علمی، امکان بازیابی داشته باشند.

در مجموع، ۱۰۸ مدرک در جست‌وجوی اولیه بازیابی شد. پس از حذف موارد نامرتبط، مدارک باقی‌مانده بر اساس میزان ارتباط موضوعی و برخورداری از داده‌های قابل‌استفاده برای تحلیل انتخاب شدند. به‌منظور انجام فرآیند غربالگری، معیارهای ورود و خروج به شرح زیر تعریف شد. معیارهای ورود شامل نمایه‌شدن در پایگاه Web of Science، برخورداری از حداقل یکی از کلیدواژه‌های تعیین‌شده در عنوان، چکیده یا کلیدواژه‌های نویسندگان، ارتباط مستقیم با کاربرد میکروارگانیسم‌ها در مرمت یا حفاظت از میراث فرهنگی و برخورداری از داده‌های تجربی یا محتوای مروری مرتبط با موضوع پژوهش بود. در مقابل، مدارک فاقد ارتباط مستقیم با موضوع اصلی، موارد فاقد متن کامل یا داده‌های قابل‌استخراج و همچنین اسناد تکراری از فرآیند بررسی کنار گذاشته شدند.

فرآیند غربالگری در دو مرحله انجام گرفت. در مرحله نخست، عنوان و چکیده مدارک بازیابی‌شده بررسی و موارد فاقد ارتباط موضوعی حذف شدند. در مرحله دوم، متن کامل مدارک باقی‌مانده مطالعه و انطباق آن‌ها با معیارهای ورود ارزیابی شد. برای تحلیل کتاب‌سنجی و ترسیم نقشه‌های علمی، از نرم‌افزار VOSviewer (نسخه ۱.۶.۲۰) و بسته نرم‌افزاری Bibliometrix استفاده شد. داده‌های کتاب‌شناختی پس از استخراج، پاک‌سازی و یکسان‌سازی، با استفاده از Bibliometrix مورد تحلیل قرار گرفتند و سپس، داده‌های مربوط به کلیدواژه‌ها برای مصورسازی شبکه‌های هم‌رخدادی به نرم‌افزار VOSviewer انتقال یافتند. تحلیل هم‌رخدادی کلیدواژه‌ها با در نظر

[DOI: 10.66224/jra.2026.12.112]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 22:37 +0330 on Sunday November 15th 2026

گرفتن حداقل پنج بار تکرار برای هر کلیدواژه انجام شـــد و بر اســـاس نتایج حاصل، نقشه‌های مفهومی و شبکه‌های موضوعی پژوهش ترسیم شدند.

۳. نتایج و بحث

۳-۱. استحکام‌بخشی زیستی

یکی از عوامل اصلی مؤثر در فرسایش سنگ‌های به‌کاررفته در بناهای تاریخی، نفوذ رطوبت و تأثیر بارندگی است. این عوامل در گذر زمان و طی دوره‌هایی از چند دهه تا چند قرن، به‌تدریج موجب افزایش تخلخل بستر سنگی می‌شوند و در نهایت، جدایش و فروپاشی اجزای معدنی آن را به دنبال دارند. تداوم این فرآیند فرسایشی، یکپارچگی ساختاری و ارزش تاریخی بناها را به‌شدت تهدید می‌کند (Spairani-Berrio et al., 2023).

برای مقابله با این نوع آسیب‌ها، محصولات تجاری متنوعی با ترکیبات و ویژگی‌های کانی‌شناختی متفاوت، به‌منظور بهبود خصوصیات سطحی آثار سنگی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بااین‌حال، تاکنون هیچ‌یک از این محصولات نتوانسته‌اند عملکردی کاملاً رضایت‌بخش و بدون عوارض جانبی ارائه دهند. برخی از این ترکیبات ممکن است پیامدهای نامطلوبی بر بستر سنگی داشته باشند که از جمله آن‌ها می‌توان به کاهش یکپارچگی ساختاری، افت کیفیت ظاهری سطح، اختلال در قابلیت تنفس سنگ و تسریع فرآیند تخریب اشاره کرد. همچنین، ناسازگاری این مواد با ساختار سنگ می‌تواند به افزایش تخلخل، کاهش مقاومت مکانیکی و تغییر رنگ سطح منجر شود. افزون بر این، کاربرد برخی از این مواد با تشکیل لایه‌های سطحی نازکی همراه است که ممکن است در بلندمدت روند فرسایش سنگ را تشدید کنند. ازاین‌رو، استفاده از این ترکیبات باید با احتیاط و پس از ارزیابی دقیق پیامدهای احتمالی آن‌ها صورت گیرد؛ زیرا در برخی موارد، معایب ناشی از کاربرد آن‌ها می‌تواند بر مزایای مورد انتظار غلبه کند (Spairani-Berrio et al., 2023).

یکی از راهکارهای امیدبخش برای کاهش این آسیب‌ها، بهره‌گیری از فرآیند رسوب‌دهی کربنات کلسیم با واسطه باکتری‌هاست. در سال‌های اخیر، این روش برای پاسخ‌گویی به چالش‌های مختلف مهندسی، از جمله مرمت سنگ‌ها و سازه‌های بتنی، مورد توجه قرار گرفته است. در همین راستا، مطالعات متعددی با هدف بررسی نقش باکتری‌ها و قارچ‌های مختلف و شناسایی شرایط بهینه برای تسریع فرآیند رسوب‌گذاری کربنات کلسیم انجام شده است (Spairani et al., 2021).

فرآیند کانی‌سازی زیستی (Biomineralization)، به‌ویژه رسوب‌دهی کربنات کلسیم القاشده به‌وسیله میکروارگانیسم‌ها (Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation: MICCP)، به‌عنوان روشی برای حفاظت از بناهای سنگی کربناته و مصالح ساختمانی تاریخی مورد استفاده قرار گرفته است. این فرآیند در طبیعت به‌طور گسترده رخ می‌دهد؛ زیرا میکروارگانیسم‌ها در جریان فعالیت‌های حیاتی و متابولیکی خود قادر به تولید و رسوب‌دهی ترکیبات معدنی هستند (Nazel, 2016).

هدف از استحکام‌بخشی زیستی (Bioconsolidation)، بازسازی و تقویت ماتریس کربناته بستر سنگی است که در اثر فرآیندهای طبیعی و محیطی هوازدگی و فرسایش دچار آسیب و تضعیف شده است. در این فرآیند، فعالیت‌های متابولیکی برخی باکتری‌ها از طریق سازوکارهای فعال یا غیرفعال، به تشکیل و رسوب ترکیبات کلسیتی کمک می‌کند. در سازوکار غیرفعال تولید کربنات (Carbonatogenesis)، فعالیت‌های باکتریایی موجب ایجاد تغییرات شیمیایی در ریزمحیط بستر می‌شوند. این تغییرات، شرایط لازم را برای تجمع یون‌های کربنات و بی‌کربنات و در نهایت، تشکیل رسوبات معدنی فراهم می‌کنند. این سازوکار عمدتاً از طریق مسیرهای متابولیکی مرتبط با چرخه‌های نیتروژن و گوگرد انجام می‌شود. در مقابل، در سازوکار فعال تولید کربنات، تشکیل ترکیبات کربناته از طریق تبادل و انتقال یون‌ها در غشای سلولی صورت می‌گیرد (Soffritti et al., 2019).

تولید میکروبی کربنات کلسیم می‌تواند از دو مسیر اصلی اتوتروفی و هتروتروفی انجام شود. در مسیر اتوتروفی، فرآیند رسوب‌گذاری کربنات کلسیم به‌واسطه فعالیت گروه‌هایی از میکروارگانیسم‌ها، از جمله برخی باکتری‌های متانوژن و فتوسنتزکننده اکسیژن‌زا، صورت می‌گیرد. این میکروارگانیسم‌ها از دی‌اکسید کربن موجود در محیط، که می‌تواند از منابعی مانند تنفس و تخمیر تأمین شود، در فرآیندهای متابولیکی خود استفاده می‌کنند. در حضور یون‌های کلسیم و فراهم‌بودن شرایط شیمیایی مناسب، کربنات کلسیم تشکیل شده و به‌صورت رسوب ته‌نشین می‌شود.

در مسیر هتروتروفی، تولید کربنات کلسیم می‌تواند از طریق سازوکارهای فعال یا غیرفعال صورت گیرد. تولید غیرفعال کربنات از طریق مسیرهای متابولیکی مرتبط با چرخه‌های نیتروژن و گوگرد و به سه روش اصلی انجام می‌شود: نخست، آمونیفیکاسیون اسیدهای آمینه در شرایط بی‌هوازی و در حضور مواد آلی و یون‌های کلسیم؛ دوم، احیای نیترات در شرایط بی‌هوازی یا میکروهوازی، در حضور مواد آلی، یون‌های کلسیم و نیترات؛ و سوم، هیدرولیز اوره یا اسید اوریک به‌واسطه آنزیم اوره‌آز، در محیطی حاوی مواد آلی و یون‌های کلسیم. در مقابل، تولید فعال کربنات، برخلاف سازوکار غیرفعال، مستقیماً به مجموعه‌ای از مسیرهای متابولیکی وابسته نیست، بلکه از طریق تبادل و انتقال یون‌ها در غشای سلولی صورت می‌گیرد. بااین‌حال، سازوکار دقیق این فرآیند هنوز به‌طور کامل شناخته نشده است (Spairani et al., 2021).

در انتخاب باکتری‌های مناسب برای کاربردهای مرمتی، استفاده از میکروارگانیسم‌های جداسازی‌شده از جمعیت‌های میکروبی بومی سنگ، گزینه‌ای مطلوب به شمار می‌رود؛ زیرا این میکروارگانیسم‌ها پیش‌تر با شرایط محیطی بستر سنگی سازگار شده‌اند و احتمالاً اختلال کمتری در جامعه میکروبی طبیعی آن ایجاد می‌کنند. یکی از نخستین سویه‌های باکتریایی بررسی‌شده در این زمینه، باسیلوس سرئوس (Bacillus cereus) بود که در شرایط قلیایی حاصل از تجزیه اسیدهای آمینه و تولید آمونیاک، قابلیت تشکیل بلورهای کربناتی را نشان داد. این روش در سال ۱۹۹۹ با موفقیت مورد آزمایش قرار گرفت (Levrel et al., 1999; Morales and Gaylarde, 2021).

در مطالعه‌ای دیگر، سنگ‌های آهکی فرسوده با استفاده از فرآیند کلسیفیکاسیون زیستی و به‌کارگیری باکتری باسیلوس سوبتیلیس (Bacillus

[DOI: 10.66224/jra.2026.12.112]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 22:37 +0330 on Sunday November 15th 2026

subtilis) تحت تیمار قرار گرفتند. به‌منظور ارزیابی اثربخشی این روش، نمونه‌های سنگ آهک در معرض مجموعه‌ای از آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که این روش توانسته است فرآیند استحکام‌بخشی زیستی را به‌صورت یکنواخت تا عمق ۳۰ میلی‌متری سنگ گسترش دهد. همچنین، مقاومت حفاری نمونه‌های تیمارشده با مقادیر ثبت‌شده برای سنگ‌های آهک تازه استخراج‌شده، معادل ۹ نیوتن، قابل مقایسه بود و این مقدار در برخی نمونه‌ها به ۱۵ نیوتن افزایش یافت. افزون بر این، میزان تخلخل کلی سنگ آهک تیمارشده در حدود ۶± درصد گزارش شد که نشان‌دهنده حفظ شبکه منافذ سنگ پس از انجام تیمار است (Micallef et al., 2016).

نتایج مطالعات تطبیقی در زمینه مرمت زیستی نشان می‌دهد که استفاده از باکتری‌های تولیدکننده کربنات می‌تواند به بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های متخلخل منجر شود؛ بااین‌حال، چنین تأثیری در سنگ‌های کم‌تخلخل، مانند مرمر، به‌وضوح مشاهده نشده است. بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های متخلخل عمدتاً از طریق تشکیل رسوبات زیستی کربنات کلسیم و کاهش تخلخل مؤثر آن‌ها حاصل می‌شود. همچنین، برخی سویه‌های باکتریایی، از جمله گونه‌هایی از جنس‌های سودوموناس (Pseudomonas) و باسیلوس (Bacillus)، قادرند به‌طور موقت خاصیت آب‌گریزی سطح سنگ را افزایش دهند؛ هرچند پایداری بلندمدت این اثر همچنان نیازمند بررسی‌های بیشتر است (Katsouras et al., 2025). این یافته‌ها نشان می‌دهند که انتخاب سویه میکروبی متناسب با نوع سنگ و شرایط محیطی، نقشی تعیین‌کننده در موفقیت تیمارهای زیستی دارد. چنین رویکردی می‌تواند گامی مؤثر در جهت توسعه و جایگزینی روش‌های شیمیایی بالقوه مخرب با فناوری‌های زیستی پایدار در حفاظت از میراث فرهنگی باشد.

یکی دیگر از رویکردهای جایگزین برای استفاده از باکتری‌های تولیدکننده کربنات، تحریک و تقویت فعالیت جمعیت‌های میکروبی بومی موجود بر سطح سنگ است. در مطالعه‌ای، صفحات سنگ آهک متخلخل در محیطی حاوی مواد مغذی غوطه‌ور شدند. نتایج حاصل نشان داد که فرآیند آمونیفیکاسیون در محیط، نقش مهمی در ایجاد تغییرات مطلوب و تسهیل رسوب‌گذاری کربنات کلسیم داشته است (Lopez et al., 2008). در پژوهشی دیگر، نمونه‌های بسیار فرسوده سنگ توف (Tuff) و ملات گچی با محلول مغذی استریل حاوی اسیدهای آمینه و یون‌های کلسیم تیمار شدند. این تیمار موجب تغییرات قابل‌توجهی در ترکیب جامعه باکتریایی بومی شد؛ به‌گونه‌ای که افزایش فراوانی جنس‌هایی با قابلیت زیست‌معدنی‌سازی کربنات کلسیم، از جمله آرتروباکتر (Arthrobacter) و باسیلوس (Bacillus)، مشاهده شد. بااین‌حال، صرف حضور این میکروارگانیسم‌ها لزوماً به معنای برخورداری از عملکرد مؤثر در فرآیند استحکام‌بخشی نیست و برای تأیید نقش آن‌ها، انجام ارزیابی‌های تکمیلی ضروری است (Jroundi et al., 2020).

۳-۲. پاکسازی زیستی (Biocleaning)

پژوهش‌ها در زمینه پاک‌سازی زیستی میراث فرهنگی از اوایل دهه ۱۹۹۰ آغاز شده‌اند و از آن زمان تاکنون، کاربرد این روش در حفاظت از آثار هنری و تاریخی به‌طور چشمگیری گسترش یافته است. امروزه، پاک‌سازی زیستی به‌عنوان جایگزینی مناسب برای برخی روش‌های شیمیایی متداول، مانند استفاده از حلال‌های آلی، و نیز روش‌های حفاظتی تهاجمی، از جمله مداخلات مکانیکی، مورد توجه قرار گرفته است. در این رویکرد، میکروارگانیسم‌ها به‌عنوان عوامل زیستی نوین به کار گرفته می‌شوند و می‌توانند نقش مؤثری در پاک‌سازی، مرمت و حفاظت از آثار هنری و بناهای تاریخی ایفا کنند. مبنای اصلی این رویکردهای زیستی نوآورانه بر این دیدگاه استوار است که تنها شمار محدودی از میکروارگانیسم‌ها دارای فعالیت‌های مخرب هستند و بسیاری از آن‌ها در فرآیندهای طبیعی و محیطی نقش‌های سودمندی بر عهده دارند (Roig and Ranalli, 2014). پاک‌سازی زیستی، به‌عنوان حوزه‌ای در حال توسعه، بر بهره‌گیری از فرآیندهای زیستی سازگار با محیط‌زیست و روش‌های کم‌خطر متمرکز است. در این رویکرد، واکنش‌های زیستی که به‌طور طبیعی در زیست‌بوم‌ها رخ می‌دهند، در شرایط کنترل‌شده بازتولید و برای کاربردهای حفاظتی بهینه‌سازی می‌شوند. این روش به‌عنوان ابزاری نوین و فرصتی ارزشمند برای ارتقای فرآیندهای حفاظت و مرمت میراث فرهنگی مطرح شده است و مزایایی همچون ایمنی بیشتر، کارایی مناسب، کاهش هزینه‌ها و پایداری محیطی را به همراه دارد (Ranalli and Zanardini, 2021).

در مطالعه‌ای که بر روی بنای تاریخی رُژانِک میترائوم (Rožanec Mithraeum) در اسلوونی انجام شد، جامعه باکتریایی بومی این اثر سنگی فرسوده با هدف شناسایی و توسعه کنسرسیومی از باکتری‌های هم‌افزا برای کاربرد در کنترل زیستی و پاک‌سازی زیستی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج تحلیل مولکولی ژن S rRNA۱۶، جامعه میکروبی بومی عمدتاً از باکتری‌های متعلق به شاخه‌های پروتئوباکتریا (Proteobacteria)، اکتینوباکتریا (Actinobacteria) و سیانوباکتریا (Cyanobacteria) تشکیل شده بود. همچنین، در میان باکتری‌های قابل کشت، جنس‌های باسیلوس (Bacillus) و پنی‌باسیلوس (Paenibacillus) فراوانی بیشتری داشتند. از نظر ظرفیت آنزیمی و قابلیت کاربرد در فرآیند پاک‌سازی زیستی، گونه‌های باسیلوس میکوئیدس (Bacillus mycoides) و پنی‌باسیلوس آمیلولیتیکوس/تایچونگنسیس (Paenibacillus amylolyticus/taichungensis) بیشترین فعالیت را نشان دادند. افزون بر این، باسیلوس ولزنسیس (Bacillus velezensis) و سودوموناس کلوروافیس (Pseudomonas chlororaphis) به‌عنوان مؤثرترین عوامل آنتاگونیست باکتریایی در برابر قارچ‌های بومی عامل فرسایش شناسایی شدند. در ادامه، عملکرد کشت‌های استرپتومایسس آنولاتوس (Streptomyces anulatus) و استرپتومایسس (Streptomyces) در مدل‌های آزمایشگاهی سنگ آهک با زیست‌کش‌های شیمیایی متداول مقایسه شد. نتایج نشان داد که این تیمارهای زیستی از کارایی قابل‌قبولی برخوردار بودند و آثار خوردگی بر سطح

[DOI: 10.66224/jra.2026.12.112]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 22:37 +0330 on Sunday November 15th 2026

سنگ ایجاد نکردند. همچنین، پارامترهای مربوط به زبری سطح سنگ طی دوره سه‌ماهه آزمایش بدون تغییر باقی ماندند (Janakiev et al., 2025).

۳-۳. استفاده از آنزیم‌ها در پاکسازی زیستی میراث فرهنگی

از اوایل دهه ۱۹۷۰، استفاده از آنزیم‌ها ابتدا در حوزه حفاظت از کاغذ آغاز شد و به‌تدریج در سایر شاخه‌های حفاظت و مرمت آثار تاریخی و هنری نیز گسترش یافت. آنزیم‌های هیدرولیتیکی یا هیدرولازها، به‌ویژه به دلیل قابلیت تجزیه مواد پروتئینی، پلی‌ساکاریدی و لیپیدی که اغلب موجب تغییر در ظاهر و ساختار آثار هنری می‌شوند، کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده‌اند. این آنزیم‌ها امکان حذف مواد مزاحم را در شرایطی ملایم‌تر از روش‌های سنتی، مانند استفاده از حلال‌های آلی یا محیط‌های قلیایی، فراهم می‌کنند. طی چهار دهه گذشته، دانش مربوط به سازوکار عملکرد آنزیم‌ها و پارامترهای مؤثر بر فعالیت آن‌ها به‌طور پیوسته گسترش یافته است. هم‌زمان، دسترسی به آنزیم‌های خالص نیز به میزان قابل‌توجهی افزایش پیدا کرده است. ازاین‌رو، آنزیم‌ها به‌عنوان موادی کارآمد و قابل‌اعتماد در اختیار متخصصان بسیاری از حوزه‌های حفاظت آثار هنری قرار گرفته‌اند (Cremonesi and Casoli, 2021).

امروزه، از تیمارهای مبتنی بر آنزیم برای حذف مؤثر چسب‌ها و سایر لایه‌های آلی مزاحم از سطوح آثار تاریخی و هنری استفاده می‌شود. بااین‌حال، علی‌رغم ظرفیت قابل‌توجه این روش‌ها، محدودیت در عملکرد و پایداری آن‌ها همچنان از چالش‌های اصلی کاربردشان به شمار می‌رود. در پژوهشی، استفاده از آلفا آمیلاز تثبیت‌شده بر سطح نانوذرات طلا با هدف بهبود عملکرد تیمارهای آنزیمی بررسی شد. نتایج نشان داد که نانوذرات طلای پوشیده‌شده با آلفا آمیلاز، در مقایسه با آنزیم‌های آزاد، عملکرد مؤثرتری دارند. آنزیم‌های تثبیت‌شده بر سطح این نانوذرات نه‌تنها در برابر تغییرات محیطی تا پنج برابر پایداری بیشتری نشان دادند، بلکه کارایی حذف چسب‌های بر پایه نشاسته را نیز تا دو برابر افزایش دادند. افزون بر این، این سامانه بدون ایجاد آسیب یا تشکیل رسوبات نمکی، نفوذ بیشتری در بافت الیاف داشت (Gherardi et al., 2019). در پژوهشی دیگر، از آنزیم گلوکز اکسیداز قارچی برای پاک‌سازی سطوح سنگ‌های تراورتن و پیرینو در مجموعه ویلای تورلونیا (Villa Torlonia) در رم استفاده شد. پراکسید هیدروژن تولیدشده در جریان فعالیت آنزیمی توانست زیست‌لایه‌های نازک حاوی جلبک‌ها، سیانوباکترها و باکتری‌های هتروتروف را حذف کند، بی‌آنکه به زیرلایه سنگی آسیب برساند (Valentini et al., 2010).

در جدول ۱، چهار روش اصلی مرمت زیستی آثار تاریخی، شامل استحکام‌بخشی با استفاده از باکتری‌های کربنات‌زا، پاک‌سازی با کنسرسیوم‌های باکتریایی، پاک‌سازی با آنزیم‌های تثبیت‌شده و پاک‌سازی با آنزیم‌های آزاد، بر اساس سازوکار عملکرد، نوع بستر، مزایا و محدودیت‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

۳-٤. نتایج آنالیز کتاب‌سنجی

نتایج تحلیل هم‌رخدادی کلیدواژه‌ها با استفاده از نرم‌افزار VOSviewer و با در نظر گرفتن حداقل پنج بار تکرار، نشان داد که پژوهش‌های مرتبط با کاربرد میکروارگانیسم‌ها در مرمت میراث فرهنگی عمدتاً در سه خوشه موضوعی اصلی متمرکز شده‌اند. خوشه نخست، با محوریت استحکام‌بخشی زیستی (Bioconsolidation)، بر استفاده از باکتری‌های کربنات‌زا (Carbonatogenes) برای رسوب‌دهی کربنات کلسیم و استحکام‌بخشی سطوح سنگی و مرمری تأکید دارد. خوشه دوم، با عنوان پاک‌سازی زیستی (Biocleaning)، به بررسی کاربرد باکتری‌ها و قارچ‌ها برای حذف آلاینده‌های آلی و معدنی از آثار فرهنگی می‌پردازد. خوشه سوم نیز، با عنوان حفاظت زیستی (Bioconservation)، به‌ویژه بر کاربردهای میکروبی در حفاظت از مواد آلی، مانند کاغذ، متمرکز است. در نقشه ترسیم‌شده (شکل ۱)، چهارضلعی‌ها (گره‌ها) نشان‌دهنده کلیدواژه‌ها هستند و اندازه آن‌ها فراوانی وقوع هر کلیدواژه را بیان می‌کند؛ همچنین، پیوندهای میان گره‌ها بیانگر هم‌رخدادی کلیدواژه‌ها و قدرت ارتباط میان آن‌هاست. این نقشه، ارتباطی قوی میان کلیدواژه‌هایی مانند Biocleaning و Cultural Heritage و نیز Carbonatogenes و Stone را نشان می‌دهد که بیانگر گرایش پژوهش‌های کنونی به دو حوزه پاک‌سازی زیستی و استحکام‌بخشی معدنی است.

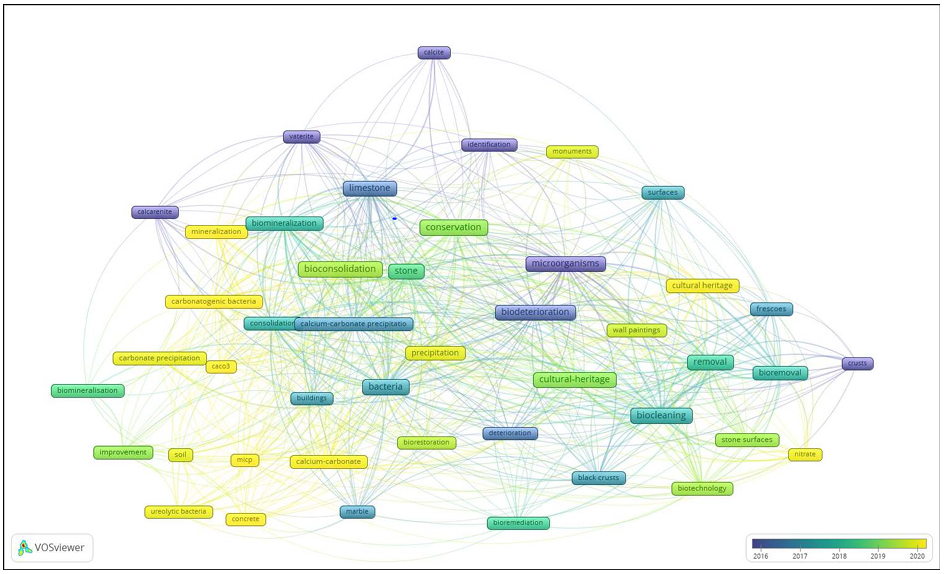
این خوشه‌بندی موضوعی نشان می‌دهد که حوزه مرمت زیستی میراث فرهنگی با تکیه بر میکروارگانیسم‌ها، از پژوهش‌های بنیادی به‌سوی کاربردهای عملی و میان‌رشته‌ای در حال حرکت است. بااین‌حال، شکاف‌های پژوهشی آشکارشده در نقشه هم‌رخدادی، از جمله کمبود مطالعات درباره بسترهای غیرسنگی (چوب، فلز، پارچه و کاغذ)، محدودبودن ارزیابی‌های بلندمدت درباره پایداری و ایمنی تیمارهای زیستی در شرایط محیطی متنوع و فقدان استانداردهای اجرایی معتبر، نشان می‌دهد که بلوغ کامل این حوزه مستلزم انجام پژوهش‌های هدفمندتری است. در این راستا، تمرکز بر تدوین پروتکل‌های استاندارد و دستورالعمل‌های اجرایی، انجام مطالعات میدانی برای ارزیابی عملکرد بلندمدت و بهره‌گیری از رویکردهای ترکیبی، مانند استفاده از کنسرسیوم‌های میکروبی، کاربرد هم‌زمان آنزیم‌ها و بهره‌گیری از پلیمرهای زیستی، می‌تواند به رفع این کاستی‌ها کمک کند. همچنین، همکاری میان‌رشته‌ای میکروب‌شناسان، مرمتگران، شیمی‌دانان، مهندسان مواد و دانشمندان علوم زمین، نقشی اساسی در توسعه روش‌های مؤثر، پایدار و ایمن برای حفاظت از میراث فرهنگی در آینده خواهد داشت. این یافته‌ها نه‌تنها می‌توانند مسیر پژوهش‌های آتی را روشن‌تر کنند، بلکه چارچوبی کاربردی برای سیاست‌گذاری و سرمایه‌گذاری هدفمند در این حوزه فراهم می‌آورند.

[DOI: 10.66224/jra.2026.12.112]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 22:37 +0330 on Sunday November 15th 2026

جدول ۱. مقایسه روش‌های اصلی مرمت زیستی آثار تاریخی مبتنی بر میکروارگانیسم‌ها و آنزیم‌ها

Table 1. Comparison of the main methods of biological restoration of historical monuments based on microorganisms and enzymes

روش	پاک‌سازی با آنزیم‌های آزاد	پاک‌سازی با آنزیم‌های تثبیت‌شده	پاک‌سازی با کنسرسیوم باکتریایی	استحکام‌بخشی با باکتری‌های کربنات‌زا
مکانیسم اصلی	اکسیداسیون یا هیدرولیز مستقیم	هیدرولیز آنزیمی با پایداری افزایش‌یافته	فعالیت آنزیمی ترکیبی (آمیلاز، پروتئاز) و آنتاگونیسم میکروبی	رسوب‌دهی کربنات کلسیم (MICCP) از طریق هیدرولیز اوره یا فعالیت اوره‌آز
بسترهای مناسب	سنگ تراورتن، پیرین، زیست‌لایه‌های سطحی	بسترهای حاوی چسب نشاسته، کاغذ، پارچه	سنگ آهک، سطوح سنگی آلوده به قارچ‌ها	سنگ‌های متخلخل (سنگ آهک، ملات‌های آهکی، مرمر)
مزایا	• حذف مؤثر زیست‌لایه • عدم آسیب به زیرلایه • کارایی بیشتر نسبت به روش‌های سنتی	• افزایش ۵ برابری پایداری آنزیم • افزایش ۲ برابری کارایی نفوذ بیشتر بدون آسیب • عدم ایجاد رسوب نمک	• پتانسیل آنزیمی بالا • حذف هم‌زمان چند آلاینده • آنتاگونیست قوی در برابر قارچ‌ها • بدون اثر خوردگی	• سازگاری بالا با بستر • ایجاد رسوب مشابه سنگ اصلی • روش دوستدار محیط زیست • تحکیم تا عمق ۳۰ میلی‌متر
محدودیت‌ها	• محدود به زیست‌لایه‌های نازک • وابستگی به نوع سنگ • پایداری کم آنزیم آزاد	• هزینه‌ی بالا • نیاز به بهینه‌سازی برای هر بستر • محدودیت در کاربردهای گسترده	• نیاز به ارزیابی میدانی طولانی‌مدت • پیچیدگی تولید کنسرسیوم • وابستگی به شرایط محیطی	• وابستگی به شرایط محیطی به‌ویژه دما، رطوبت • نیاز به مطالعات بلندمدت پایدار • عدم تأثیر بر سنگ‌های کم‌تخلخل

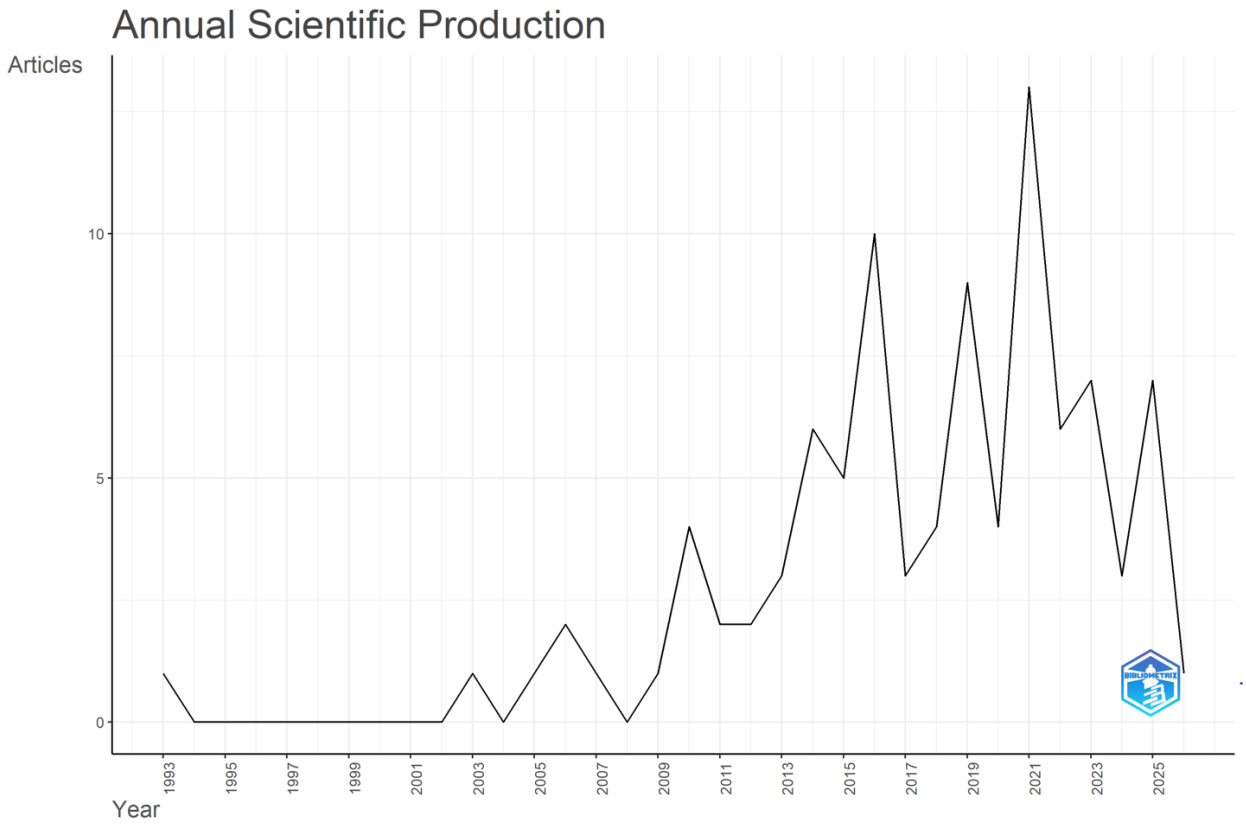


شکل ۱. نقشه شبکه‌ای هم‌رخدادی کلمات کلیدی در حوزه استفاده از میکروارگانیسم‌ها در مرمت میراث فرهنگی

Figure 1. Co-occurrence network map of keywords in the field of using microorganisms in cultural heritage restoration

بر اساس داده‌های مربوط به تولیدات علمی سالانه (شکل ۲)، انتشار مقالات در حوزه استفاده از میکروارگانیسم‌ها در مرمت میراث فرهنگی روندی رو به رشد و شتاب‌دار را از دهه ۱۹۸۰ تاکنون نشان می‌دهد. در دهه‌های نخست (۱۹۹۳ تا اوایل ۲۰۰۰)، تعداد مقالات محدود و پراکنده بود که نشان‌دهنده مرحله آغازین و آزمایشی تحقیقات در این زمینه است. از اواسط دهه ۲۰۰۰، روند انتشار مقالات به تدریج افزایش یافته است و از سال ۲۰۱۵ به بعد، رشد تصاعدی مشاهده می‌شود. بیشترین حجم مقالات در سال ۲۰۲۱ ثبت شده است و سال‌های ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۴ میزان انتشارات با کاهش نسبی همراه بوده‌اند که می‌تواند ناشی از همه‌گیری کووید-۱۹ و تأثیر آن بر فعالیت‌های پژوهشی میدانی و یا تغییر در اولویت‌های تأمین مالی پژوهش‌ها باشد. با این حال، در سال ۲۰۲۵ این مطالعات مجدداً افزایش نسبی را نشان می‌دهند که البته داده‌های سال ۲۰۲۶ به‌دلیل ناقص بودن پوشش زمانی در زمان استخراج (۴ ژانویه ۲۰۲۶)، به‌طور کامل قابل بررسی نیستند و با ادامه نمایه‌سازی، احتمالاً شمار مقالات این سال نیز افزایش خواهد یافت. الگوی کلی رشد، آشکارا نشان‌دهنده توجه فزاینده پژوهشگران و توسعه روزافزون دانش و فناوری در حوزه مرمت زیستی در دو دهه اخیر است.

[DOI: 10.66224/jra.2026.12.112]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 22:37 +0330 on Sunday November 15th 2026



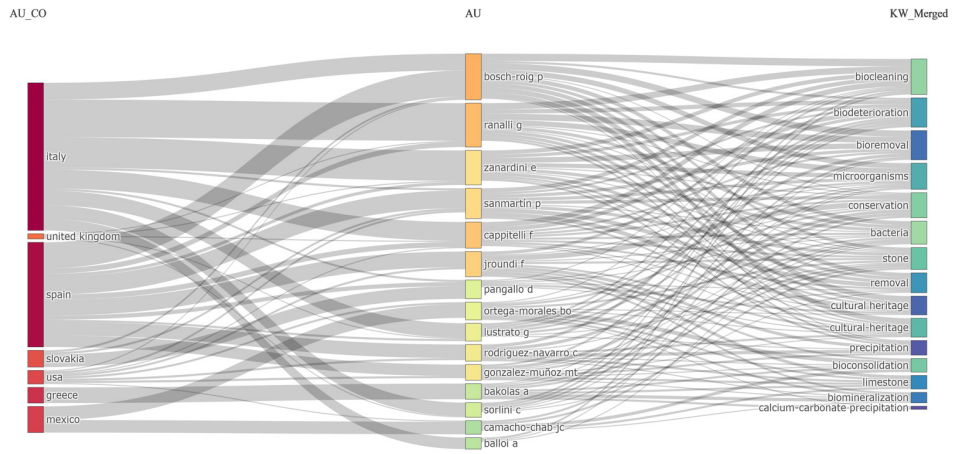
شکل ۲. روند سالانه انتشار مقالات علمی در حوزه استفاده از میکروارگانیسم‌ها در مرمت میراث فرهنگی بر پایه داده‌های استخراج‌شده از پایگاه Web of Science از سال ۱۹۹۳ تا ۲۰۲۵

Figure 2. Annual trend of scientific articles published in the field of using microorganisms in the restoration of cultural heritage based on data extracted from the Web of Science database from 1993 to 2025

نتایج حاصل از نمودار سه‌میدانی نشان می‌دهد (شکل ۳) که پژوهش‌های این حوزه عمدتاً در کشورهای اروپایی، به‌ویژه ایتالیا، بریتانیا و اسپانیا، متمرکز شده‌اند. همچنین، نویسندگان شاخصی همچون Ranalli، Bosch-Roig و Cappitelli بیشترین ارتباط را با کلیدواژه‌های پرتکرار دارند. کلیدواژه‌های پرتکرار نیز در چند محور اصلی دسته‌بندی می‌شوند: فرایندهای زیستی، شامل Biocleaning، Bioremoval و Bioconsolidation؛ عوامل میکروبی، مانند Bacteria و Microorganisms؛ و مواد و بسترهای هدف، از جمله Stone، Limestone و eCultural Heritag. پیوندهای آشکار میان این سه میدان نشان می‌دهد که پژوهش‌های انجام‌شده در کشورهای پیشرو عمدتاً به‌واسطه فعالیت همین نویسندگان شاخص شکل گرفته‌اند و بر کاربرد روش‌های زیستی در پاک‌سازی، تثبیت و حفاظت از سطوح سنگی میراث فرهنگی تمرکز دارند. این شبکه موضوعی، نقش راهبردی پژوهشگران و مراکز علمی اروپایی را در تولید و هدایت دانش این حوزه به‌خوبی نمایان می‌سازد.

با وجود این پیشرفت‌ها، دو شکاف ساختاری در این نقشه علمی قابل‌تشخیص است: نخست، تمرکز جغرافیایی پژوهش‌ها در اروپا، درحالی‌که بخش قابل‌توجهی از میراث فرهنگی جهان در سایر مناطق قرار دارد؛ دوم، غلبه مطالعات مرتبط با بسترهای سنگی و توجه نسبی کمتر به مواد غیرسنگی، همچون چوب، فلز، پارچه، کاغذ و نقاشی‌های دیواری. بر این اساس، چشم‌انداز آینده این حوزه مستلزم گسترش جغرافیایی فعالیت‌های علمی از طریق ایجاد شبکه‌های بین‌المللی، تنوع‌بخشی به بسترهای مورد مطالعه و حرکت به‌سوی استانداردسازی روش‌ها و ارزیابی بلندمدت پایداری تیمارهای زیستی است. در این راستا، به پژوهشگران پیشنهاد می‌شود با اجرای طرح‌های مشترک، تدوین دستورالعمل‌های بومی متناسب با شرایط اقلیمی و نوع بستر و بهره‌گیری از فناوری‌های نوین، همچون متاژنومیکس، در جهت رفع این شکاف‌ها گام بردارند. از سوی دیگر، سیاست‌گذاران نیز می‌توانند با تأسیس آزمایشگاه‌های تخصصی مرمت زیستی، تدوین آیین‌نامه‌ها و استانداردهای ملی و بین‌المللی، حمایت از پژوهش‌های میان‌رشته‌ای و سرمایه‌گذاری در ایجاد بانک‌های زیستی حاوی سویه‌های بومی، زمینه گسترش کاربرد عملی این روش‌ها را فراهم کنند. بدین‌ترتیب، تحلیل کتاب‌سنجی حاضر می‌تواند از گزارشی توصیفی درباره وضعیت موجود فراتر رود و به‌عنوان چارچوبی راهنما برای هدایت آگاهانه پژوهش‌ها و سرمایه‌گذاری‌های آینده در حوزه مرمت زیستی میراث فرهنگی مورد استفاده قرار گیرد.

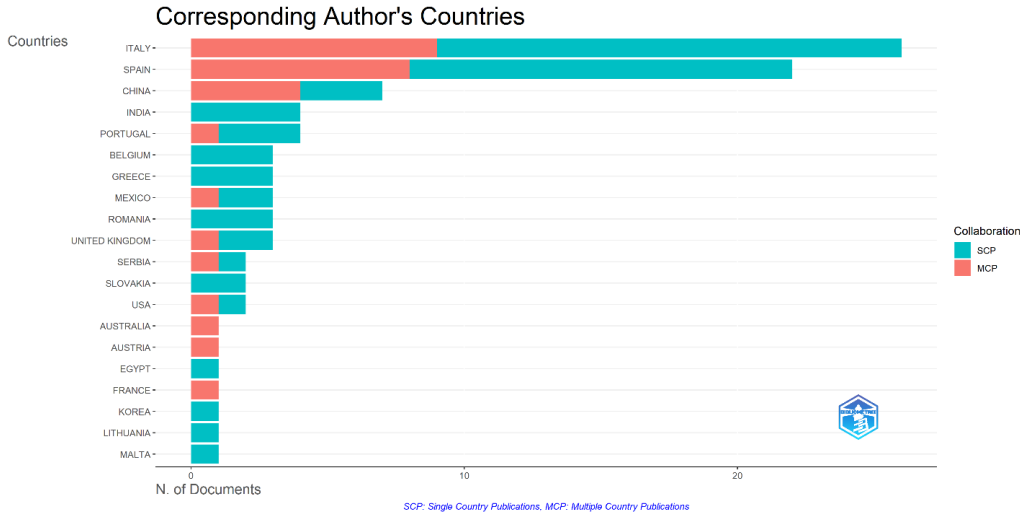
[DOI: 10.66224/jra.2026.12.112]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 22:37 +0330 on Sunday November 15th 2026



شکل ۳. نمودار سه‌میدانی نمایش‌دهنده ارتباط میان کشورهای پرتولید (چپ)، نویسندگان شاخص (وسط) و کلیدواژه‌های اصلی (راست) در حوزه استفاده از میکروارگانیسم‌ها در مرمت میراث فرهنگی

Figure 3. Three Field Plot showing the relationship between high-producing countries (left), index authors (middle), and main keywords (right) in the field of using microorganisms in cultural heritage restoration

تحلیل توزیع جغرافیایی پژوهش‌ها بر اساس کشورهای محل وابستگی سازمانی نویسندگان مسئول نشان می‌دهد که ایتالیا و اسپانیا به‌ترتیب پیشگامان اصلی این حوزه پژوهشی هستند و بیشترین سهم را در انتشار مقالات به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۴). پس از این دو کشور، چین و هند نیز حضور قابل‌توجهی دارند که بیانگر گسترش روزافزون فعالیت‌های پژوهشی به خارج از مرزهای اروپا است. اگرچه بخش عمده مطالعات در قالب مقالات تک‌کشوری (Single Country Publications; SCP) انجام شده است، سهم قابل‌توجه مقالات چندکشوری (Multiple Country Publications; MCP) در کشورهایی مانند اسپانیا، ایتالیا و بریتانیا، از وجود شبکه‌های پژوهشی بین‌المللی فعال و گرایش به همکاری‌های فرامرزی برای حل چالش‌های پیچیده مرمت زیستی حکایت دارد. این الگوی انتشار، علاوه بر تأکید بر جایگاه محوری کشورهای اروپایی در این حوزه، نشان‌دهنده گسترش دامنه جغرافیایی پژوهش‌ها و ضرورت توجه بیشتر به زمینه‌های بومی و مواد میراثی در سایر مناطق جهان است.



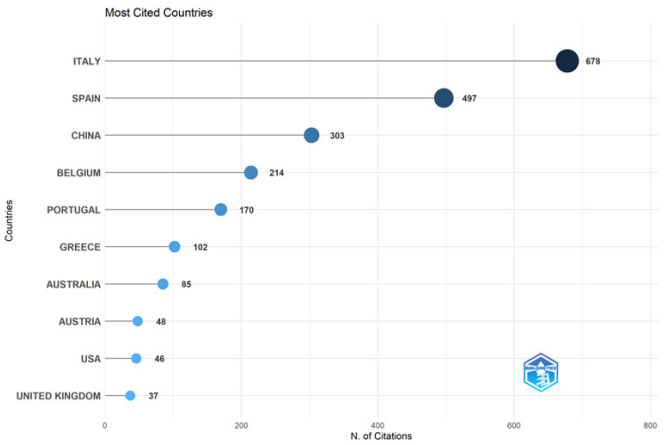
شکل ٤. نقشه تولید علمی بر پایه کشورهای وابستگی نویسندگان مسئول در حوزه استفاده از میکروارگانیسم‌ها در مرمت میراث فرهنگی. کشورها بر اساس تعداد مقالات مرتب شده‌اند. بخش‌های سبز نشان‌دهنده مقالات تک‌کشوری (SCP) و بخش‌های آبی نشان‌دهنده مقالات چندکشوری (MCP) هستند.

Figure 4. Map of scientific production by country of affiliation of responsible authors in the field of the use of microorganisms in the restoration of cultural heritage. Countries are sorted by the number of articles. Green sections indicate single-country articles (SCP) and blue sections indicate multi-country articles (MCP).

تحلیل میزان استنادات کشورها نشان می‌دهد که ایتالیا و اسپانیا نه‌تنها از نظر تعداد مقالات منتشرشده، بلکه از نظر میزان استناد دریافتی نیز در جایگاه نخست قرار دارند و بیشترین حجم استنادات را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۵). این یافته بیانگر میزان توجه و ارجاع جامعه علمی به پژوهش‌های انجام‌شده

[DOI: 10.66224/jra.2026.12.112]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 22:37 +0330 on Sunday November 15th 2026

در این دو کشور و نقش آن‌ها در شکل‌دهی به ادبیات علمی حوزه مرمت زیستی است. پس از این دو کشور، چین در رتبه سوم قرار دارد که نشان‌دهنده افزایش حضور و تأثیرگذاری پژوهش‌های این کشور در کنار رشد کمّی تولیدات علمی آن است. نکته قابل‌توجه، حضور کشورهایی مانند بلژیک و پرتغال در میان کشورهای دارای بیشترین میزان استناد، با وجود تعداد کمتر مقالات منتشرشده است. این وضعیت می‌تواند حاکی از آن باشد که برخی مطالعات انجام‌شده در این کشورها، به‌رغم حجم محدودتر تولیدات علمی، مورد توجه و ارجاع گسترده پژوهشگران بین‌المللی قرار گرفته‌اند.



شکل ۵. تعداد کل استنادات مقالات بر اساس کشور در حوزه استفاده از میکروارگانیسم‌ها در مرمت میراث فرهنگی

Figure 5. Total number of citations of articles by country in the field of using microorganisms in cultural heritage restoration

٤. محدودیت‌های پژوهش

با وجود اتخاذ راهبردی جامع برای جست‌وجو، شامل به‌کارگیری ترکیبی از کلیدواژه‌ها و پوشش انواع اسناد، از جمله مقالات پژوهشی و مروری، چکیده‌های کنفرانس و سایر مدارک مرتبط، در بازه زمانی آغاز نمایه‌سازی تا ۴ ژانویه ۲۰۲۶، در جست‌وجوی اولیه ۱۰۸ مدرک شناسایی شد. پس از اعمال معیارهای ارتباط مستقیم موضوعی و دسترس‌پذیری داده‌های تجربی، تنها ۸ مدرک به دلیل نداشتن شرایط لازم کنار گذاشته شد و در نهایت، ۱۰۰ مدرک در تحلیل کتاب‌سنجی مورد استفاده قرار گرفت. بااین‌حال، یافته‌ها باید با در نظر گرفتن محدودیت روش‌شناختی اتکا به یک پایگاه داده تفسیر شوند؛ هرچند بررسی تطبیقی مقدماتی، هم‌پوشانی محتوایی قابل‌توجهی میان پایگاه‌های اطلاعاتی اصلی را نشان می‌دهد. افزون بر این، ماهیت میان‌رشته‌ای و نسبتاً نوپای حوزه کاربرد میکروارگانیسم‌ها در مرمت میراث فرهنگی، موجب تنوع زیاد کلیدواژه‌ها و پراکندگی موضوعی شده است؛ عاملی که ممکن است بر تراکم و نحوه شکل‌گیری خوشه‌های مفهومی تأثیر بگذارد. با وجود این محدودیت‌ها، الگوهای شناسایی‌شده بر پایه مجموعه داده‌های موجود، روندهای علمی معناداری را آشکار می‌کنند که می‌توانند در ترسیم مسیر پژوهش‌های آینده سودمند باشند. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، با بهره‌گیری همزمان از چندین پایگاه داده و استفاده از رویکردهای تکمیلی، مانند تحلیل کیفی و مرور نظام‌مند، دامنه بررسی گسترش یابد و ابعاد موضوعی این حوزه با عمق بیشتری مطالعه شود.

۵. نتیجه‌گیری

استفاده از میکروارگانیسم‌ها در مرمت آثار ارزشمند فرهنگی، رویکردی نوین، هدفمند و سازگار با محیط‌زیست است که ظرفیت ارائه راهکارهایی کم‌خطر برای سلامت انسان و محیط‌زیست را دارد. این رویکرد نه‌تنها می‌تواند راهکاری پایدار در فرایند حفاظت و مرمت فراهم آورد، بلکه در صورت اثبات کارایی و ایمنی آن در مطالعات تکمیلی، می‌تواند به‌تدریج به‌عنوان روشی پذیرفته‌شده و مؤثر در حفاظت و بازسازی میراث معماری و بناهای تاریخی شناخته شود. به‌طور کلی، دستاوردهای نوآورانه در این حوزه، اهمیت روزافزون میکروارگانیسم‌ها و متابولیت‌های آن‌ها را در حفاظت و مرمت میراث فرهنگی نشان می‌دهند. این عوامل زیستی نه‌تنها ظرفیت جایگزینی برخی مواد شیمیایی متداول را دارند، بلکه با بهره‌گیری از فرایندهای طبیعی می‌توانند به کاهش پیامدهای زیست‌محیطی عملیات مرمتی و افزایش دوام آثار تاریخی کمک کنند. بااین‌حال، علی‌رغم گسترش کمّی و کیفی پژوهش‌ها، حوزه مرمت زیستی آثار تاریخی همچنان با سه چالش اصلی مواجه است که ضرورت انجام مطالعات بیشتر را نشان می‌دهد: (۱) تمرکز نامتوازن پژوهش‌ها بر بسترهای سنگی و توجه محدود به سایر مواد میراثی، مانند چوب، فلز، پارچه و کاغذ؛ (۲) کمبود مطالعات بلندمدت و میدانی برای ارزیابی پایداری و ایمنی تیمارهای زیستی؛ و (۳) فقدان استانداردها و پروتکل‌های اجرایی معتبر و قابل‌تکرار. با وجود این چالش‌ها، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین، مانند متاژنومیکس، بیوانفورماتیک و نانوفناوری، چشم‌انداز امیدوارکننده‌ای برای توسعه روش‌های ترکیبی، هوشمند و کارآمدتر فراهم می‌سازد. همچنین، گسترش دانش در این حوزه از طریق ایجاد شبکه‌های علمی بین‌المللی، انتقال فناوری، سرمایه‌گذاری در شناسایی و ارزیابی سویه‌های بومی و تدوین استانداردها و دستورالعمل‌های اجرایی با همکاری نهادهایی مانند یونسکو، می‌تواند گام‌های مؤثری در جهت توسعه و کاربرد گسترده‌تر این فناوری‌ها در پروژه‌های حفاظت و مرمت میراث فرهنگی باشد.

مشارکت نویسندگان: مقاله توسط دو نویسنده نوشته شده است. ایده‌پردازی و طراحی کلی پژوهش توسط نویسنده دوم، پریسا محمدی، صورت گرفته است. انجام تحلیل کتاب‌سنجی و همچنین نگارش پیش‌نویس اولیه مقاله بر عهده نویسنده اول، اعظم علی اصغری وشاره، بوده است. بازبینی ساختاری، اصلاحات محتوایی و ویرایش نهایی متن توسط نویسنده دوم، پریسا محمدی، انجام گردیده است. تمام نویسندگان نسخه منتشر شده مقاله را مطالعه کرده و با آن موافقت نموده‌اند.

تأمین مالی: این پژوهش هیچ بودجه خارجی دریافت نکرده است.

تضاد منافع: نویسندگان هیچ گونه تضاد منافع را اعلام نمی‌کنند.

دسترسی به داده ها و مواد: تمام داده‌های مورد استفاده و تحلیل‌شده در این پژوهش، از پایگاه علمی Web of Science استخراج گردیده و مجموعه‌داده‌های خام نیز در صورت درخواست منطقی قابل دسترس خواهد بود.

[DOI: 10.66224/jra.2026.12.112]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 22:37 +0330 on Sunday November 15th 2026

the protection and regeneration of limestones in buildings and historic patrimony. *Sedimentary Geology, 126*(1–4), 25–34.

Micallef, R., Vella, D., Sinagra, E., & Zammit, G. (2016). Biocalcifying *Bacillus subtilis* cells effectively consolidate deteriorated Globigerina limestone. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, 43*(7), 941–952.

Nazel, T. (2016). Bioconsolidation of stone monuments: An overview. *Restoration of Buildings and Monuments, 22*(1), 37–45.

Ortega-Morales, B. O., & Gaylarde, C. C. (2021). Bioconservation of historic stone buildings—An updated review. *Applied Sciences, 11*(12), 5695.

Pyzik, A., Ciuchcinski, K., Dziurzynski, M., & Dziewit, L. (2021). The bad and the good—Microorganisms in cultural heritage environments—An update on biodeterioration and biotreatment approaches. *Materials, 14*(1), 177.

Ranalli, G., & Zanardini, E. (2021). Biocleaning on cultural heritage: New frontiers of microbial biotechnologies. *Journal of Applied Microbiology, 131*(2), 583–603.

Soffritti, I., D'Accolti, M., Lanzoni, L., Volta, A., Bisi, M., Mazzacane, S., & Caselli, E. (2019). The potential use of microorganisms as restorative agents: An update. *Sustainability, 11*(14), 3853.

Spairani-Berrio, Y., Huesca-Tortosa, J. A., Rodriguez-Navarro, C., Gonzalez-Muñoz, M. T., & Jroundi, F. (2023). Bioconsolidation of damaged construction calcarenites and evaluation of the improvement in their petrophysical and mechanical properties. *Materials, 16*(17), 6043.

Spairani, Y., Cisternino, A., Foti, D., Lerna, M., & Ivorra, S. (2021). Study of the behavior of structural materials treated with bioconsolidant. *Materials, 14*(18), 5369.

Valentini, F., Diamanti, A., & Palleschi, G. (2010). New bio-cleaning strategies on porous building materials affected by biodeterioration event. *Applied Surface Science, 256*(22), 6550–6563.

References

Bosch-Roig, P., & Ranalli, G. (2014). The safety of biocleaning technologies for cultural heritage. *Frontiers in Microbiology, 5*, 155.

Cremonesi, P., & Casoli, A. (2021). Enzymes as tools for conservation of works of art. *Journal of Cultural Heritage, 50*, 73–87.

Gherardi, F., Turyanska, L., Ferrari, E., Weston, N., Fay, M. W., & Colston, B. J. (2019). Immobilized enzymes on gold nanoparticles: From enhanced stability to cleaning of heritage textiles. *ACS Applied Bio Materials, 2*(11), 5136–5143.

Janakiev, T., Dimkić, I., Aleksić, J., Grbić, M. L., Knežević, A., Kosel, J., Tavzes, Č., & Unković, N. (2025). Beneficial bacteria-based bioformulations as potential biocontrol and biocleaning solutions for stone heritage conservation. *World Journal of Microbiology and Biotechnology, 41*(6), 200.

Jimenez-Lopez, C., Jroundi, F., Pascolini, C., Rodriguez-Navarro, C., Piñar-Larrubia, G., Rodriguez-Gallego, M., & González-Muñoz, M. T. (2008). Consolidation of quarry calcarenite by calcium carbonate precipitation induced by bacteria activated among the microbiota inhabiting the stone. *International Biodeterioration & Biodegradation, 62*(4), 352–363.

Jroundi, F., Elert, K., Ruiz-Agudo, E., Gonzalez-Muñoz, M. T., & Rodriguez-Navarro, C. (2020). Bacterial diversity evolution in Maya plaster and stone following a bio-conservation treatment. *Frontiers in Microbiology, 11*, 599144.

Katsouras, A., Kirykou, V., Avgeropoulos, A., Delegou, E., Mamma, D., Kolisis, F., & Moropoulou, A. (2025). Assessment of the hydrophobicity of stone surfaces after bioconsolidation treatments. In *Transdisciplinary multispectral modelling and cooperation for the preservation of cultural heritage addressing world challenges*. Springer.

Le Métayer-Levrel, G., Castanier, S., Orial, G., Loubière, J.-F., & Perthuisot, J.-P. (1999). Applications of bacterial carbonatogenesis to

APA REF
Aliasghari Veshareh, A., & Mohammadi, P. (2025). Bibliometric Analysis of the Use of Microorganisms in the Restoration of Cultural Heritage Substrates. Journal of Research on Archaeometry, 12(1), 12112, 10.66224/jra.2026.12.112