Evaluation of the Antimicrobial Effect of Plant Essential Oils on Biodeteriogenic Microorganisms of Cultural Heritage

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

1. Department of Microbiology, Faculty of Biological Sciences, Alzahra University, Tehran, Iran.

2. Research Center for Applied Microbiology and Microbial Biotechnology, Alzahra University, Tehran, Iran.

Abstract

The beneficial effects of plant essential oils (EOs) have been known for a long time and now they are used in various fields such as medicine and aromatherapy as well as in food and pharmaceutical industries. In the last few years, the use of plant EOs has been noticed against biodeterioration of cultural heritage, which represents a powerful resource of green conservation strategies. This research aims to evaluate the antimicrobial effect of 3 essential oils of rosemary, eucalyptus and thyme on 5 fungal strains, including Aspergillus niger, Penicillium polonicum, Cladosporium limoniform, Penicillium chrysogenom, Parengyodontium album, and 3 bacterial strains including Bacillus cereus, Bacillus licheniformis, Kocuria rosea isolated from deteriorative areas of Jamé Mosque of Isfahan. The results showed that among the used EOs, thyme EO had the greatest antimicrobial effect on the selected microorganisms. This EO in 50% dilution prevented the growth of the tested microorganisms. Eucalyptus EO showed the lowest antimicrobial effect. This EO did not show any antimicrobial effect on Penicillium chrysogenum. However, eucalyptus EO was effective on the tested bacterial strains with the diameter of non-growth zone of 25, 28 and 15 mm on Bacillus cereus, Bacillus licheniformis and Kocuria rosea, respectively. According to these results, thyme EO can be potentially used to control the biodeterioration of cultural heritage.

Keywords: Thyme, Eucalyptus, Rosemary, Biodeterioration, Bacteria, Fungi.

Knowledge of Conservation and Restoration

Vol. 3(3) No.5
December 2020

https://kcr.richt.ir

Pages: 31 to 38

Corresponding Author

Parisa Mohammadi

Research Center for Applied Microbiology and Microbial Biotechnology, Alzahra University, Tehran, Iran.

Email
p.mohammadi@alzahra.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.

ارزیابی اثر ضد میکروبی اسانس‌های گیاهی بر میکروارگانیسم‌های فرسایش‌گر میراث فرهنگی

اعظم علی‌اصغری وشاره[1]، پریسا محمدی[2]*

۱. گروه میکروبیولوژی، دانشکده علوم زیستی، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران.

۲. مرکز تحقیقات میکروبیولوژی کاربردی و بیوتکنولوژی میکروبی، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران.

چکیده

اثرات مفید اسانس‌های گیاهی از دیرباز شناخته شده است و اکنون نیز از اسانس‌های گیاهی در زمینه‌های مختلفی مانند پزشکی و رایحه‌درمانی و همچنین در صنایع غذایی و دارویی استفاده می‌شود. در چند سال اخیر استفاده از اسانس‌های گیاهی برای مقابله با فرسودگی زیستی اشیاء و آثار میراث فرهنگی مطرح است که به‌عنوان راهکارهای حفاظت سبز مورد توجه قرار گرفته است. این پژوهش با هدف ارزیابی تأثیر ضدمیکروبی ۳ اسانس رزماری، اکالیپتوس و آویشن بر روی ۵ سویه قارچی Aspergillus niger، Penicillium polonicum، Cladosporium limoniform، Aspergillus flavus،Penicillium chrysogenom Parengyodontium album و سه سویه باکتری Bacillus cereus، Bacillus licheniformis، Kocuria rosea جدا شده از بسترهای فرسوده مسجد جامع اصفهان انجام گرفت. نتایج نشان داد از میان اسانس‌های استفاده شده، اسانس آویشن دارای بیشترین تأثیر روی میکروارگانیسم‌های منتخب بود. این اسانس در رقت ۵۰ درصد مانع رشد میکروارگانیسم‌های مورد بررسی شد. کمترین اثر ضدمیکروبی را اسانس اکالیپتوس از خود نشان داد. اسانس اکالیپتوس روی سویه‌های قارچ Penicillium chrysogenum اثر ضدمیکروبی نشان نداد، اما با قطر هاله عدم رشد ۲۵، ۲۸ و ۱۵ میلی‌متر به ترتیب روی سویه‌های Bacillus cereus، Bacillus licheniformis،rosea Kocuria مؤثر بود. با توجه به نتایج مطالعه حاضر، اسانس آویشن می‌تواند برای کنترل عوامل فرسایشگر زیستی مورد اشاره استفاده شود.

واژگان کلیدی: آویشن، اکالیپتوس، رزماری، فرسودگی زیستی، باکتری، قارچ.

فصل‌نامه دانش حفاظت و مرمت

سال سوم، شماره ۳

شماره پیاپی ۵ ، پاییز ۱۳۹۹

https://kcr.richt.ir

صفحات: ۳۱ تا ۳۸

نویسنده مسئول

پریسا محمدی

مرکز تحقیقات میکروبیولوژی کاربردی و بیوتکنولوژی میکروبی، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران.

رایانامه

p.mohammadi@alzahra.ac.ir

مقاله منتخب سیزدهمین همایش دو سالانه حفاظت و مرمت اشیاء تاریخی – فرهنگی و آرایه های معماری.

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

مقدمه

ساختار زیستی اولین مرحله آغاز فرسایش زیستی است که میراث فرهنگی را به خطر می‌اندازد (Veneranda, Blanco-Zubiaguirre et al. 2018). باکتری‌ها، قارچ‌ها، باکتری‌های سیانیدی، گلسنگ‌ها، خزه‌ها و همچنین حشرات و گیاهان عالی می‌توانند در میراث فرهنگی مشکلاتی ایجاد کنند. قارچ‌ها عامل اصلی فرسایش زیبایی‌شناختی نقاشی‌ها، منسوجات، سرامیک‌ها، سنگ، چوب، کاغذ و سایر مواد هستند (Russo and Palla 2023). به‌منظور مهار یا حذف ساختارهای زیستی، معمولاً از چند روش شیمیایی همراه با روش‌های فیزیکی استفاده می‌شود. ترکیبات شیمیایی عموماً سمی هستند و در محیطزیست ماندگار بوده و در مناطق دور از محل استفاده، باعث آلودگی محیطزیست می‌شوند (Palla, Bruno et al. 2020). در ضمن این ترکیبات برای کارکنان حفاظت و مرمت چنین آثاری سمی و مضر هستند، به‌ویژه هنگامی‌که در محیط‌های بسته استفاده شوند. بنابراین، نیاز به توسعه راه حل–های نوآورانه، سازگار با محیطزیست و ایمن وجود دارد (Ranaldi, Rugnini et al. 2022).

گیاهان حاوی ترکیبات مؤثره زیادی هستند که بیشتر به‌عنوان آفت‌کش‌های شناخته‌شده در پزشکی، دارویی و غذایی استفاده می‌شوند(Russo and Palla 2023) آفت‌کش‌های گیاهی از جمله اسانس‌ها به‌عنوان ترکیبات طبیعی می‌توانند جایگزین مواد شیمیایی استفاده شوند (Argyri, Doulgeraki et al. 2021). در میان ترکیبات آفت‌کش طبیعی، به نظر می‌رسد اسانس‌های گیاهی به دلیل فعالیت ضدمیکروبی گسترده شناخته‌شده، ترجیح داده می‌شوند. اسانس‌ها ترکیب پیچیده‌ای از ترکیبات عمدتاً آروماتیک هستند که در گیاهان به‌عنوان متابولیت‌های ثانویه، با تنوع شیمیایی زیاد و طیف گسترده فعالیت‌ها تولید می‌شوند (Santo, Agostini et al. 2023). اسانس‌ها به دلیل خاصیت ضدمیکروبی و سمیت کم، می‌توانند جایگزینی پایدار و ایمن در کنترل رشد میکروبی در مواد تاریخی باشند (Macedo-Arantes, Piçarra et al. 2021).

بیشتر مطالعات در زمینه اسانس‌های گیاهی در حفاظت مواد میراث فرهنگی، در شرایط آزمایشگاهی روی سویه‌های میکروبی جدا شده از اشیاء میراث فرهنگی انجام شده است (Stupar, Grbić et al. 2014, Marco, Santos et al. 2020, Ilieș, Hodor et al. 2021). در مطالعه قبلی، ما با بررسی مناطق فرسوده مسجد جامع اصفهان، به جداسازی میکروارگانیسم‌های فرسایشگر این بنا پرداختیم (Aliasghari Veshareh, Mohammadi et al. 2023). در مطالعات خود نشان دادیم که سویه‌های جدا شده، توانایی ایجاد فرسایش در کاشی‌های مدلِ مشابه بنا را در شرایط آزمایشگاهی دارند (Aliasghari Veshareh, Mohammadi et al. 2023). هدف از انجام این مطالعه ارزیابی تأثیر ضدمیکروبی اسانس‌های گیاهی رزماری، آویشن و اکالیپتوس در شرایط آزمایشگاهی روی این میکروارگانیسم‌های فرسایشگر است. استفاده از اسانس‌های گیاهی، روشی ایمن و دوستدار محیطزیست، در کنترل فرسودگی میکروبی در بناهای میراث فرهنگی می‌تواند باشد.

مواد و روش‌ها

اسانس‌های استفاده شده

اسانس رزماری، اکالیپتوس و آویشن از شرکت داروسازی باریج اسانس خریداری شد. ترکیبات اصلی این اسانس‌ها بر طبق گزارش این شرکت، در جدول شماره ۱ آورده شده است.

میکروارگانیسم ها

شش قارچ Aspergillus niger، Penicillium polonicum، Cladosporium limoniform، Aspergillus flavus، Parengyodontium album و Penicillium chrysogenom و سه باکتری Bacillus cereus، Bacillus licheniformis، Kocuria rosea در مطالعات قبلی ما از سطوح آجر، کاشی و گچ مسجد جامع اصفهان جدا شده بودند. این سویه‌ها توانایی فرسودگی را از طریق تولید اسید، انحلال $CaCO_3$، تولید مواد معدنی، توانایی چسبندگی به سطح، رشد و تشکیل بلور روی سطوح مختلف را نشان داده بودند (Aliasghari Veshareh, Mohammadi et al. 2023). که بر این اساس، برای آزمون بررسی خاصیت ضدمیکروبی اسانس‌ها انتخاب شدند

بررسی اثر ضدمیکروبی اسانس‌ها

روش انتشار دیسک

فعالیت ضد قارچی و ضد باکتریایی اسانس‌های استفاده شده در این پژوهش با روش انتشار دیسک تعیین شد. در مورد قارچ‌ها، با استفاده از لام نئوبار، سوسپانسیونی از اسپور قارچ با غلظت 10^5 اسپور در میلی‌لیتر تهیه شد. سپس ۲۰۰ میکرولیتر از سوسپانسیون اسپور تهیه شده روی محیط کشت PDA[1] Merck, Germany کشت داده شد. در مورد باکتری‌های مطالعه شده، سوسپانسیون کشت تازه باکتری‌ها، با غلظت $1/5\times10^8$ (Merck, Germany) در محیط NB[2] با غلظت معادل نیم مک فارلند تهیه شد.(Barberia-Roque, Gámez-Espinosa et al. 2019) سپس صفحات کاغذی به قطر ۶ میلی‌متر که ۳۰ میکرو لیتر غلظت‌های مختلف اسانس به آن آغشته شده بود روی کشت‌ها قرار داده شد. اولین رقت اسانس خریداری شده ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شد. از اسانس خریداری شده رقت‌های ۵۰، ۲۵، ۱۰، ۵، ۲ و ۰/۵ درصد در دی متیل سولفوکساید ۰/۱۰ درصد تهیه شد. سپس پلیت‌ها در دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد، به مدت ۷-۲ روز گرماگذاری شد و در نهایت قطر ناحیه بازدارندگی رشد اندازه گیری شد.

نتایج

نتایج آنالیز GC

نتایج آنالیز GC گزارش شده توسط شرکت داروسازی باریج اسانس در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

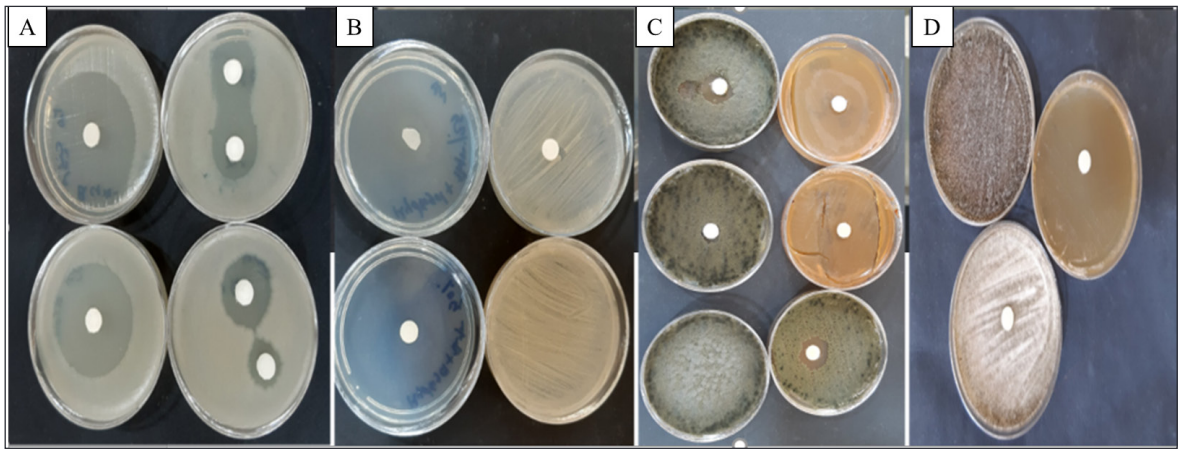
نتایج آزمون ضدمیکروبی اسانس‌های استفاده شده

نتایج آزمون ضدمیکروبی رقت‌های مختلف اسانس‌های رزماری، آویشن و اکالیپتوس در جدول شماره ۲ آورده شده است. اسانس آویشن دارای بهترین اثر ضدمیکروبی علیه قارچ‌ها و باکتری‌های آزمایش‌شده بود.

اسانس آویشن در رقت ۵۰ درصد، باعث مهار رشد تمام سویه‌های قارچی مطالعه شده و دو سویه باکتری Bacillus licheniformis و Kocuria rosea شد. قطر هاله عدم رشد این اسانس روی باکتری Bacillus cereus نیز قابل‌توجه بود (۴۲ میلی‌متر). با افزایش رقت، اثر ضدمیکروبی اسانس مورد اشاره کاهش پیدا کرد، به گونه‌ای که در رقت ۰/۵ درصد هاله عدم رشدی برای قارچ‌های نام برده شده مشاهده نشد. اسانس اکالیپتوس کمترین تأثیر را روی قارچ‌های مطالعه‌شده نشان داد. این اسانس در رقت ۵۰ درصد روی سویه قارچی Penicillium chrysogenum تأثیری نداشت. تأثیر این اسانس در رقت ۵۰ درصد روی باکتری Bacillus cereus نسبت به اسانس رزماری بیشتر بود. اسانس رزماری تا رقت ۵ درصد روی سویه قارچی Parengyodontium album با قطر هاله عدم رشد ۸ میلی‌متر مؤثر بود، اگرچه اثر ضد قارچی آن نسبت به رقت۵۰ درصد (قطر هاله عدم رشد ۴۰ میلی‌متر) به‌طور معناداری کاهش یافت.

جدول شماره ۱. ترکیبات اصلی اسانس‌های استفاده شده.

Common name	Botanical correspondence	Major components
Rosemary	Rosmarinus officinalis L.	α-Pinene (%1.14) ,(%23), Cineole (%22.8), Camphor (%18.7) and Camphene (%8.5)
Thyme	Thymus volgaris	Tymol (%31.2), Carvacol (%3.2)
Eucalyptus	Eucalyptus globulus	α-Pinene (%3.1), Limonene (%8.1), Cineole%80.3) 1.8-)



شکل شماره ۱. اثر ضدمیکروبی اسانس آویشن علیه میکروارگانیسم‌های مطالعه شده.

A) ,Bacillus cereus B) ,Kocuria rosea C) ,Cladosporium limoniform D) Aspergillus niger .

جدول شماره ۲. قطر هاله عدم رشد باکتری و قارچ های جدا شده از مسجد جامع اصفهان بر حسب میلی‌متر.

قارچ	رزماری (درصد)						اکالیپتوس (درصد)						آویشن (درصد)					
	۵۰	۲۵	۱۰	۵	۲	۰/۵	۵۰	۲۵	۱۰	۵	۲	۰/۵	۵۰	۲۵	۱۰	۵	۲	۰/۵
Aspergillus niger	۳۰	۱۵	۰	۰	۰	۰	۱۵	۱۱	۰	۰	۰	۰	NG	۳۳	۱۳	۰	۰	۰
Cladosporium limoniform	۱۵	۰	۰	۰	۰	۰	۱۴	۰	۰	۰	۰	۰	NG	۳۴	۱۵	۱۵	۱۰	۰
Penicillium polonicum	۱۲	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰	۰	۰	۰	۰	۰	NG	۳۴	۱۸	۱۲	۶	۰
Penicillium chrysogenum	۲۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	NG	۳۲	۱۲	۰	۰	۰
Parengyodontium album	۴۰	۱۵	۱۰	۸	۰	۰	۱۵	۱۰	۹	۰	۰	۰	NG	NG	NG	۳۰	۱۵	۰
باکتری																		
Bacillus cereus	۱۷	۷	۰	۰	۰	۰	۲۵	۱۲	۱۲	۰	۰	۰	۴۲	۲۸	۲۵	۱۶	۱۲	۶
Bacillus licheniformis	۳۴	۳۰	۰	۰	۰	۰	۲۸	۲۱	۰	۰	۰	۰	NG	۳۵	۳۲	۱۶	۱۴	۱۰
Kocuria rosea	۱۶	۱۰	۰	۰	۰	۰	۱۵	۱۳	۱۰	۰	۰	۰	NG	۳۰	۳۰	۳۰	۲۰	۱۰

NG: No Growth

بحث

در مطالعه‌ای فعالیت ضد میکروبی اسانس‌های مختلف رزماری، ریحان، رازیانه و لیمو با آفت‌کش‌های تجاری به روش رقت‌سازی متوالی مقایسه شد. تأثیر این اسانس‌ها در شرایط آزمایشگاهی روی ۴ قارچ جداشده از نقاشی‌های دیواری ارزیابی شد. نتایج نشان داد که اسانس ریحان روی تمام سویه‌های آزمایش‌شده، مؤثرتر بود و می‌توانست رشد سویه‌ها را در ۱/۲۵ میکرولیتر بر میلی‌لیتر حلال مهار کند (Marco, Santos et al. 2020). در مطالعه‌ی دیگری فعالیت ضد قارچی اسانس‌های مرزنجوش، رزماری، اسطوخودوس و زیست‌کش بنزالکونیوم کلرید روی قارچ‌های جدا شده از سنگ Bipolaris spicifera و Epicoccum nigrum و قارچ‌های جدا شده از بسترهای چوبی شامل Aspergillus ochraceus، Aspergillus niger، Penicillium sp و Trichoderma viride بررسی شد. در این مطالعه اسانس مرزنجوش و بنزالکونیوم کلرید قوی‌ترین فعالیت ضد قارچی را نشان دادند (Stupar, Grbić et al. 2014).

در مطالعه‌ی Rotolo و همکاران، اثر ضدمیکروبی دو اسانس آویشن و مرزنجوش به روش انتشار در آگار در شرایط آزمایشگاهی انجام شد و امکان کنترل تشکیل فیلم زیستی باکتری‌ها، قارچ‌ها، سیانوباکتری‌ها و جلبک‌های سبز روی موزاییک‌های باستانی ایتالیا بررسی گردید. نتایج این مطالعه نشان داد که محلول آویشن، انتشار بهتری در آگار داشت و در غلظت ۱۵ درصد بهترین تأثیر را در حذف فیلم زیستی داشته است(Rotolo, De Caro et al. 2018).

در پژوهشی دیگر، فعالیت‌های ضد قارچی غلظت‌های مختلف ۱۲ اسانس زیره سیاه، کرچک، دارچین، میخک، زیره، سیر، شمعدانی، اسطوخودوس، علف لیمو، نعناع، زیتون و آویشن علیه ۱۶ گونه قارچ جدا شده از نقاشی‌های سنگی، مجسمه‌های چوبی و تابوت سفالی در مصر بررسی شد. در این مطالعه، اسانس آویشن بهترین اثر ضدمیکروبی را از خود نشان داد. همچنین گزارش شد که Aspergillus niger بیشترین مقاومت و Fusarium oxysporum و Penicilium citrinium کمترین مقاومت را در مقابل اسانس‌های آزمایش شده از خود نشان دادند(Geweely, Afifi et al. 2019). در این مطالعه نیز مشخص گردید تأثیر ضدمیکروبی اسانس آویشن نسبت به دو اسانس رزماری و اکالیپتوس روی میکروارگانیسم‌های فرسایشگر مطالعه شده بیشتر بود. اگرچه آزمون‌های تکمیلی متعددی باید انجام شود ولی اسانس آویشن امکان استفاده در تیمار مناطق فرسوده میراث فرهنگی را دارد.

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، فعالیت ضدمیکروبی ۳ اسانس استخراج شده از گیاهان رزماری، آویشن و اکالیپتوس علیه ۳ سویه باکتری و ۶ سویه قارچی جدا شده از مناطق فرسوده مسجد جامع اصفهان ارزیابی شد. با توجه به نتایج، نشان داده شد که اسانس آویشن فعالیت ضدمیکروبی خوبی علیه تمام میکروارگانیسم‌های آزمایش شده، داشت؛ بنابراین، امکان استفاده از این اسانس به‌عنوان ترکیب ضدمیکروبی طبیعی در مقابله و کنترل فرسایش زیستی وجود دارد، هرچند انجام آزمون‌های سازگاری این اسانس با بسترهای مختلف میراثی و نیز بررسی اثر ضدمیکروبی آن روی میکروارگانیسم‌های فرسایشگر هر اثری، ضروری است. به‌علاوه، در مطالعات آینده مدل‌سازی آزمون‌ها در شرایط آزمایشگاهی و شرایط طبیعی بناهای میراث فرهنگی انجام خواهد شد.

سپاسگزاری

این پژوهش در مجموعه آزمایشگاه‌های دکتر سپهر دانشگاه الزهرا (س) انجام شد. نگارنده از تمامی اساتید، همکاران و دست‌اندرکارانی که در طول این پژوهش با راهنمایی‌ها و همکاری‌های خود نقش مؤثری در پیشبرد این تحقیق داشتند، صمیمانه قدردانی می‌کند.

حامیان مادی و معنوی

این پژوهش با حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه الزهرا (س) انجام شده است.

پی‌نوشت‌ها

1. Potato Dextrose Agar (PDA)
2. Nutrient Agar (NB)

منابع

Aliasghari Veshareh, A., Mohammadi, P., Elikaei, A., Shahraki, M. G., Rahmani, G., & Ranjbaran, M. (2023). Laboratory modeling of glazed tiles inoculated with deteriorative fungi isolated from Masjed-e Jāmé Isfahan and evaluation of their impacts. International Biodeterioration & Biodegradation, 178, 105559.

Aliasghari Veshareh, A., Mohammadi, P., Elikaei, A., Urzi, C., & Leo, F. D. (2023). Biodeteriogenic potential of bacteria and fungi isolated from deteriorated areas of Masjed-e Jāmé of Isfahan, UNESCO Cultural Heritage. Geomicrobiology Journal, 40(1), 75–87.

Argyri, A. A., Doulgeraki, A. I., Varla, E. G., Bikouli, V. C., Natskoulis, P. I., Haroutounian, S. A., Moulas, G. A., Tassou, C. C., & Chorianopoulos, N. G. (2021). Evaluation of plant origin essential oils as herbal biocides for the protection of caves belonging to natural and cultural heritage sites. Microorganisms, 9(9), 1836.

Barberia-Roque, L., Gámez-Espinosa, E., Viera, M., & Bellotti, N. (2019). Assessment of three plant extracts to obtain silver nanoparticles as alternative additives to control biodeterioration of coatings. International Biodeterioration & Biodegradation, 141, 52–61.

Geweely, N. S., Afifi, H. A., Ibrahim, D. M., & Soliman, M. M. (2019). Efficacy of essential oils on fungi isolated from archaeological objects in Saqqara excavation, Egypt. Geomicrobiology Journal, 36(2), 148–168.

Ilieș, D. C., Hodor, N., Indrie, L., Dejeu, P., Ilieș, A., Albu, A., Caciora, T., Ilieș, M., Barbu-Tudoran, L., & Grama, V. (2021). Investigations of the surface of heritage objects and green bioremediation: Case study of artefacts from Maramureș, Romania. Applied Sciences, 11(14), 6643.

Macedo-Arantes, S., Piçarra, A., Caldeira, A. T., Candeias, A. E., & Martins, M. R. (2021). Essential oils of Portuguese flavouring plants: Potential as green biocides in cultural heritage. The European Physical Journal Plus, 136, 1–15.

Marco, A., Santos, S., Caetano, J., Pintado, M., Vieira, E., & Moreira, P. R. (2020). Basil essential oil as an alternative to commercial biocides against fungi associated with black stains in mural painting. Building and Environment, 167, 106459.

Palla, F., Bruno, M., Mercurio, F., Tantillo, A., & Rotolo, V. (2020). Essential oils as natural biocides in conservation of cultural heritage. Molecules, 25(3), 730.

Ranaldi, R., Rugnini, L., Gabriele, F., Spreti, N., Casieri, C., Di Marco, G., Gismondi, A., & Bruno, L. (2022). Plant essential oils suspended into hydrogel: Development of an easy-to-use protocol for the restoration of stone cultural heritage. International Biodeterioration & Biodegradation, 172, 105436.

Rotolo, V., De Caro, M., Giordano, A., & Palla, F. (2018). Solunto archaeological park in Sicily: Life under mosaic tesserae. Flora Medit, 28, 233–245.

Russo, R., & Palla, F. (2023). Plant essential oils as biocides in sustainable strategies for the conservation of cultural heritage. Sustainability, 15(11), 8522.

Santo, A. P., Agostini, B., Cuzman, O. A., Michelozzi, M., Salvatici, T., & Perito, B. (2023). Essential oils to contrast biodeterioration of the external marble of Florence Cathedral. Science of The Total Environment, 877, 162913.

Stupar, M., Grbić, M. L., Džamić, A., Unković, N., Ristić, M., Jelikić, A., & Vukojević, J. (2014). Antifungal activity of selected essential oils and biocide benzalkonium chloride against the fungi isolated from cultural heritage objects. South African Journal of Botany, 93, 118–124.

Veneranda, M., Blanco-Zubiaguirre, L., Roselli, G., Di Girolami, G., Castro, K., & Madariaga, J. M. (2018). Evaluating the exploitability of several essential oils constituents as a novel biological treatment against cultural heritage biocolonization. Microchemical Journal, 138, 1–6.