

Evaluation of Silicone and Epoxy Coatings for Wood Protection Against Bacterial Growth and Outdoor Weathering

Akbar Mastouri*, Davood Eghamisisi, Asghar Tarmian

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, P.O. Box: 31587-77871, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 21-04-2024

Accepted: 11-08-2024

Available online: 16-09-2024

Print ISSN: 1735-8779

Online ISSN: 2383-2169

DOI: 10.30509/JCST.2024.167309.1226

Keywords:

Wood coating

PDMS

Epoxy

Wood weathering

Anti-bacterial

ABSTRACT

In this research, the performance of silicone (Polydimethylsiloxane, PDMS) and epoxy coatings for improving microbial resistance against Gram-negative (Escherichia coli) and Gram-positive (Staphylococcus aureus) bacteria and resistance to outdoor weathering of birch wood (Betula pendula) was investigated. PDMS and epoxy coating with a concentration of 15 % were prepared in hexane and acetone solvents, respectively, and applied on wood using the immersion/ultrasound method. Accelerated outdoor weathering was done with a Gardner aging wheel for 330 hours, and then the changes in color (ΔE), roughness, wettability, and 24h-water absorption of samples were measured. While PDMS showed more coating film thickness, epoxy one showed more polymeric coating uptake. Both coatings showed good anti-bacterial properties with an efficiency of over 60 %. However, compared to epoxy, PDMS coating provided low water absorption, higher hydrophobicity, and less roughness changes through accelerated weathering. Overall, coating with PDMS and epoxy treatment reduced the color changes of wood during weathering by 77 % and 42 %, respectively.

*Corresponding author: * Mastouri_akbar@ut.ac.ir





بررسی عملکرد پوشش‌های سیلیکونی و اپوکسی برای حفاظت چوب در مقابل باکتری و هوازگی

اکبر مستوری^{۱*}، داوود افهامی سیسی^۲، اصغر طارمیان^۳

۱- دکتر، گروه مهندسی علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران، صندوق پستی: ۳۱۵۸۷-۷۷۸۷۱

۲- استادیار، گروه مهندسی علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران، صندوق پستی: ۳۱۵۸۷-۷۷۸۷۱

۳- استاد، گروه مهندسی علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران، صندوق پستی: ۳۱۵۸۷-۷۷۸۷۱

چکیده

در این تحقیق، عملکرد پوشش سیلیکونی پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان (PDMS) و اپوکسی بر بهبود خواص ضد میکروبی در مقابل باکتری گرم منفی (*Escherichia coli*) و گرم مثبت (*Staphylococcus aureus*) و مقاومت به هوازگی سطح چوب توس (*Betula pendula*) بررسی شد. دو نوع پوشش PDMS و اپوکسی با غلظت ۱۵ درصد به ترتیب درون حلال هگزان و استن تهیه و به روش غوطه‌وری/امواج فراصوت بر روی چوب اعمال شدند. هوازگی تسریع شده با چرخ کهنگی گاردنر برای مدت ۳۳۰ ساعت انجام شد و سپس اختلاف رنگ (ΔE)، زبری، زاویه تماس و جذب آب روی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. پوشش PDMS ضخامت فیلم بیشتر و اپوکسی جذب بیشتر پلیمر را نشان داد. هر دو نوع پوشش کارایی بالای ۶۰ درصد، ویژگی‌های ضدباکتریایی خوبی را نشان دادند؛ ولی پوشش PDMS در مقایسه با اپوکسی، آب‌گریزی بالاتر، جذب آب و تغییرات زبری کمتری را طی دوره هوازگی ارائه داد. در نهایت، پوشش‌دهی با PDMS و اپوکسی به ترتیب به میزان ۷۷ و ۴۲ درصد، تغییرات رنگ ناشی از هوازگی چوب را کاهش دادند.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۱

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۳/۰۶/۲۶

شاپا چاپی: ۱۷۳۵-۸۷۷۹

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۱۶۹

10.30509/JCST.2024.167309.1226

واژه‌های کلیدی:

پوشش‌دهی چوب

پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان

اپوکسی

هوازگی چوب

ضد باکتریایی



۱- مقدمه

چوب به عنوان یک ماده متخلخل و نهم‌پذیر، مستعد معایبی مانند تغییرات ابعاد، ترک خوردگی و حملات عوامل مخرب زیستی طی قرارگیری در محیط‌های مرطوب است. همه این عوامل منجر به فروپاشی و کاهش خاصیت زیباشناختی سطوح چوبی در گذر زمان و شرایط سرویس می‌شود. اصلاح سطح یا پوشش‌دهی یکی از تکنیک‌های کاربردی جهت حفظ خواص ظاهری، آبگریزی و سایر خواص سطحی سازه‌های چوبی در داخل و خارج ساختمان محسوب می‌شود (۱، ۲). در واقع، تکنیک پوشش‌دهی با دو رویکرد حفاظتی و زیباشناختی بر روی سطوح چوبی اجرا می‌شود. برای این منظور، مواد شیمیایی و پوششی زیادی وجود دارند که از بعد عملکرد، قیمت، ماهیت شیمیایی و مسائل محیط‌زیستی نیز متفاوت هستند. در این راستا بسته به کاربرد هدف، پوشش‌های سلولز نیترات، آلکیدی، آکریلیکی، آکریلاتی، پلی‌یورتانی، پلی‌استری، ملامینی و وارنیش‌های گیاهی از مهم‌ترین رنگ‌ها و پوشش‌های رایج برای حفاظت سطوح چوبی به شمار می‌آیند (۳-۶). اشیاء فرهنگی چوبی از جمله تابلوها، مجسمه‌ها، اشیای هنری، مبلمان و سازه‌های تزئینی در داخل ساختمان و بناهای چوبی تاریخی، آلاچیق‌ها و نماهای بیرون در خارج ساختمان نیاز به حفاظت سطحی دارند. همچنین، چوب با یک ساختمان ارتوتروپ و طبیعی به شدت نسبت به رطوبت حساس بوده و پوشش اعمال شده به ویژه در مصارف بیرونی مستعد تخریب می‌شود (۷، ۸). از این رو، علاوه بر محل و ارزش سازه هدف، ماهیت شیمیایی، خواص سطحی و قدرت چسبندگی، تعیین کننده نوع پوشش انتخابی و دوام نهایی خواهد بود. پوشش اپوکسی به عنوان یک بسپار گرماسخت با ساختار شیمیایی دو قطبی، پتانسیل چسبندگی بسیار بالایی به انواع سطوح متخلخل و غیر متخلخل دارد و خواص شیمیایی و مکانیکی خوبی برای بستر چوب فراهم می‌کند (۹-۱۱). طی پژوهشی، یک پوشش فوق‌آبگریز پایدار به آسیب سایش و شرایط غوطه‌وری در آب به واسطه آستری اپوکسی برای بستر چوب حاصل شد (۱۲). پوشش‌های سیلیکونی، یکی دیگر از مواد نوین با قابلیت حفاظتی بالا در حال گسترش هستند. الاستومر پلی‌دی‌متیل سیلوکسان (PDMS)^۱ به دلیل ساختار پلی‌سیلوکسانی و انعطاف‌پذیری بالا، علاوه بر سمیت پایین، شفافیت بالا، مقاومت شیمیایی / حرارتی بالا، دارای خاصیت آبگریزی، ضد سایشی و پایداری نوری بالایی است؛ ضمن اینکه خاصیت خودترمیمی از ویژگی‌های ذاتی این ماده محسوب می‌شود (۱۳-۱۵). با این وجود اطلاعات جامع از عملکرد سطحی این پوشش‌ها به طور مقایسه‌ای بر روی چوب، متأثر از شرایط هوازگی وجود ندارد. همچنین ارزیابی خواص ضد میکروبی این پوشش‌ها می‌تواند یک مسله مهم و با ارزش

برای حفاظت سطوح چوبی در داخل ساختمان تلقی شود. هدف اصلی این تحقیق، حفاظت سطحی چوب با پوشش سیلیکونی (PDMS) و رزین اپوکسی برای انواع بسترهای چوبی به ویژه سازه‌های چوبی با ارزش فرهنگی (هنری/ باستانی) است. برای این منظور این پوشش‌ها به روش غوطه‌وری توام با حمام فراصوت بر روی چوب توس اعمال شدند. سپس، عملکرد سطحی (تغییرات رنگ، زبری، زاویه تماس) و ضد میکروبی (باکتری گرم مثبت و گرم منفی) پوشش‌ها در مقایسه با نمونه شاهد در شرایط هوازگی تسریع شده ارزیابی شد.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد مصرفی

برای این تحقیق از برون چوب گونه توس^۲ متعلق به کشور روسیه به عنوان بستر مورد مطالعه برای پوشش‌دهی استفاده شد. الاستومر سیلیکونی پلی‌دی‌متیل سیلوکسان^۳ به شکل دو جزئی ساخت کشور آمریکا^۴ استفاده شد. همچنین از رزین دو جزئی اپوکسی با خشک‌کن پلی‌آمیدی^۵ ساخت شرکت زینگچن کشور چین^۶ استفاده شد. از حلال هگزان، اتانل ۹۶ درصد و استن ساخت شرکت مرک آلمان استفاده شد.

۲-۲- آماده‌سازی پوشش‌ها و روش اعمال آنها بر روی چوب

دو نوع پوشش بر پایه PDMS و رزین اپوکسی با غلظت ۱۵ درصد به طور جداگانه تهیه شد. برای فرمول‌بندی پوشش سیلیکونی، نسبت ۱۰ به ۱ PDMS به هاردنر درون حلال هگزان ترکیب شد. برای تهیه رزین اپوکسی با غلظت مشابه، نسبت ۲ به ۱ (رزین/ هاردنر) از اجزای آن درون حلال استن استفاده شد. درصد ماده جامد خشک برای پوشش دوجزبی PDMS و اپوکسی بدون حلال به ترتیب ۷۶ و ۹۲ درصد به دست آمد. طبق تحقیقات قبلی برای آماده‌سازی بستر، ابتدا نمونه‌های چوبی با سطح غالب مماسی با استفاده از سمباده ۲۲۰ پرداخت شده و به مدت ۵ دقیقه تحت شرایط امواج فراصوت درون حلال ترکیبی شستشو و خشک شدند؛ تا سطح با ریخت‌شناسی میکروساختاری شده عاری از چربی و مواد شیمیایی ناکارآمد حاصل شود (۱۶). بعد از آماده‌سازی فرمول‌بندی و بستر پوشش‌دهی، نمونه‌های چوبی درون دو نوع محلول پوششی قرار گرفته و توسط فراصوت با فرکانس ۸۰ کیلو هرتز به مدت ۱۵ دقیقه غوطه‌ور شدند. در نهایت همه نمونه‌های پوشش‌خورده یک هفته در دمای محیط و

2- *Betula pendula*

3- PDMS, Sylgard 184 Kit

4- Dow corning, USA

5- PA-651

6- Nantong Xingchen Synthetic Material Co

1- Polydimethylsiloxane

حاوی ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول سرم پزشکی به مدت ۲ ساعت تحت همزن مغناطیسی قرار گرفتند. برای رقیق‌سازی، ۱۰ میکرولیتر از محلول آماده شده از باکتری به میکروتیوب حاوی ۹۰ میکرولیتر سرم پزشکی جدید ترکیب و این فرایند رقیق‌سازی ۷ بار پشت سر هم تکرار شد تا سوسپانسونی از باکتری با رقت 10^{-7} به دست آید. طی مراحل رقیق‌سازی از ورتکس لحظه‌ای برای همگن‌سازی سوسپانسیون باکتریایی استفاده شد. در نهایت ۰٫۱ میلی‌لیتر از سوسپانسیون باکتریایی رقیق‌سازی شده درون محیط کشت مولر هینتون آگار منتقل و تحت شرایط دمایی ۳۷ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۹۰ درصد به مدت ۴۸ ساعت قرار گرفت (۱۷). سپس، پرگنه‌های شکل گرفته مربوط به هر تیمار با پرگنه‌شمار کانتیر شمارش شده و میانگین تیمارها با هم مقایسه شد.

۴-۲- آزمون هوازدگی تسریع شده

آزمون هوازدگی تسریع شده بر روی نمونه‌های چوبی تیمار شده به ابعاد $40 \times 25 \times 5$ میلی‌متر (طول \times عرض \times ضخامت) انجام شد. با این هدف، نمونه‌های پوشش خورده و شاهد مطابق شکل ۱ بر روی چرخ کهنگی گاردنر نصب و به مدت ۲ هفته (۳۳۰ ساعت) در معرض هوازدگی قرار گرفتند. هر دور کامل چرخه هوازدگی ۹۰ دقیقه و از ۴ بخش تشکیل شده است: (۱) ۲۴ دقیقه حرارت‌دهی (دمای ماکزیمم سطح نمونه ۶۰ درجه سانتی‌گراد با لامپ ۴۰۰) و تابش فرابنفش (UVA-340) به طور هم‌زمان، (۲) ۲۷ دقیقه استراحت در شرایط محیطی، (۳) غوطه‌وری در آب به مدت ۱۲ دقیقه، (۴) ۲۷ دقیقه استراحت مجدد در شرایط محیطی. در نهایت عملکرد سطحی نمونه‌های پوشش خورده و شاهد قبل و بعد دوره هوازدگی اندازه‌گیری شد.

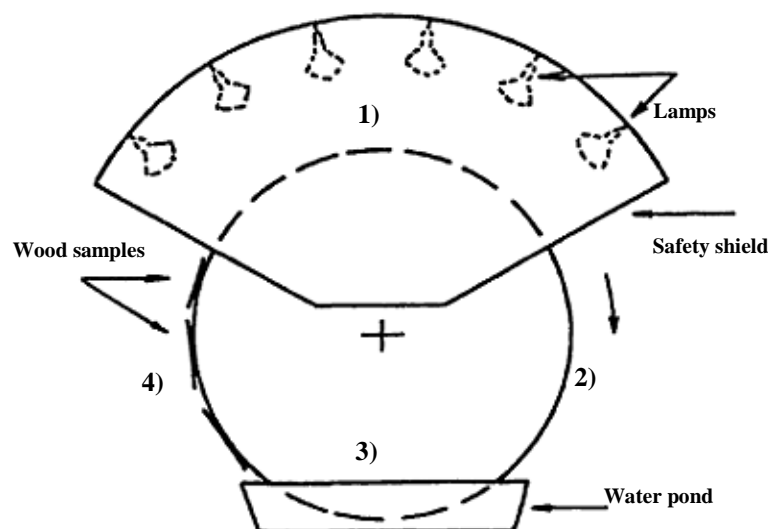
سپس ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. به منظور تعیین کیفیت تیمار حفاظتی سطح، میزان ضخامت فیلم پوشش با استفاده از میکروسکوپ نوری و درصد افزایش وزن (معادله ۱) بعد از فرایند پوشش‌دهی اندازه‌گیری شد. سپس خواص ضد میکروبی و هوازدگی هر دو نوع سطح پوشش خورده در مقایسه با نمونه شاهد (بدون پوشش) در شرایط داخل و خارج ساختمان ارزیابی شد.

$$WPG(\%) = \frac{M_m - M_0}{M_0} \times 100 \quad (1)$$

WPG درصد افزایش وزن، M_0 وزن خشک قبل از پوشش‌دهی و M_m وزن خشک بعد از پوشش‌دهی است.

۳-۲- اندازه‌گیری خواص ضدباکتری

آزمون باکتریایی برای ارزیابی عملکرد پوشش‌های چوبی از جنبه‌های سلامتی و ضد میکروبی انجام شد. برای این منظور، از دو نوع باکتری متداول گرم منفی (*Escherichia coli*) و گرم مثبت (*Staphylococcus aureus*) برای سنجش ضد میکروبی سطح تیمار شده چوب استفاده شد. ابتدا سطح چوب‌های تیمار شده و شاهد با استفاده از اتانول ۹۶ درصد، استریل شد و درون پتری دیش در شرایط آزمایشگاهی قرار گرفت. ۰٫۱ میلی‌لیتر از محلول باکتریایی ۰٫۵ مک فارلند (با تراکم باکتریایی معادل 1.5×10^8 CFU/ml) بر روی نمونه‌های چوبی منتقل شده و تحت شرایط دمایی ۳۷ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۹۰ درصد به مدت ۴۸ ساعت قرار گرفتند تا باکتری روی نمونه‌ها رشد کند. سپس نمونه‌های آلوده از پتری دیش خارج شده و درون ارلن



شکل ۱: چرخه کهنگی به روش هوازدگی تسریع شده [18].

Figure 1: Aging cycle by accelerated outdoor weathering [18].

نرم‌افزار آماری SPSS 26 برای تجزیه و تحلیل نتایج استفاده شد. همچنین گروه‌بندی دانکن در سطح اعتماد ۹۵ درصد در قالب حرف الفبای انگلیسی، برای تمایز معنی‌دار تیمارها به کار گرفته شد. برای افزایش اعتمادپذیری و نمایش خطاهای احتمالی، انحراف معیار مربوط به تیمارها نیز ارائه شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- افزایش وزن^۱ و ضخامت فیلم پوشش

میزان جذب پوشش و ضخامت فیلم پلیمری در اثر پوشش‌دهی بر روی سطح چوب در شکل ۲ ارائه شده است ($P < 0.05$). در شرایط یکسان میزان جذب برای اپوکسی بالاتر از پوشش PDMS بود اما در مقابل پوشش اپوکسی میزان ضخامت پوشش کمتری را نشان داد. در پوشش‌دهی با اپوکسی جذب بیشتر توام با ضخامت کمتر، به اتصال‌پذیری و جذب نفوذی آن درون چوب مربوط می‌شود. در واقع ماهیت دو قطبی رزین‌های اپوکسی به اتصال هم‌زمان شیمیایی/ مکانیکی و چسبندگی فوق‌العاده این پوشش‌ها به انواع سطوح متخلخل و غیر متخلخل منجر می‌شود (۱۱، ۱۰). در مقابل اتصالات PDMS محدود به پیوند مکانیکی با بستر هستند (۷). در نهایت احتمالاً نفوذ کمتر و سطحی پوشش PDMS منجر به ضخامت بیشتر آن شده است.

۳-۲- مقاومت به باکتری

مقاومت به باکتری یا خاصیت ضد باکتری سطوح چوبی پوشش‌خورده بر پایه رزین اپوکسی و PDMS در مقایسه با نمونه شاهد در شکل ۳ گزارش شده است. به طور کلی نتایج نشان داد که پوشش‌دهی سطح، به طور معنی‌داری باعث کاهش رشد هر دو نوع باکتری گرم مثبت^۲ و منفی^۳ روی چوب توس شد ($P < 0.05$). تفاوت معنی‌داری بین پرگنه شامل باکتری روی پوشش اپوکسی و PDMS برای هر دو نوع باکتری مشاهده نشد ($P > 0.05$). اعتقاد بر این است که پوشش‌دهی چوب با ترکیبات سیلیکونی و اپوکسی به تبع کاهش رطوبت و تغییرات ریخت‌شناسی و شیمیایی سطح، منجر به بهبود عملکرد چوب در مقابل عوامل زیستی می‌شود (۲۰، ۱۹)، به طوری که عملکرد این پوشش‌ها در حضور نانوذرات به طور محسوسی بهبود نیز می‌یابد (۲۳-۲۱). از این رو، پوشش‌دهی چوب با درجات مختلف آب‌گریزی و ماهیت شیمیایی بستر پلیمری، علاوه بر افزایش آب‌گریزی سطح، سبب کاهش آسیب‌های ناشی از آلودگی میکروبی می‌شود. این موضوع، دوام و سلامت سطوح چوبی در شرایط داخل و بیرون ساختمان را تضمین می‌کند.

۲-۴-۱- آزمون رنگ‌سنجی

آزمون رنگ‌سنجی به وسیله طیف‌سنج دیجیتال NRF-145 ساخت کشور چین انجام شد. برای این منظور از سامانه رنگ‌سنجی CIE $L^*a^*b^*$ استفاده شد. با اختلاف تغییرات متغیرهای رنگ‌سنجی قبل و بعد هوازدگی، تغییرات رنگ به عنوان یک نتیجه‌گیری کلی به شکل ΔE گزارش شد (رابطه ۲) (۱). مقایسه اختلاف رنگ تیمارها با میانگین گیری از ۴ تکرار برای هر تیمار انجام گرفت.

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (2)$$

که در آن ΔL^* تغییرات روشنایی، Δa^* تغییرات قرمزی - سبزی و Δb^* زردی - آبی است.

۲-۴-۲- زبری سطح

اندازه‌گیری متغیرهای زبری با استفاده از زبری‌سنجی دستی (Mitutoyo SJ-301 Portable Japan) با طول اسکن ۱۰ میلی‌متر انجام شد. با این هدف، میزان میانگین زبری (Ra) و اختلاف دره تا قله (Rz) به عنوان متغیرهای مورد اندازه‌گیری از سطح گزارش شد. زبری سطوح پوشش‌خورده و شاهد در جهت عمود بر الیاف اندازه‌گیری شد. در نهایت میانگین از سه اندازه‌گیری گزارش شد.

۲-۴-۳- آزمون زاویه تماس

تغییرات در زاویه تماس به عنوان معیار نم‌پذیری سطح در نظر گرفته شده است. اندازه‌گیری زاویه تماس با استفاده از دستگاه گونیومتر ساخت کشور آمریکا (Attension, Theta Lite) با حجم ۱۰ میکرولیتر از قطره آب مقطر روی سطح قبل و بعد از هوازدگی برای مدت زمان قطره‌گذاری برابر با ۱۲۰ ثانیه انجام شد. همه اندازه‌گیری‌ها بر روی سه منطقه برای هر تیمار ثبت شده و میانگین آن گزارش شد.

۲-۴-۴- جذب آب

از آزمون جذب آب برای ارزیابی خواص فیزیکی نمونه‌ها قبل و بعد از دوره هوازدگی استفاده شد. درصد جذب آب نمونه‌های پوشش‌خورده و چوب شاهد (بدون پوشش) در طی غوطه‌وری ۲۴ ساعته درون آب مقطر مطابق رابطه ۳ اندازه‌گیری شد. در نهایت مقایسه نهایی با استفاده از میانگین اندازه‌گیری‌ها انجام شد.

$$WA(\%) = \frac{M_s - M_0}{M_0} \times 100 \quad (3)$$

WA درصد جذب آب، M_0 وزن خشک نمونه‌ها و M_s وزن خیس نمونه‌ها بعد از غوطه‌وری ۲۴ ساعته درون آب است.

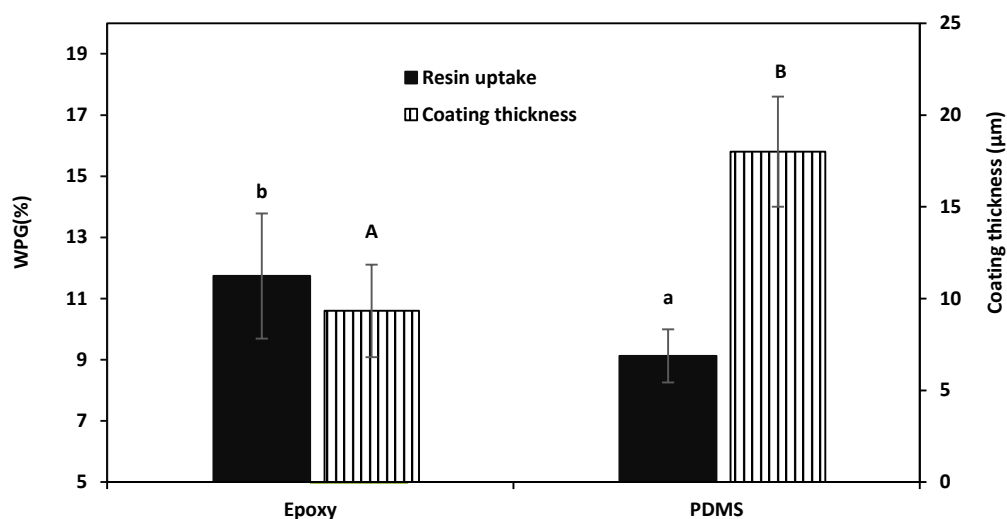
۵- آزمون آماری

از آزمون تجزیه واریانس دوطرفه (Two-way ANOVA) به کمک

1- WPG

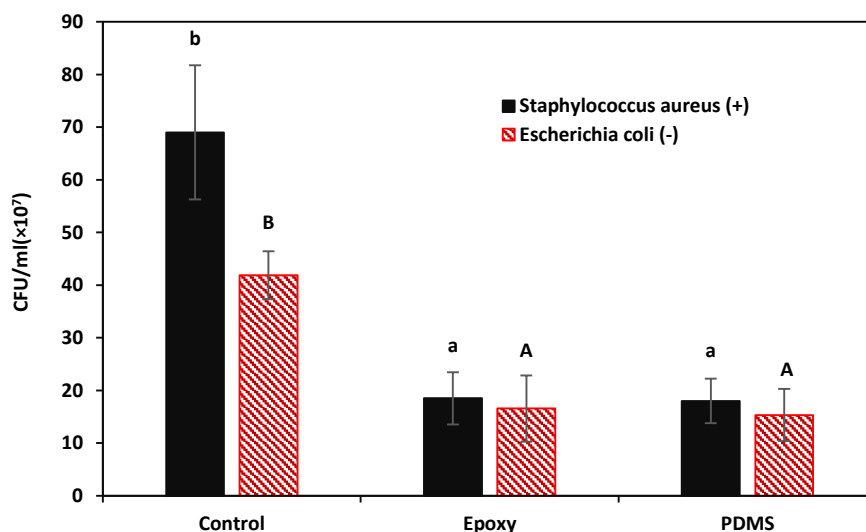
2- Staphylococcus aureus

3- Escherichia coli



شکل ۲: میزان جذب پوشش (WPG) و ضخامت فیلم تشکیل شده روی چوب توس با انواع پوشش.

Figure 2: Weight percentage gain (WPG) and film thickness of different coatings formed on birch wood.



شکل ۳: خاصیت ضد باکتری سطوح چوبی پوشش‌دهی شده با اپوکسی و PDMS: کلنی‌های باکتری گرم مثبت و منفی رشد یافته روی سطح.

Figure 3: Antibacterial properties of wooden surfaces coated with epoxy and PDMS: Colony-forming units of gram-positive and -negative bacteria.

رنگ نمونه‌ها در شرایط هوازدگی مشاهده شد ($P < 0.05$). همه تیمارهای پوششی باعث بهبود ثبات رنگی چوب توس طی هوازدگی شدند. بیشترین میزان اختلاف رنگ مربوط به نمونه شاهد و کمترین میزان اختلاف رنگ مربوط به سطح حفاظت پوشش‌داده شده با PDMS بود. با توجه به شکل ۵، اختلاف رنگی و ریخت‌شناسی سطح چوب شاهد بدون پوشش، قبل و بعد از دوره هوازدگی قابل رویت است. در واقع پوشش‌های بر پایه PDMS به جهت ماهیت شیمیایی و ساختمان سیلیکونی، مقاومت بالایی به شرایط جوی و تغییر رنگ نشان می‌دهند (۱۵). در حالی که پوشش‌های اپوکسی حساسیت

۳-۳- مقاومت به هوازدگی

۳-۳-۱- اختلاف رنگ (ΔE)

مولفه‌های رنگی به همراه نتایج نهایی اختلاف رنگ سطوح پوشش خورده و چوب شاهد متاثر از شرایط هوازدگی تسریع شده در جدول ۱ و شکل ۴ ارائه شده است. بعد از دوره هوازدگی L^* برای همه نمونه‌ها کاهش یافت درحالی که مقادیر a^* و b^* روند افزایشی را نشان داد. به طوری که بیشترین تغییرات کاهش ΔL^* مربوط به نمونه شاهد و در مجموع کمترین تغییرات در مولفه‌های رنگی برای نمونه PDMS ثبت شد. در نهایت، اختلاف معنی‌داری بین تغییرات

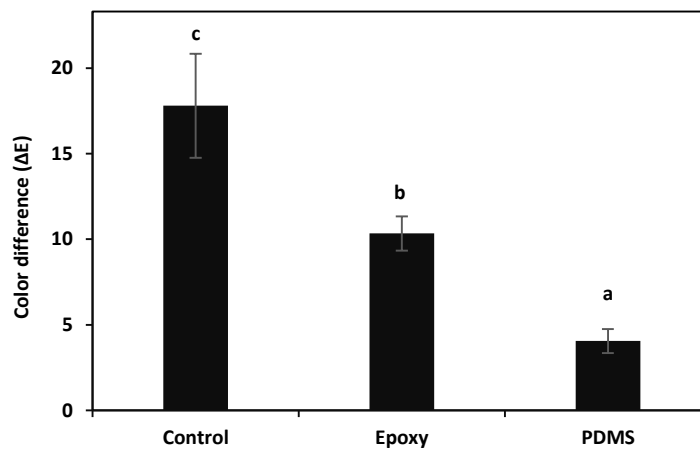
شیمیایی PDMS، دلیل مقاومت سطحی بالای این نوع پوشش‌ها در شرایط اقلیمی است. با این حال پوشش‌های اپوکسی بسته به نوع و ماهیت شیمیایی هاردنر، مقاومت متفاوتی در مقابل تخریب نوری ارائه می‌کنند.

بالایی به تخریب نوری و شرایط کهنگی دارند (۲۴، ۲۵). در این راستا، اصلاح پوشش‌های اپوکسی با عوامل سیلانی به منظور کاهش حساسیت نوری رزین اپوکسی در شرایط جوی، به طور موفقیت آمیزی مطالعه شده است (۲۶). نهایتاً ماهیت آبگریز و ساختمان

جدول ۱: مولفه‌های رنگی چوب توس پوشش داده شده و بدون پوشش متاثر از شرایط هوازدگی تسریع شده.

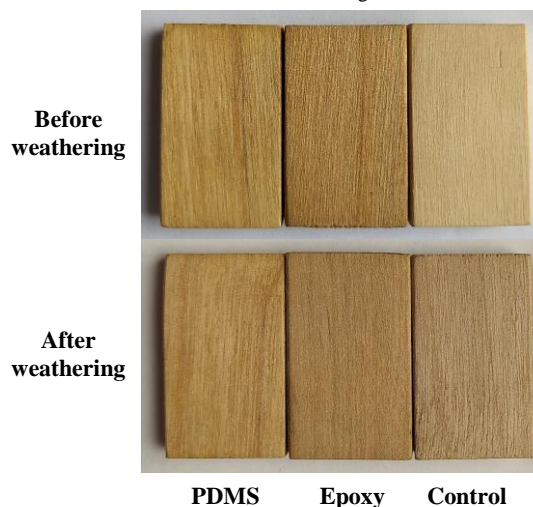
Table 1: Color coordinates of coated and un-coated birch wood affected by accelerated weathering conditions.

Wood samples	Δb^*	Δa^*	ΔL^*	After-weathering			Before-weathering		
				b^*	a^*	L^*	b^*	a^*	L^*
Control	5.3 (0.4)	3.6 (0.8)	-16.6 (3.1)	23.7 (1.2)	9.9 (0.8)	69.9 (2.9)	18.4 (1.2)	6.3 (0.7)	86.5 (2.8)
Epoxy	5.8 (0.8)	4.9 (0.5)	-6.9 (1.5)	30.8 (1.3)	17.6 (1.3)	57.0 (1.3)	24.9 (1.7)	12.8 (1.3)	63.9 (1.6)
PDMS	1.9 (0.5)	1.5 (0.6)	-3.1 (1.1)	21.7 (1.1)	9.6 (1.1)	79.3 (3.1)	19.7 (0.7)	8.2 (1.2)	82.4 (2.2)



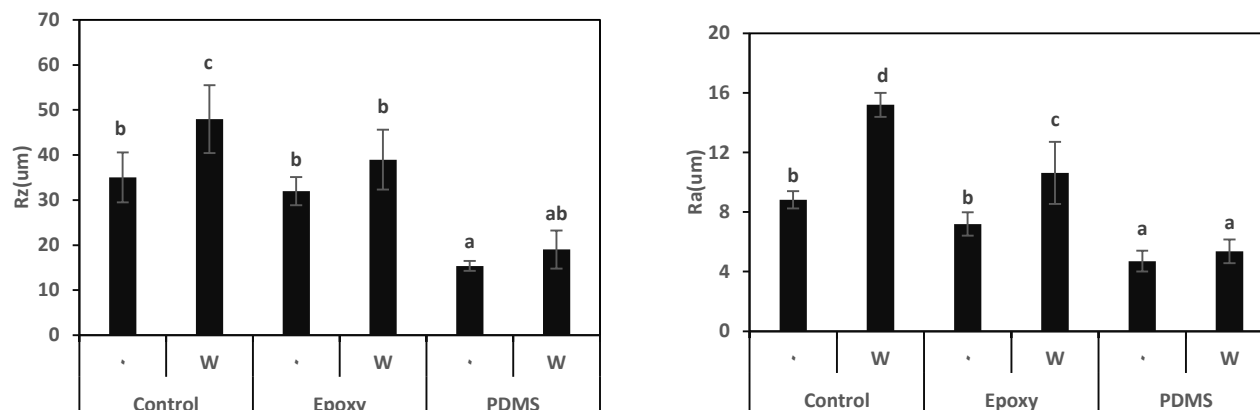
شکل ۴: اختلاف رنگ (ΔE) پوشش‌های بر پایه اپوکسی و PDMS در مقایسه با چوب شاهد طی ۳۳۰ ساعت هوازدگی تسریع شده.

Figure 4: Color changes (ΔE) of epoxy and PDMS-based coatings compared to uncoated (Control) birch wood during 330 hours of accelerated outdoor weathering.



شکل ۵: شکل ظاهری نمونه‌های پوشش خورده و چوب خام قبل (بالا) و بعد (پایین) از دوره هوازدگی تسریع شده (۳۳۰ ساعت).

Figure 5: The appearance of coated and uncoated wood samples before and after accelerated weathering period (330 hours).



شکل ۶: مشخصه‌های زبری (Ra و Rz) روی سطوح پوشش خورده و شاهد قبل (0) و بعد از هوازدگی (W).

Figure 6: Roughness parameters (Ra and Rz) on coated and un-coated surfaces before (0) and after weathering (W).

زاویه تماس در کل دوره قطره‌گذاری به ترتیب مربوط به نمونه شاهد و پوشش PDMS بود. به طوری که، میزان زاویه تماس قطره آب در لحظه نهایی (۱۲۰ ثانیه) برای چوب شاهد، پوشش اپوکسی و PDMS به ترتیب برابر با ۸۷، ۰ و ۱۰۰ درجه بود. بعد از هوازدگی نیز عملکرد تیمارهای پوششی همچنان بهتر از نمونه شاهد بود ($P < 0.05$). یک افزایش جزئی در زاویه تماس آغازین در نمونه طی هوازدگی مشاهده شد که دلیل این افزایش، به تشدید زبری مربوط است. در واقع علاوه بر ماهیت شیمیایی، زبری سطح یک عامل مهم بر کیفیت زاویه تماس سطح محسوب می‌شود (۲۷) بعد از دوره هوازدگی، میزان زاویه تماس قطره آب در لحظه نهایی (۱۲۰ ثانیه) برای چوب شاهد، پوشش اپوکسی و PDMS به ترتیب مقادیر ۶۶، ۰ و ۱۰۰ درجه به دست آمد. بعد از هوازدگی، پوشش اپوکسی تغییرات زاویه تماس بیشتری را نسبت به نمونه سیلیکونی متحمل شد. این موضوع، حاکی از آن است که پوشش PDMS همچنان ماهیت شیمیایی و طبیعت آبریز خود را بعد از هوازدگی حفظ کرده است. انرژی سطحی بالا و دارا بودن سرآب‌دوست پوشش‌های اپوکسی (۲۵)، دلیل دیگری است که ضعف پوشش اپوکسی را به شرایط (۱۰)، کهنگی و تخریب نوری توجیه می‌کند. هرچند، قدرت بازدارندگی جذب آب خوب پوشش‌های اپوکسی در WPG بالا گزارش شده است (۱۲). در ارتباط با چوب شاهد بدون پوشش، اگرچه عوامل جوی و هوازدگی‌های طولانی مدت به سبب آب‌شویی مواد آبریز، افزایش گروه‌های بی‌شکل سطح و خشن‌تر شدن سطح، موجب افزایش ترشوندگی و کاهش زاویه تماس سطح چوب می‌شود (۵۸-۸)؛ اما

۳-۳-۲- زبری سطح

نتایج اندازه‌گیری زبری در شکل ۶ گزارش شده است. به طور کلی اختلاف معنی‌داری بین زبری سطوح پوشش خورده و شاهد، قبل و بعد از هوازدگی وجود داشت ($P < 0.05$). پوشش‌دهی سبب کاهش چشم‌گیر زبری سطح چوب شد. بالاترین میزان زبری مربوط به سطح چوب پوشش‌نخورده و کم‌ترین آن مربوط به پوشش PDMS بود. پوشش اپوکسی به دلیل ضخامت فیلم کمتر، زبری بیشتری در مقایسه با پوشش PDMS داشت. با قرارگیری نمونه‌ها در شرایط هوازدگی تسریع شده، زبری سطح همه تیمارها به ویژه سطح نمونه شاهد و پوشش اپوکسی افزایش یافت. به طوری که مشخصه Ra بعد از هوازدگی برای پوشش PDMS، اپوکسی و نمونه چوب خام به ترتیب به میزان ۷۲، ۴۷ و ۱۵ درصد افزایش یافت. در واقع بازآرایی ساختار ریزساختار سلولزی سطح چوب طی دوره‌های غوطه‌وری/خشک شدن، تشکیل میکرو ترک‌ها و آب‌شویی مواد رسوبی (لیگنین و مواد استخراجی) از دلایل اصلی برای افزایش زبری سطح چوب طی فرایند کهنگی به حساب می‌آید (۱۶). در مقابل، تغییرات زبری به ویژه بر روی پوشش PDMS قابل اغماض بود. این مسئله نشان می‌دهد که تخریب سطحی/ریخت‌شناسی و احتمالاً تغییرات شیمیایی روی سطح پوشش‌های سیلیکونی کمتر اتفاق افتاده است.

۳-۳-۳- آزمون زاویه تماس

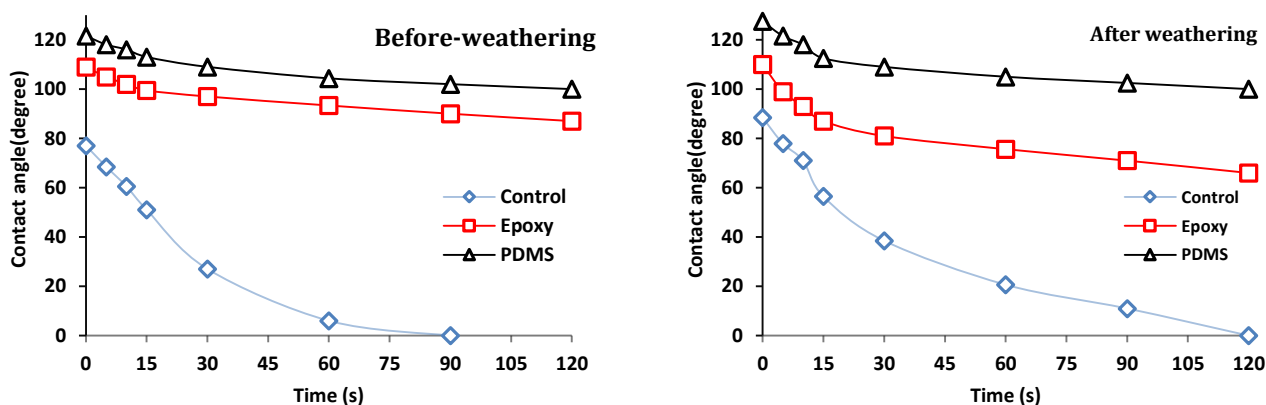
پوشش‌دهی به طور چشم‌گیری سبب کاهش نپذیری سطح چوب توس شد (شکل ۷). قبل از هوازدگی، کمترین و بیشترین میزان

آب نمونه‌ها متاثر از نوع تیمار وجود داشت ($P < 0.05$). درصد جذب آب ۲۴ ساعته چوب توس ۵۸ درصد بود که بعد از پوشش‌دهی به طور معنی‌داری این روند کاهش یافت. این موضوع کارایی حفاظتی تیمارهای پوششی را در ارتباط مستقیم با آب تایید کرد. بعد از دوره هوازدگی، افزایش جزئی در میزان جذب آب همه نمونه‌ها مشاهده شد. با این وجود بعد از هوازدگی نیز بالاترین میزان جذب آب (۷۶ درصد) مربوط به نمونه بدون پوشش چوب توس بود. با مقایسه تیمارهای پوشش، کمترین میزان جذب آب مربوط به نمونه PDMS بود. تشکیل میکروتکرک‌ها در ساختار چوب یا پوشش، تغییرات زبری، آب‌شویی مواد رسوبی، افزایش دسترس‌پذیری گروه‌های بی‌شکل و تخریب شیمیایی سطح از مهم‌ترین دلایل افزایش جذب آب است (۲۸، ۲۴، ۷). در نتیجه عملکرد خوب پوشش‌های حفاظتی، به ویژه نمونه PDMS، پایداری این پوشش‌ها به شرایط کهنگی را نشان می‌دهد.

طی هوازدگی تسریع شده (۲۲۵ چرخه) در این پژوهش یک افزایش جزئی در زاویه تماس آغازین احساس شد. افزایش بلوری‌شدن و کاهش سطوح بی‌شکل چوب در دوره‌های کوتاه مدت کهنگی به کمک موضوع زبری یک فاکتور مهم برای افزایش زاویه تماس است (۱۶). این موضوع نشان می‌دهد که تعامل زبری و ماهیت شیمیایی، تعیین‌کننده کیفیت‌پذیری سطح است. در همین راستا، طی هوازدگی برای پوشش اپوکسی با افزایش زبری سطح، زاویه تماس هم کاهش یافته است، که این امر ممکن است به دلیل تغییرات شیمیایی سطح (تغییر شیمی و حالت آب‌دوست) باشد.

۳-۳-۴ درصد جذب آب

نتایج مربوط به درصد جذب آب نمونه‌ها متاثر از شرایط هوازدگی در جدول ۲ ارائه شده است. به طور کلی اختلاف معنی‌داری بین جذب



شکل ۷: زاویه تماس قطره آب بر روی سطوح پوششی و چوب شاهد: قبل و بعد از شرایط هوازدگی تسریع شده.

Figure 7: Contact angle of water drop on coating and un-coated wood: before and after accelerated weathering conditions.

جدول ۲: درصد جذب آب (۲۴ ساعته) چوب توس و نمونه‌های پوشش خورده آن، قبل و بعد از هوازدگی تسریع شده.

Table 2: Water absorption percentage (24 hours) of birch wood and its coated samples, before and after accelerated weathering.

Wood samples	Water absorption (%)	
	Weathered	Un-weathered
Control	67(4.2)d	58(2.8)c
Epoxy coating	44.5(3.5)b	39.5(2.1)b
PDMS coating	25(2.8)a	21(2.8)a

Duncan Latin letters indicate the significance of the treatments at the 95% confidence level.

۴- نتیجه‌گیری

به نتایج به دست آمده، هر دو نوع پوشش عملکرد ضد میکروبی و سطحی خوبی نشان دادند، با این وجود برای حفاظت سطوح چوبی در خارج ساختمان پوشش بر پایه PDMS توصیه می‌شود.

تشکر و قدردانی

از جناب آقای دکتر سردار آنسس (Mustafa Serdar Onses)، سرپرست مؤسسه مواد و نانو تکنولوژی ارنم (ERNAM) و استاد ارجمند دانشگاه بیلکنت کشور ترکیه، به دلیل مساعدت‌های صورت گرفته طی این پروژه، نهایت تشکر و قدردانی را داریم.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

در این تحقیق، خواص ضدباکتری و مقاومت به هوازدگی پوشش‌های سیلیکونی (PDMS) و اپوکسی در مقایسه با چوب شاهد بدون پوشش بررسی شد. پوشش‌دهی با اپوکسی میزان جذب بالاتر و PDMS ضخامت فیلم بیشتر را ارائه داد. با توجه به این موضوع، اتصال‌پذیری بهتر پوشش‌های اپوکسی نسبت به پوشش‌های سیلیکونی محتمل‌تر بوده و با توجه به این مسئله استفاده از پوشش اپوکسی به عنوان لایه آستری چوب در تحقیقات آتی توصیه می‌شود. هر دو نوع پوشش باعث بهبود مقاومت به هوازدگی و کاهش رشد پرگنه باکتری^۱ گرم مثبت و منفی روی سطح چوب توس شدند. پوشش PDMS بیشترین میزان زاویه تماس و کمترین میزان زبری را بین تیمارها نشان داد. بیشترین تغییرات ریخت‌شناسی و تخریب نوری در اثر هوازدگی تسریع شده در نمونه شاهد مشاهده شد. در حالی که کمترین میزان تغییرات رنگ و زبری بعد از هوازدگی مربوط به پوشش PDMS بود. علاوه بر این، پوشش‌دهی چوب باعث کاهش چشم‌گیر درصد جذب آب نمونه‌ها، قبل و بعد هوازدگی شد. با توجه

۵- مراجع

- Wan C, Lu Y, Sun Q, Li J. Hydrothermal synthesis of zirconium dioxide coating on the surface of wood with improved UV resistance. *Appl. Surf. Sci.* 2014;1(321):38-42. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.09.135>.
- Mastouri Mansourabad A, Azadfallah M, Tarmian A, Efhami Sisi D. Nano-cerium dioxide synergistic potential on abrasion resistance and surface properties of polyurethane-nanocomposite coatings for esthetic and decorative applications on wood. *J Coat Technol Res.* 2020;17(6): 1559-70. <https://doi.org/10.1007/s11998-020-00374-9>.
- Kúdela J, Liptáková E. Adhesion of coating materials to wood. *J. Adhes. Sci. Technol.* 2006; 20(8):875-95. <https://doi.org/10.1163/15685610677638725>.
- Gholamiyan H, Tarmian A, Ranjbar Z, Abdulkhani A, Azadfallah M, Mai C. Silane nanofilm formation by sol-gel processes for promoting adhesion of waterborne and solvent-borne coatings to wood surface. *Holzforschung.* 2016; 70(5):429-37. <https://doi.org/10.1515/hf-2015-0072>.
- Talaei A, Rezvani MH, Doost Mohammadi H. Investigation of adhesion strength of alkyd and nitro cellulose transparent coatings in different heat-treated poplar wood. *J Color Sci Tech.* 2018;12(3):171-80. <https://dori.net/dor/20.1001.1.17358779.1397.12.3.2.0> [In Persian].
- Tang CC, Li Y, Kurnaz LB, Li J. Development of eco-friendly antifungal coatings by curing natural seed oils on wood. *Prog Org Coat.* 2021;161:106512. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106512>.
- Evans PD, Haase JG, Seman AS, Kiguchi M. The search for durable exterior clear coatings for wood. *Coatings.* 2015;5(4):830-64. <https://doi.org/10.3390/coatings5040830>.
- Rowell RM. Understanding wood surface chemistry and approaches to modification: A review. *Polymers.* 2021; 13(15):2558. <https://doi.org/10.3390/polym13152558>.
- Tu K, Wang X, Kong L, Chang H, Liu J. Fabrication of robust, damage-tolerant superhydrophobic coatings on naturally micro-grooved wood surfaces. *RSC advances.* 2016;6(1):701-7. <https://doi.org/10.1039/C5RA24407B>.
- Psarski M, Pawlak D, Grobelny J, Celichowski G. Relationships between surface chemistry, nanotopography, wettability and ice adhesion in epoxy and SU-8 modified with fluoroalkylsilanes from the vapor phase. *Appl Surf Sci.* 2019; 15:479:489-98. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.02.082>.
- Elzaabalawy A, Meguid SA. Development of novel superhydrophobic coatings using siloxane-modified epoxy nanocomposites. *Chem Eng J.* 2020;398:125403. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125403>.
- Liu F, Gao Z, Zang D, Wang C, Li J. Mechanical stability of superhydrophobic epoxy/silica coating for better water resistance of wood. *Holzforschung.* 2015;69(3):367-74. <http://dx.doi.org/10.1515/hf-2014-0077>.
- Chang H, Tu K, Wang X, Liu J. Fabrication of mechanically durable superhydrophobic wood surfaces using polydimethylsiloxane and silica nanoparticles. *Rsc Advances.* 2015; 5(39):30647-53. <https://doi.org/10.1039/C5RA03070F>.
- Boscher ND, Vaché V, Carminati P, Grysans P, Choquet P. A simple and scalable approach towards the preparation of superhydrophobic surfaces—importance of the surface roughness skewness. *J Mater Chem.* 2014;2(16):5744-50. <https://doi.org/10.1039/C4TA00366G>.
- Tu K, Wang X, Kong L, Guan H. Facile preparation of mechanically durable, self-healing and multifunctional superhydrophobic surfaces on solid wood. *Mater Des.* 2018;140:30-6. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.029>.
- Mastouri A, Efhamisisi D, Tarmian A, Boukherroub R, Lexa M, Karami E, Panek M, Frigione M. Sustainable superhydrophobic and self-cleaning wood via wax within Epoxy/PDMS nano-composite coatings: Durability related to surface morphology. *Prog Org Coat.* 2024;186:

107951. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107951>.
17. Nosál E, Reinprecht L. Anti-bacterial and anti-mold efficiency of silver nanoparticles present in melamine-laminated particleboard surfaces. *BioResources*. 2019;14(2):3914-24. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.14.2.3914-3924>
18. L. Podgorski, A. Merlin, X. Deglise, Analysis of the natural and artificial weathering of a wood coating by measurement of the glass transition temperature. *Holzforschung*. 1996; 50:282-287. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1996.50.3.282>.
19. Wang Y, Yan W, Frey M, Vidiella del Blanco M, Schubert M, Adobes-Vidal M, Cabane E. Liquid-Like SiO₂-g-PDMS Coatings on Wood Surfaces with Underwater Durability, Antifouling, Antismudge, and Self-Healing Properties. *Adv. Sustain. Syst*. 2019;3(1):1800070. <http://dx.doi.org/10.1002/adsu.201800070>
20. L. Rosu L, Varganici CD, Mustata F, Rosu D, Rosca I, Rusu T. Epoxy coatings based on modified vegetable oils for wood surface protection against fungal degradation. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2020;12(12):14443-58. <https://doi.org/10.1021/acscami.0c00682>
21. Yang L, Wu Y, Yang F, Wang W. The effect of antibacterial and waterproof coating prepared from hexadecyltrimethoxysilane and nano-titanium dioxide on wood properties. *Front. Mater*. 2021;8:699579. <http://dx.doi.org/10.3389/fmats.2021.699579>
22. Kowalewska A, Majewska-Smolarek K. Self-Healing Antimicrobial Silicones—Mechanisms and Applications. *Polymers*. 2023;29:15(19):3945. <https://doi.org/10.3390/polym15193945>.
23. Gao X, Wang M, He Z. Superhydrophobic wood surfaces: recent developments and future perspectives. *Coatings*. 2023;13(5):877. <https://doi.org/10.3390/coatings13050877>
24. Malshe VC, Waghoo G. Weathering study of epoxy paints. *Prog Org Coat*. 2004;51(4):267-72. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2004.07.007>
25. Krauklis AE, Echtermeyer AT. Mechanism of yellowing: Carbonyl formation during hygrothermal aging in a common amine epoxy. *Polym*. 2018;10(9):1017. <https://doi.org/10.3390/polym10091017>
26. Rajagopalan N, Khanna AS. Effect of methyltrimethoxy silane modification on yellowing of epoxy coating on UV (B) exposure. *J coat* 2014;(1):515470. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/515470>
27. Cassie A, Baxter S. Wettability of porous surfaces. *Trans. Faraday Soc*. 1944; 40:546–551. <https://doi.org/10.1039/TF9444000546>.
28. Mastouri A, Azadfallah M, Rezaei F, Tarmian A, Efhamisisi D, Mahmoudkia M, Corcione CE. Kinetic studies on photo-degradation of thermally-treated spruce wood during natural weathering: Surface performance, lignin and cellulose crystallinity. *Constr Build Mater*. 2023;392:131923. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131923>
29. Lionetto F, Del Sole R, Cannoletta D, Vasapollo G, Maffezzoli A. Monitoring wood degradation during weathering by cellulose crystallinity. *Mater*. 2012;5(10):1910-22. <https://doi.org/10.3390/ma5101910>.

How to cite this article:

Mastouri A, Efhamisisi D, Tarmian A. Evaluation of Silicone and Epoxy Coatings for Wood Protection Against Bacterial Growth and Outdoor Weathering. *J Color Sci Tech*. 2024;18(2):151-161. <https://doi.org/10.30509/JCST.2024.167309.1226>. [In Persian].