

Effect of Plasma pretreatment and Nano Silica on improving affectivity of Waterborne and oil-based coatings on Beech wood surface

Masood Sarajieh¹, Hadi Gholamiyan^{2*}, Davood Efhami sisi³, Akbar Mastouri⁴

1- Ph.D. Student, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Iran

2- Corresponding author, Associate Professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Iran, Email: hadi_gholamiyan@ut.ac.ir

3- Assistance Professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Iran

4- Post-doctoral researcher, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Iran

Received: December 2025

Accepted: Febreoury 2026

Abstract

Problem definition and objectives: The application of new surface preparation methods and the development of biocompatible coatings containing nanoparticles are paving the way for a revolution in the wood industry and its products. The aim of this research is to investigate and compare water borne and oil-based protective coatings on the surface performance of beech wood (*Fagus sylvatica*) and to evaluate the role of adding silica nanoparticles and plasma pretreatment in improving the surface properties and durability of the coatings.

Methodology The surface of samples was pretreated using plasma technology in a nitrogen environment. Then, the coating formulations were prepared with and without 1.5% by weight of Nano-silica and applied to the wood surfaces by the film-application method. Finally, contact angle tests and ATR-FTIR spectroscopy were performed to investigate the effect of plasma pretreatment on the wood surface. Also, the adhesion test (pull-off), abrasion and pencil hardness tests were investigated on the coated wood surfaces. The thickness of the coatings was also studied and compared using a stereo microscope.

Results: Plasma pretreatment increased the wettability and permeability of the wood surface by causing chemical and morphological changes. In general, the coating thickness and surface mechanical properties (abrasion, hardness) were higher on water borne coatings than on oil-based coatings. Pretreatment of plasma significantly increased adhesion of coating on wood surface. However, nanoparticles caused improvement in wear resistance of both coatings on wood.

Conclusion: Pretreatment of plasma on wood improved adhesion strength of both types of coating (water base and oil base) which increased the durability of coating in indoor and outdoor conditions. The wear coefficient was obtained due to the reinforcement of coating by the incorporation of silica nanoparticles which can help mechanical damage during the life. Finally, the synergistic effect of nano - particles and plasma pretreatment has a high potential for improving the performance of the coatings in service conditions.

Keywords: beech wood, plasma, Nano-silica, water borne coating, oil-based coating.

نقش پیش تیمار پلاسما و نانو سیلیکا بر ارتقاء عملکرد پوشش های پایه آب و روغنی روی سطح

چوب راش

مسعود سراجیه^۱، هادی غلامیان^{۲*}، داوود افهامی سیسی^۳، اکبر مستوری^۴

- ۱- دانشجوی دکتری گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران
۲- نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، ایران. رایانامه: hadi_gholamiyan@ut.ac.ir
۳- استادیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، ایران،
۴- محقق پسا دکتری گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، ایران.

تاریخ پذیرش: اسفند ۱۴۰۴

تاریخ دریافت: آذر ۱۴۰۴

چکیده

بیان مساله و اهداف: به کارگیری روش های نوین آماده سازی سطح و توسعه پوشش های زیست سازگار حاوی نانو ذرات، زمینه ساز تحول در صنعت چوب و فرآورده های آن هستند. هدف این پژوهش، بررسی و مقایسه پوشش های حفاظتی پایه آب و پایه روغن بر عملکرد سطحی چوب راش (*Fagus sylvatica*) و ارزیابی نقش افزودن نانوذرات سیلیکا و پیش تیمار پلاسما در بهبود خواص سطحی و دوام پوشش ها است.

مواد و روشها: سطح نمونه ها، به روش فناوری پلاسما در محیط نیتروژن پیش تیمار شدند. سپس، فرمولاسیون پوشش ها با و بدون ۱/۵ درصد وزنی از نانو سیلیکا تهیه و به وسیله فیلم کش روی سطوح چوب اعمال شدند. در نهایت، آزمون های زاویه تماس و طیف سنجی ATR-FTIR جهت بررسی اثر پیش تیمار پلاسما روی سطح چوب انجام شد. همچنین، آزمون چسبندگی کششی (پول آف)، سایش و سختی مداد روی سطوح پوشش خورده چوب بررسی شد. ضخامت پوشش ها نیز با استریو میکروسکوپ مطالعه و مقایسه شد.

نتایج: به عنوان نتیجه، پیش تیمار پلاسما با ایجاد تغییرات شیمیایی و مورفولوژیکی، سبب افزایش ترشوندگی و نفوذپذیری سطح چوب شد. به طور کلی ضخامت پوشش و خواص مکانیکی سطح (سختی، سایش) روی پوشش های پایه آب بیشتر از پوشش های روغنی بدست آمد. پیش تیمار پلاسما به طور معنی داری چسبندگی پوشش ها روی سطح چوب را افزایش داد. در حالیکه، نانو ذرات موجب بهبود چشم گیر مقاومت به سایش هر دو پوشش روی چوب شد.

نتیجه گیری: پیش تیمار پلاسما روی چوب موجب بهبود قدرت چسبندگی هر دو نوع پوشش (پایه آب و پایه روغن) شد که سبب افزایش دوام پوشش ها در شرایط داخل و خارج ساختمان می شود. کمترین ضریب سایش به دلیل تقویت پوشش با ادغام نانو ذرات سیلیکا بدست آمد که به طول عمر بیشتر در شرایط آسیب های مکانیکی کمک می کند. در نهایت، اثر هم افزایی نانو ذرات و پیش تیمار پلاسما پتانسیل بالایی برای بهبود عملکرد پوشش ها در شرایط سرویس نشان داد.

واژه های کلیدی: چوب راش، پلاسما، نانو سیلیکا، پوشش پایه آب، پوشش پایه روغن.

مقدمه

آسیب پذیری آن در برابر رطوبت، نور، عوامل جوی، بیولوژیکی و آسیب های مکانیکی، موجب کاهش دوام و کیفیت چوب در طول زمان می شود. این موضوع، ضرورت

چوب به عنوان یک ماده طبیعی و تجدیدپذیر، کاربرد گسترده ای در صنایع مختلف دارد؛ با این حال،

پوشش و خصوصیات بستر وابسته است [۱۱] و ممکن از در طول سرویس یا آسیب های مکانیکی تضعیف شود. فرآیند پیش اصلاح و آماده سازی بستر چوب پیش از اعمال پوشش نقش کلیدی در بهبود چسبندگی و دوام آن در شرایط داخل و خارج ساختمان دارد [۱۱، ۱۲]. روش های زیادی در این زمینه گسترش پیدا کرده است. امروزه، فناوری پلاسما به عنوان یک روش نوین و کارآمد برای آماده سازی سطح چوب و فرآورده های مرکب مطرح است [۱۲، ۱۳، ۱۵]. تیمار پلاسما با ایجاد تغییرات مورفولوژیکی و شیمیایی در سطح چوب، منجر به افزایش ترشوندگی و فعال سازی سطح می شود [۱۶، ۱۷]. این تغییرات نه تنها موجب بهبود چسبندگی پوشش ها می گردد، بلکه دوام و مقاومت آنها در برابر عوامل تخریب کننده را نیز ارتقا می دهد [۱۴، ۱۵].

در یک رویکرد کلی، پوشش های پایه روغن و پایه آب چوب به عنوان روش های حفاظتی زیست سازگار و کارآمد سطح مطرح بوده که در حال گسترش هستند [۳]. با این حال مطالعات با این پوشش ها و تقویت آنها با نانو ذرات هنوز ناکافی است. علاوه بر این، آماده سازی سطح یک رویکرد ضروری و کارآمد برای بهبود عملکرد و افزایش دوام پوشش هاست [۱۶]. بنابر این، هم افزایی این پوشش ها با نانو ذرات و پیش تیمار پلاسما کمتر مورد توجه بوده و می تواند چشم انداز های جدیدی برای حفاظت چوب معرفی نماید.

هدف این پژوهش، بررسی و مقایسه عملکرد پوشش های حفاظتی پایه آب و پایه روغن بر روی سطح چوب راش و ارزیابی نقش افزودن نانوذرات سیلیکا و پیش تیمار پلاسما در بهبود خواص سطحی و دوام پوشش ها است. از این رو، ابتدا نقش نوآورانه و کلیدی پیش تیمار پلاسما به طور مستقل بر خصوصیات سطح چوب راش بررسی خواهد شد. سپس، دو نوع پوشش پایه آب و پایه روغن از بعد خواص مکانیکی (سایش و سختی مداد) و قدرت چسبندگی به طور مقایسه ای بررسی خواهد شد. همچنین، نانوذرات سیلیکا در فرمولاسیون هر دو نوع پوشش وارد شده تا نقش تقویت کنندگی ارزیابی شود. در نهایت اثر هم افزایی پیش تیمار پلاسما و فرمولاسیون نانوکامپوزیتی برای دو نوع پوشش ذکر شده مطالعه و بررسی می شود. بنابراین، این مطالعه با معرفی پوشش های زیست سازگار با عملکرد بالا و نقش آماده

استفاده از پوشش های حفاظتی را آشکار می سازد. پوشش های سطحی به عنوان یکی از مهم ترین روش های حفاظت، نقش کلیدی در افزایش دوام و عملکرد چوب ایفا می کنند [۱، ۲]. در سال های اخیر، پوشش های پایه آب و وارنیش های روغنی به شدت در حال گسترش هستند [۳]. پوشش های پایه آب به ویژه پلی یورتان به دلیل زیست سازگار بودن مورد توجه قرار گرفته اند. این پوشش ها علاوه بر مزایای زیست محیطی، عملکرد مکانیکی و شیمیایی مناسبی نیز ارائه می دهند [۴]. در حالی که پوشش های حلال پایه به دلیل مقاومت بالا در برابر رطوبت، شرایط محیطی و چسبندگی بالاتر، همچنان کاربرد دارند [۵]. اما نگرانی های زیست محیطی و محدودیت های قانونی در بسیاری از کشورها موجب کاهش استفاده از آنها شده است. پوشش های پایه آب به دلیل ایمنی، خشک شدن سریع، سهولت تمیزکاری ابزار، کاهش خطر آتش سوزی، به عنوان گزینه ای پایدار و نوین در صنعت چوب مطرح شده اند. پوشش های پایه روغن مورد دیگری است که جایگاه مهمی در صنعت چوب پیدا کرده است. پوشش های پایه روغن به دلیل نفوذ خوب در بافت چوب و آبگریزی بالا مورد استفاده گسترده قرار می گیرند [۶]. در واقع، پوشش های پایه روغن به دلیل زمان خشک شدن طولانی تر، فرصت کافی برای نفوذ بیشتر دارند. این پوشش ها معمولاً دوام بالایی در برابر شرایط محیطی داشته و به دلیل سهولت اجرا، عدم وجود حلال، امکان تیمار مجدد، زیست سازگاری و حفظ بیشتر ماهیت طبیعی چوب، در صنایع مبلمان، دکوراسیون داخلی، لوازم خانگی، اسباب بازی و.. محبوبیت زیادی یافته اند [۶، ۷].

از سوی دیگر، استفاده از نانوذرات در فرمولاسیون پوشش ها به عنوان رویکردی نوین در بهبود عملکرد حفاظتی مطرح شده است. نانوذرات به دلیل سطح ویژه بالا و ویژگی های مکانیکی و شیمیایی خاص، می توانند مقاومت به سایش، سختی و آبگریزی سطح را به طور قابل توجهی افزایش دهند [۸، ۹، ۱۰]. از این رو، تقویت و فرموله کردن پوشش های حفاظتی چوب با نانوذرات، راهکاری مؤثر برای ارتقای دوام و کارایی پوشش های پلیمری محسوب می شود. با وجود همه این مسائل، عملکرد پوشش های حفاظتی چوب به شدت به قدرت چسبندگی

(ولتاژ مؤثر ۲-۳ کیلوولت) و در دمای حدود ۷۰ درجه سانتی‌گراد بافاصله سه سانتی‌متر انجام گرفت تا سطح نمونه‌ها در معرض تیمار پلاسما قرار گیرد.

تهیه پوشش‌ها و اجرا روی چوب

جهت تهیه فرمولاسیون پوشش‌های نانو کامپوزیتی، ۱/۵ درصد وزنی از نانو سیلیکا به طور جداگانه درون مقدار مشخصی پوشش‌های پایه روغن (با نانو سیلیکای آبریز) و پایه آب (با نانو سیلیکای آبدوست) ترکیب شده و به ترتیب به کمک همزن مغناطیسی (۱۰ دقیقه) و التراسونیک (یک دقیقه) همگن‌سازی شد. درصد نانو سیلیکای آبدوست بر اساس ماده جامد خشک پلی‌یورتان پایه آب نهایی (DSC3=32%) محاسبه شد. در نهایت، همه پوشش‌ها با ضخامت تر $200 \mu\text{m}$ به وسیله یک فیلم‌کش و با سرعت حرکت 150 mm/s روی چوب معمولی و چوب پیش تیمار شده اعمال شدند. مشخصات و کدبندی همه تیمارها در جدول ۱ ارائه شده است. بعد از فرآیند پوشش دهی، نمونه‌ها به مدت یک روز در دمای اتاق و یک هفته دیگر در شرایط اتاق کلیما مجدد نگهداری شدند تا فرآیند خشک شدن و متعادل سازی رطوبت قبل از هر ارزیابی انجام شود.

ارزیابی خواص و آزمون‌ها

طیف‌سنجی ATR-FTIR^۳

آزمون طیف‌سنجی ATR-FTIR با هدف بررسی تغییرات شیمیایی سطح پیش تیمار شده چوب با پلاسما استفاده شد. در این راستا، تغییرات گروه‌های عاملی با یک اسپکتروفتومتر (Model Bruker Tensor-27, Germany) در محدوده 4000 تا 500 cm^{-1} با 64 اسکن و رزولوشن ۴ ثبت شد. نمونه‌های چوب قبل از هرگونه تجزیه و تحلیل سطحی به آرامی خشک شده و بلافاصله مورد آنالیز قرار گرفتند. در نهایت، نتایج پس از نرمال‌سازی تجزیه و تحلیل شدند.

سازی سطح با روش‌های نوین، می‌تواند تأثیری شگرفی در صنعت چوب و توسعه روش‌های حفاظتی داشته باشد.

مواد و روش‌ها

جهت مطالعه، از الوارهای چوب راش وارداتی (*Fagus sylvatica*) خریداری شده از بازار چوب فروشان خاوران استفاده شد. پوشش روغنی از شرکت AURO آلمان تهیه و استفاده شد. پوشش پایه آب پلی‌یورتان (اصلاح شده با روغن) نیز از شرکت Bona-Mega سوئد استفاده شد. نانو ذرات سیلیکا (~ 30 نانومتر) نیز از شرکت ایونیک (Evonic) آلمان تهیه و استفاده شدند.

آماده سازی نمونه‌های چوبی

الوارهای خشک و سالم از برون چوب گونه راش به ابعاد $10 \times 10 \times 2$ (طول، عرض و ضخامت) سانتی‌متر برش داده شدند. سپس سطوح هدف (مماسی) نمونه‌ها با سنباده درجه ۱۲۰ و سپس ۲۲۰ پرداخت گردید. در نهایت، قبل از هرگونه فرایند اصلاح یا پوشش دهی به جهت متعادل سازی رطوبت، نمونه‌ها به مدت ۳ هفته در رطوبت نسبی ۶۵ درصد و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد (اتاق کلیما) نگهداری شدند.

پیش تیمار پلاسما

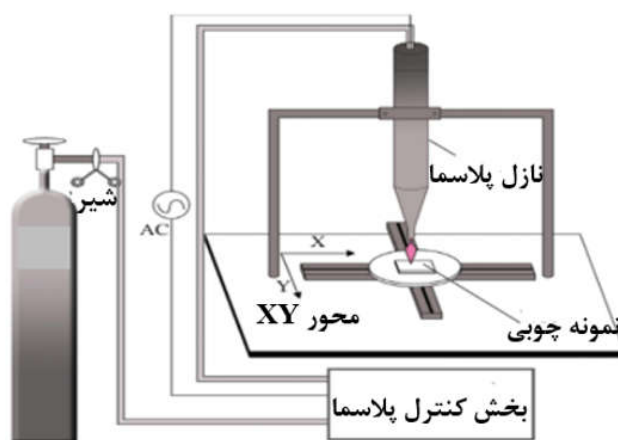
عملیات پلاسما تحت محیط نیتروژن به عنوان گاز عامل با استفاده از جت پلاسمای DBD^۱ (مدل RBG-۲) شرکت مهندسی پلاسما ایده آزما، تهران، ایران) روی چوب انجام شد (شکل ۱). در مرحله اول پلاسما طی فرآیندی با ولتاژ بالا بین الکتروود و اسپری نازل قرار می‌گیرد تا فشار موجود در دهانه نازل توسط جریان گاز تخلیه گردد؛ بنابراین هوای فشرده به عنوان گازهای انتقال‌دهنده انرژی هستند. در مرحله دوم فرکانس تکرار پالس ۶۰ کیلوهرتز و طول پالس ۱۰-۵ میکروثانیه و شدت جریان ۷۰-۵۵ (L/min) روی سیستم تنظیم شد و نهایتاً حرارت دهی پلاسما در ولتاژ نزدیک به ۱۵ کیلوولت

³ Dry solid content

⁴ Attenuated total reflectance-Fourier transform infrared spectroscopy

¹ Dielectric barrier discharge (DBD)

² Reinhausen Plasma GmbH, Regensburg, Germany



شکل ۱- شمای تصویری از فرایند اجرایی پلاسما روی سطح نمونه ها

جدول ۱- مشخصات و کد بندی تیمار های سطحی روی چوب راش

کد تیمار ها	نوع سطح ۱	نوع سطح ۲	نوع پوشش	نانو سیلیکا (%)
W	چوب بدون پوشش	-	-	-
Plasma		پلاسما	-	-
P	چوب با پوشش	-	پایه آب	-
O		-	پایه روغن	-
PP		پلاسما	پایه آب	-
PO		پلاسما	پایه روغن	-
PPS		پلاسما	پایه آب	۱/۵
POS		پلاسما	پایه روغن	۱/۵

شد. نهایتاً میانگین ۴ اندازه گیری برای هر تیمار گزارش شد. ضخامت و کیفیت پوشش دهی روی سطح چوب راش با استریومیکروسکوپ مدل SZM-3 (Optika, Italy) بررسی شد. برای این منظور ضخامت کیفی و کمی پوشش ها از پروفیل چوب راش (از سطح عرضی) مطالعه شد. در نهایت، ضخامت کمی پوشش با استفاده از نرم افزار Image J در سه نقطه اندازه گیری و عدد میانگین گزارش شد.

خواص مکانیکی سطح (سایش و سختی)

آزمایش مقاومت سایشی طبق استاندارد ASTM D4060 و دستگاه سایش چرخان (Taber abrasion tester model 5135, USA) روی نمونه های چوبی انجام شد. طی این روش، چرخ های ساینده (CS-10) تحت بار ۵۰۰ گرم برای ۲۵۰ چرخه استفاده شدند. ضریب سایش (I) هر نمونه طبق معادله (۱) محاسبه شد. آزمون سختی مداد نیز طبق استاندارد ASTM D3363 تحت زاویه ۴۵ درجه

زاویه تماس قطره آب (WCA)^۱

زاویه تماس، به عنوان معیاری از ترشوندگی سطح چوب متأثر از آماده سازی بستر با پلاسما بررسی شد. برای این منظور، از یک سیستم زاویه تماس دینامیکی (Pocket Goniometer PGX) ساخت کشور سوئد استفاده شد. بنابراین، قطرات آب مقطر دیونیزه (۷ میکرولیتر) روی سطح مماسی چوب معمولی و پیش اصلاح شده با پلاسما قرار داده شده و اندازه گیری ها در یک دوره ۶۰ ثانیه ای ثبت شدند. تمام اندازه گیری های زاویه تماس در دمای اتاق و با سه تکرار انجام شد.

مقاومت به چسبندگی و ضخامت پوشش ها

قدرت چسبندگی پوشش ها به زیرلایه چوبی طبق استاندارد ASTM D4541 و به روش قدرت کششی (PosiTest AT Pull-Off Adhesion Tester) اندازه گیری

¹ Water cantact angle

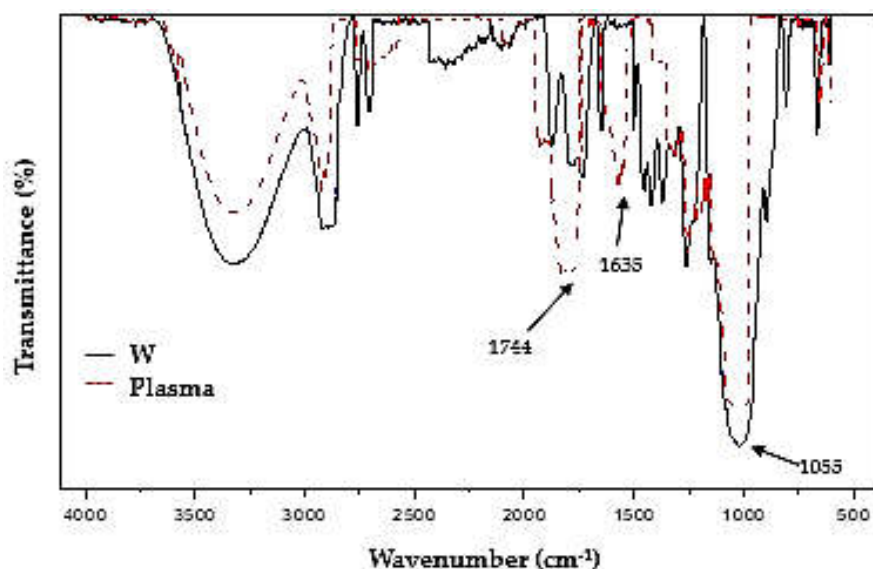
آنالیز آماری

تحلیل آماری انواع تیمارها سطح با استفاده از آنالیز واریانس یک طرفه (ANOVA) در نرم افزار SPSS انجام شد. همچنین، گروه بندی داده ها با استفاده از آزمون چند دامنه ای دانکن با حروف لاتین در سطح اطمینان ۹۵٪ تعیین شد. انحراف معیار به عنوان اطمینان اندازه گیری ها به صورت میله خط در گزارش داده ها تنظیم شد.

انجام شد. در این روش، چندین مداد با درجات سختی مختلف روی سطح کشیده می شوند تا رتبه بندی کیفی سختی پوشش در برابر خراش ارزیابی شود. خواص مکانیکی سطح با ۴ تکرار از هر تیمار اندازه گیری و میانگین گزارش شد.

$$I = \frac{a-b \times 1000}{c} \quad (1)$$

که در آن a و b به ترتیب وزن به گرم نمونه قبل و بعد از سایش و c تعداد چرخه های سایش است.



شکل ۲- طیف سنجی ATR-FTIR روی چوب راش

بعد از فرآیند پلاسما نشان داد. روند افزایشی در این پیک غالباً تغییرات شیمیایی در ماهیت لیگنین و افزایش تمایل چوب به آب را نشان می دهد [۱۶] تغییرات در پیک cm^{-1} ۱۰۵۵ منتصب به گروه های C-O سلولز و همی سلولز [۱۱، ۱۴]، برهم کنش های شیمیایی پلی ساکاریدهای سطح چوب بعد از پیش تیمار پلاسما را نشان می دهد. نتایج مشابه از تغییرات شیمیایی چوب تیمار شده با پلاسما در تحقیقات پیشین نیز مشاهده شده است [۲۱، ۱۷]. نهایتاً، تغییرات شیمیایی و تشکیل گروه های آمورف (آب دوست) بیشتر روی سطح چوب راش پیش تیمار شده با پلاسما تایید شد.

نتایج و بحث

خصوصیات سطح چوب و اثر پیش تیمار پلاسما

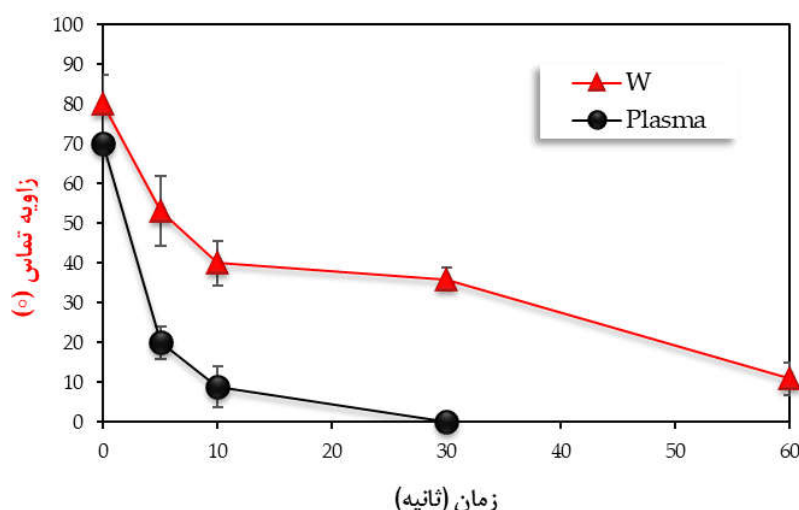
تغییرات شیمیایی

تغییرات شیمیایی چوب راش طی پیش تیمار پلاسما به روش طیف سنجی FTIR در شکل ۲ ارائه شده است. تغییرات شیمیایی زیادی بعد از اعمال پلاسما در سطح چوب قابل درک است که برخی از پیک های مهم مربوطه اشاره می شود. پیک جذبی در محدوده cm^{-1} ۱۷۴۴ غالباً منتصب به گروه های کربنیل همی سلولز (C=O) بوده که بعد از پیش تیمار پلاسما افزایش یافت. افزایش شدید این پیک احتمالاً به تغییرات شیمیایی زیاد در ساختار همی سلولز اشاره دارد [۱۷، ۱۹]. تغییرات حاصل شده چوب در پیک cm^{-1} ۱۶۳۸ منتصب به گروه های آروماتیک لیگنین و ارتعاش خمشی O-H است [۵، ۱۹]. که روند افزایشی را

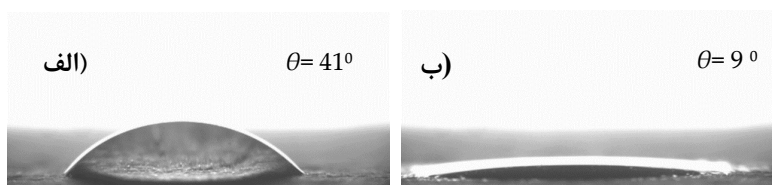
ترشوندگی سطح چوب

نتایج زاویه تماس سطح چوب راش تحت تاثیر پیش- تیمار پلاسما در شکل ۳ ارائه شده است. با اعمال پیش- تیمار، زاویه تماس سطح چوب به طور چشمگیری کاهش یافت و ترشوندگی افزایش یافت. به طوریکه، قطره آب روی سطح چوب پیش تیمار شده قبل از ۳۰ ثانیه به طور کامل جذب شده و زاویه تماس قطره صفر شد. این در حالی است که بعد از ۶۰ ثانیه قطره آب روی سطح چوب معمولی، هنوز زاویه ۱۱° را نشان می‌دهد. در این راستا، مطالعات پیشین گزارش داده‌اند که پیش‌تیمار پلاسمایی در محیط‌های اکسیژن، نیتروژن، هوا و آرگون، ترشوندگی

سطح چوب‌های پهن‌برگ و سوزنی‌برگ را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد [۲۲، ۲۳]. تصاویر مربوط به زاویه تماس و کیفیت ترشوندگی سطح چوب متاثر از فرآیند پلاسما در شکل ۴ گزارش شده است. خصوصیات مورفولوژیکی و ماهیت شیمیایی سطح دو فاکتور تعیین کننده زاویه تماس سطح است [۵]. از این رو، عملیات پلاسما باعث تغییرات شیمیایی قابل توجهی در سطح چوب می‌شود؛ ترکیب گروه‌های عاملی حاوی اکسیژن که منجر به فعال شدن سطح و افزایش ترشوندگی می‌شود [۱۴].



شکل ۳- زاویه تماس دینامیکی قطره آب (WCA) طی ۶۰ ثانیه روی سطح چوب راش معمولی و پیش اصلاح شده با فناوری پلاسما.



شکل ۴- شمای تصویری از زاویه تماس قطره آب روی سطح چوب راش معمولی (الف) و تیمار شده با پلاسما (ب) در ثانیه ۱۱۰ م.

پوشش‌های حفاظتی بر پایه آب و روغن

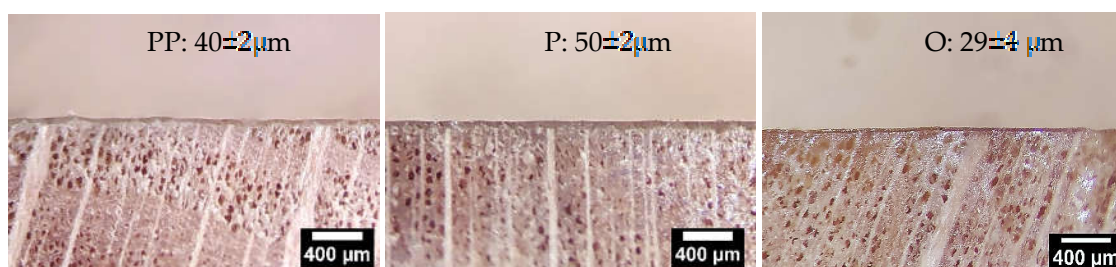
ضخامت پوشش

انواع پوشش‌های حفاظتی با هدف بهبود عملکرد سطحی با استفاده از یک فیلم‌کش و ضخامت تر ۲۰۰ میکرون روی چوب راش اعمال شدند. ضخامت پوشش روی چوب متاثر از میزان نفوذ پذیری سطح و مقدار جذب پوشش پلیمری است [۵]. از این رو، ضخامت پوشش یک

فاکتور مهم بوده که غالباً اثر مستقیمی بر عملکرد سطح دارد. از اینرو، با هدف تعیین کمی ضخامت پوشش پلیمری روی چوب راش متاثر از نوع پوشش (پایه روغنی، پایه آب) و اثر پیش تیمار پلاسما، نتایج تصاویر استرومیکروسکوپ در شکل ۵ ارائه شده است. مقدار کمی ضخامت خشک برای پوشش پلی‌پورتان پایه آب روی چوب، ۵۰ میکرون بدست آمد، در حالی که ضخامت لایه

شد. این موضوع با توجه به نتایج تر شونده‌گی (شکل ۳) نیز قابل درک بود. در واقع تیمار پلاسما با ایجاد تغییرات شیمیایی و مورفولوژیکی سطح منجر به افزایش تر شونده‌گی [۲۲] و نفوذپذیری بستر شده و متعاقبا جذب بالای پوشش به چوب، ضخامت لایه خشک را کاهش می دهد. اگرچه، نوع پوشش بر اثرات تیمار پلاسما روی چوب اثر گذار است، ولی با توجه تغییرات مورفولوژیکی و افزایش چسبندگی روی سطح چوب پیش تیمار شده، بهبود جذب برای پوشش های روغنی (غیر قطبی) نیز تا حدودی قابل درک است.

برای پوشش روغنی حدودا ۲۹ میکرون است. ضخامت کم پوشش روغنی، جذب بالای پوشش و عدم ضرورت پیش تیمار پلاسما را در مقایسه با پوشش پایه روغن نشان می دهد. هر چند اثرات تیمار پلاسما برای پوشش های روغنی نیاز به مطالعه بیشتر دارد. علاوه براین، یکنواختی جذب برای پوشش پایه آب بهتر از نوع روغنی بدست آمد، که این موضوع می تواند روی دوام پوشش اثر گذار باشد. اعمال تیمار پلاسما روی سطح چوب سبب افزایش جذب پوشش حفاظتی و در نتیجه منجر به کاهش ضخامت پوشش پایه آب (کاهش از ۵۰ به ۴۰ میکرون) روی چوب



شکل ۵- ضخامت خشک لایه پوشش روی سطح چوب راش: پایه روغن (O)، پلی یورتان پایه آب (P)، پلی یورتان پایه آب روی سطح پیش تیمار شده با پلاسما (PP).

دادند [۱۴]. علاوه بر این، گزارش شده است که پوشش های پایه حلال پلی یورتان در مقایسه با پوشش های پلی یورتان آکریلیکی (پایه آب) چسبندگی بهتری را به چوب نشان می دهند [۲۳]. با این وجود، نگرانی های زیست محیطی کاربرد پوشش های پایه حلال را به شدت محدود کرده و تمایل به پوشش های پایه آب در حال گسترش هستند [۳]. فرضیه های زیادی در مورد چسبندگی پوشش به بستر چوبی وجود دارد. اما به نظر می رسد که نرخ نفوذ پذیری بستر، قفل شدن مکانیکی پوشش پلیمری، خواص رئولوژیکی و شیمیایی پوشش مایع پلیمری از مهمترین فاکتورها می باشد [۷، ۲۴]. احتمالا، ضخامت فیلم بالاتر و ماهیت صلب و سخت پوشش پلیمری پایه آب در مقایسه با پوشش روغنی، سبب چسبندگی بالاتر پوشش های پلیمری است.

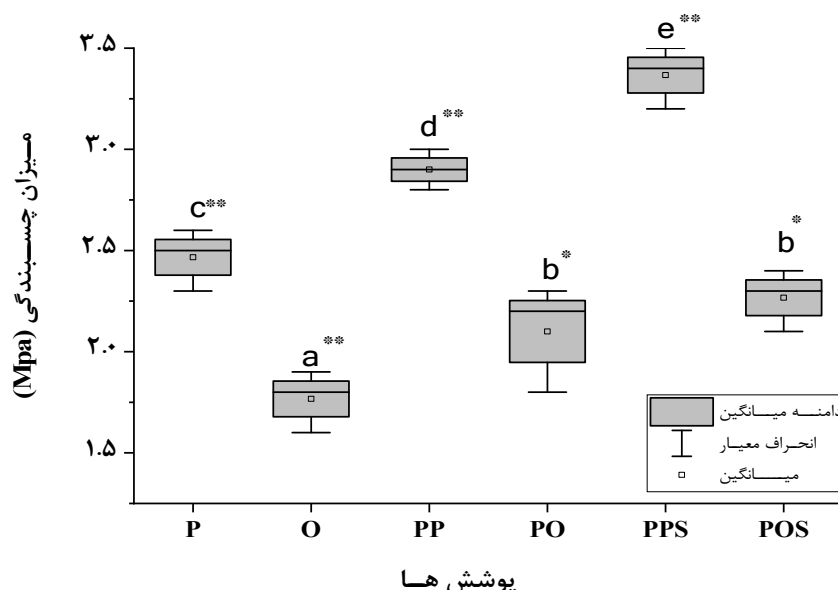
افزودن نانو فیلرها بسته به مقدار بارگذاری و متعاقبا کیفیت ساختاری و رئولوژیکی پلیمر حاصله، می تواند اثر منفی یا مثبتی روی چسبندگی پوشش داشته باشد [۷، ۲۵] در ارتباط با خصوصیات بستر، تاثیر مثبت پیش عمل آوری سطح چوب با فناوری پلاسما بر ارتقاء

مقاومت چسبندگی پوشش ها به سطح چوب

نتایج قدرت چسبندگی و مقاومت پوشش چوب در مقابل نیروی کششی جدا کننده در شکل ۶ ارائه شده است. تغییرات معنی داری بین مقاومت به چسبندگی انواع پوشش ها روی چوب راش مشاهده شد (Anova, $P \leq 0.05$), بخصوص وقتی که پوشش روی سطح پیش تیمار شده با روش پلاسما اعمال شده بود. اثر بهبودی پلاسما روی عملکرد چسبندگی هر دو نوع پوشش چشم گیر بود. تاثیر نانو سیلیکا برای بهبود چسبندگی پوشش پایه آب معنی دار بود. با این وجود، افزودن نانو سیلیکا برای پوشش پایه روغن، تاثیر معنی داری بر چسبندگی آن نداشت. علاوه بر این، قدرت چسبندگی پوشش پایه آب نیز بیشتر از پوشش پایه روغن روی چوب بود، که ماهیت پلیمر، کیفیت لایه شکل گرفته روی سطح و ضخامت بیشتر پوشش پایه آب احتمالا دلیل این برتری باشد. در همین راستا گزارش شده است که چوب تیمار شده با پوشش های پایه روغن، آبریزی بلند مدتی برای سطح فراهم می کند، در حالی که پوشش های پایه حلال و پایه آب مقاومت بهتری در برابر تخریب نوری نشان

و برهمکنش ماتریکس پلیمری با سطوح چوبی افزایش می یابد [۱۶، ۱۸]. بنابراین چسبندگی بهتر پوشش ها روی چوب راش پیش تیمار شده با پلاسما، عمدتاً ناشی از بهبود تر شوندگی است.

چسبندگی در تحقیقات پیشین به کرات گزارش شده است [۱۵، ۱۷، ۱۲، ۲۳]. در واقع، تیمار پلاسما با ایجاد تغییرات فیزیکی و شیمیای در سطح بستر، منجر به افزایش انرژی سطحی و متعاقباً بهبود تر شوندگی یا نفوذپذیری پوشش به بستر می شود؛ در نتیجه چسبندگی

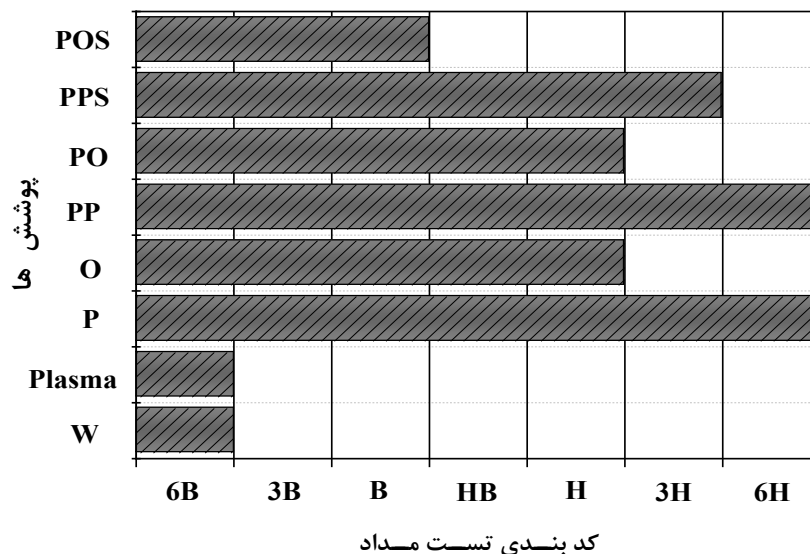


شکل ۶- میزان استحکام چسبندگی انواع پوشش ها روی چوب راش شاهد و پیش تیمار شده با پلاسما

برای پوشش های بر پایه آب بدست آمد. با این وجود، حضور نانو ذرات و پیش تیمار پلاسما تاثیر زیادی بر روی سختی سطح نشان نداد. در واقع، سختی پوشش های پلیمری سطح تا حد زیادی تحت تاثیر درجه اتصال عرضی یا دمای انتقال شیشه ای (Tg) و همچنین چگالی شبکه پلیمری قرار دارد [۱۷، ۲۶].

آزمون سختی مداد

نتایج سختی سطح انواع پوشش های اعمال شده روی چوب پیش تیمار شده و شاهد راش به روش تست مداد در شکل ۷ گزارش شده است. پوشش دهی سطح چوب سختی سطح را به طور چشم گیری بهبود داد. به طوری که بالاترین میزان سختی سطح با درجه بندی کیفی 6H

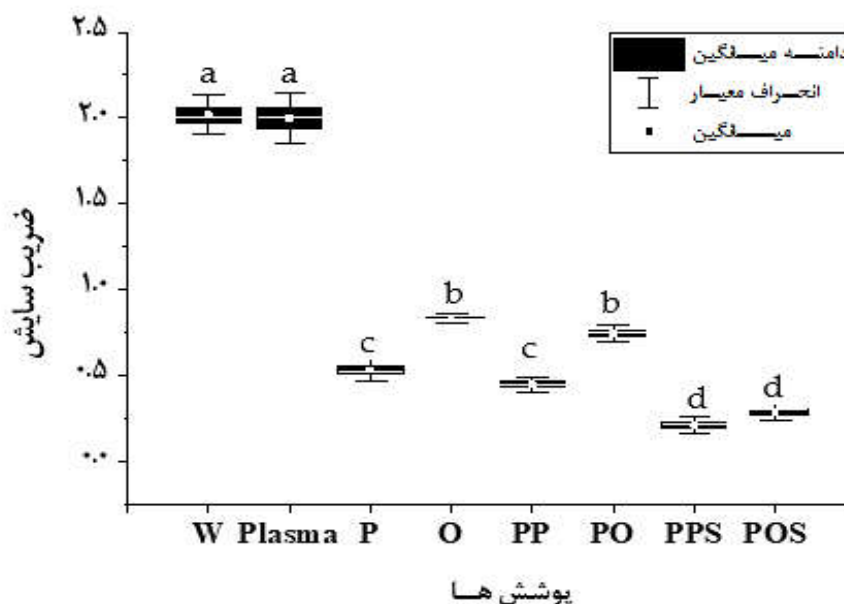


شکل ۷- سختی سطح ممداد انواع پوشش ها روی چوب راش معمولی و پیش تیمار شده با پلاسما

ضریب سایش

ضریب سایش چوب راش حفاظت شده با دو نوع پوشش پایه آب و پایه روغن و متاثر از نانو ذرات سیلیکا و پیش تیمار پلاسما در شکل ۸ گزارش شده است. به طور کلی تفاوت معنی داری بین ضریب سایش نمونه ها بعد از آزمون سایش چرخان مشاهده شد ($Anova, P \leq 0.05$). در حالی که بیشترین میزان سایش (حدوداً ۲) مربوط به نمونه کنترل (بدون پوشش) بود، پوشش های نانو سیلیکایی اعمال شده روی چوب پیش تیمار شده با پلاسما، کمترین ضریب ساینده گی (کمتر از ۰/۵) را نشان داد. به طور مقایسه ای پوشش پایه آب مقاومت به سایش بهتری نسبت به پوشش پایه روغن نشان داد. احتمالاً این برتری ناشی از ضخامت بالاتر پوشش پایه آب است. یک کاهش نسبی در ضریب سایش پوشش ها طی پوشش دهی روی چوب پیش تیمار شده با پلاسما مشاهده شد. هر چند اثر پلاسما روی سایش خیلی معنی دار نبوده است. با این

حال، بهبود معنی داری در مقاومت سایشی پوشش ها بعد از افزودن ۱/۵ درصد نانو ذرات سیلیکا بدست آمد. نتایج مشابه از بهبود مقاومت به سایش پوشش پلی یورتان (پایه آب و پایه حلال)، پلی استر و آلکیدی بعد از افزودن نانو ذرات سیلیکا (SiO_2)، دی اکسید سربیم (CeO_2)، تیتانیوم TiO_2 و نانو سرامیک گزارش شده است [۷،۸،۱۳،۲۷]. به طور کلی، مقاومت سایشی نه تنها به سختی پوشش، بلکه به انعطاف پذیری فیلم پلیمری نیز بستگی دارد [۷]. مواد با مقاومت به سایش بالا، لاستیک های صنعتی و خودرو هستند. از این رو، تعادل بین سختی و انعطاف پذیری پوشش پلیمری روی چوب ضروری است. علاوه بر این، ذرات نانو به عنوان فیلر از توسعه و ایجاد ترک و گسستگی در ماتریس پلیمری جلوگیری می کنند. همچنین، نانو ذرات سیلیکا به عنوان یک روان کننده جامد عمل کرده و مانع از ساییدگی در مقابل جسم ساینده می شوند [۲۶،۲۸].



شکل ۸- ضریب سایش چوب تیمار شده با پوشش‌های پایه آب (P) و پایه روغن (O) تحت تاثیر نانو ذرات سلیکا و پیش عمل‌آوری سطح با فرآیند پلاسما

منابع

- [1] Dvořák, O., Kvietková, M. S., Šimůnková, K., Machanec, O., Pánek, M., Pastierovič, F. and Jones, D. (2023) 'The influence of the initial treatment of oak wood on increasing the durability of exterior transparent coating systems', *Polymers*, 15(15), p. 3251.
- [2] Pánek, M., Dvořák, O. and Oberhofnerová, E. (2019) 'Effectiveness of two different hydrophobic topcoats for increasing of durability of exterior coating systems on oak wood', *Coatings*, 9, p. 280. doi: 10.3390/coatings9050280.
- [3] Akhter, P., Arshad, A. and Hussain, M. (2025) 'A review on environmental impacts of paints and strategies for producing eco-friendly-paints', *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22(1), p. 555578. doi: 10.1007/s13762-024-05760-z.
- [4] Růžičková, J., Raclavská, H., Kucbel, M., Kantor, P., Švédová, B. and Slamová, K. (2025) 'Indoor Airborne VOCs from Water-Based Coatings: Transfer Dynamics and Health Implications', *Journal of Xenobiotics*, 15(6), p. 197.
- [5] Mastouri, A., Azadfallah, M., Gholamiyan, H. and Frigione, M. (2025) 'Heat-treatment effects on wood durability outdoors and performance of polymeric coatings—adhesion and wood-water interactions', *Journal of Adhesion Science and Technology*, 39, pp. 1–22.
- [6] Yaremchuk, L., Kushpit, A., Kopynets, Z., Mayevskyy, V. and Ferents, O. (2024) 'Performance Characteristics of Coatings Created with Alkyd and

نتیجه‌گیری

این پژوهش به مقایسه عملکرد پوشش‌های حفاظتی پایه آب و روغن بر سطح چوب راش پرداخته و نقش پیش‌تیمار پلاسما و افزودن نانوذرات سلیکا را در ارتقای خواص سطحی و افزایش دوام پوشش‌ها بررسی می‌کند. نتایج این پژوهش نشان داد که پیش‌تیمار پلاسما نقش کلیدی در بهبود خواص سطحی چوب راش ایفا می‌کند. افزایش ترشوندگی و نفوذپذیری سطح (کاهش ضخامت فیلم) ناشی از تغییرات شیمیایی و مورفولوژیکی، موجب ارتقا چسبندگی پوشش‌ها و بهبود عملکرد مکانیکی آنها شد. در مقایسه پوشش‌ها، پوشش پایه آب نسبت به پوشش روغنی خواص مکانیکی مطلوب‌تری نشان دادند که می‌تواند پتانسل پوشش‌های پایه آب را گسترش دهد. کمترین ضریب سایش در پوشش‌های نانوکامپوزیتی مشاهده گردید. در نهایت، این یافته‌ها اهمیت استفاده از فناوری‌های نوین آماده‌سازی سطح و پوشش‌های زیست‌سازگار را در توسعه پایدار صنعت چوب برجسته می‌سازد. همچنین عملکرد پوشش‌ها در سطوح تیمار شده می‌تواند در آینده راه کارهای مهم و با اهمیتی را برای صنعت پیشنهاد دهد.

- [17] Xu, Y., Liang, J., Yu, L., Wu, Z., Xi, X., Zhang, B. and Xiao, G. (2023) 'Effects of plasma treatment on the surface characteristics and bonding performance of *Pinus massoniana* wood', *Forests*, 14(7), p. 1346.
- [18] Žigon, J. (2021) 'Interactions of a waterborne coating with plasma pre-treated densified beech wood', *European Journal of Wood and Wood Products*, 79(6), pp. 1383–1394.
- [19] Cheng, S., Huang, A., Wang, S. and Zhang, Q. (2016) 'Effect of Different Heat Treatment Temperatures on the Chemical Composition and Structure of Chinese Fir Wood', *BioResources*, 11(2).
- [20] Mastouri, A., Azadfallah, M., Rezaei, F., Tarmian, A., Efhamisizi, D., Mahmoudkia, M. and Corcione, C. E. (2023) 'Kinetic studies on photo-degradation of thermally-treated spruce wood during natural weathering: Surface performance, lignin and cellulose crystallinity', *Construction and Building Materials*, 392, p. 131923.
- [21] Gholamiyan, H., Ashouri, J., Ahmadi, P. and Hosseinpourpia, R. (2022) 'Surface wettability and coating performance of plasma-treated wood-based composite panels', *Coatings*, 12(12), p. 1894.
- [22] Potočnáková, L., Hnilica, J. and Kudrle, V. (2013) 'Increase of wettability of soft- and hardwoods using microwave plasma', *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 45, pp. 125–131.
- [23] Gholamiyan, H., Tarmian, A., Ranjbar, Z. et al. (2016) 'Silane nanofilm formation by sol-gel processes for promoting adhesion of waterborne and solvent-borne coatings to wood surface', *Holzforschung*, 70, pp. 429–437. doi: 10.1515/hf-2015-0072.
- [24] Riedl, B., Angel, C., Prigent, J., Blanchet, P. and Stafford, L. (2014) 'Effect of wood surface modification by atmospheric-pressure plasma on waterborne coating adhesion', *BioResources*, 9(3), pp. 4908–4923.
- [25] Sow, C., Riedl, B. and Blanchet, P. (2011) 'UV-waterborne polyurethane-acrylate nanocomposite coatings containing alumina and silica nanoparticles for wood: mechanical, optical, and thermal properties assessment', *Journal of Coatings Technology and Research*, 8, pp. 211–221.
- [26] Malaki, M., Hashemzadeh, Y. and Karevan, M. (2016) 'Effect of nanosilica on the mechanical properties of acrylic polyurethane coatings', *Progress in Organic Coatings*, 101, pp. 477–485.
- [27] Malaki, M., Hashemzadeh, Y. and Tehrani, A. F. (2018) 'Abrasion resistance of acrylic polyurethane coatings reinforced by nanosilica', *Progress in Organic Coatings*, 125, pp. 507–515.
- [28] Jnido, G., Ohms, G. and Viöl, W. (2020) 'One-step deposition of polyester/TiO₂ coatings by atmospheric pressure plasma jet on wood surfaces for UV and moisture protection', *Coatings*, 10, p. 184.
- [7] Tang, C. C., Li, Y., Kurnaz, L. B. et al. (2021) 'Development of eco-friendly antifungal coatings by curing natural seed oils on wood', *Progress in Organic Coatings*, 161, p. 106512. doi: 10.1016/j.porgcoat.2021.106512.
- [8] Mastouri-Mansourabad, A., Azadfallah, M., Tarmian, A. and Efhamisizi, D. (2020) 'Nano-Cerium Dioxide Synergistic Potential on Abrasion Resistance and Surface Properties of Polyurethane-Nanocomposite Coatings for Esthetic and Decorative Applications on Wood', *Journal of Coatings Technology and Research*, 17, pp. 1559–1570.
- [9] Rodriguez, R., Vargas, S., Rubio, E., Pacheco, S. and Estevez, M. (2006) 'Abrasion Properties of Alkyd- and Acrylic-Based Polymer-Ceramic Nano-hybrid Coatings on Wood Surfaces', *Materials Research Innovations*, 10, pp. 193–206.
- [10] Liu, X. and Xu, S. (2025) 'Enhanced performance of water-based wood coatings using KH-550-modified nano-silica: a sustainable approach for multifunctional surface protection', *Journal of Adhesion Science and Technology*, 39, pp. 1–16.
- [11] Mastouri, A., Efhamisizi, D., Lexa, M., Oladi, R., Alireza, G. P., Torabi, H. and Frigione, M. (2025) 'Biological-degradation, lignin performance and physical-chemical characteristics of historical wood in an ancient tomb', *Fungal Biology*, 129, p. 101588.
- [12] Žigon, J., Kovač, J. and Petrič, M. (2022) 'The influence of mechanical, physical and chemical pre-treatment processes of wood surface on the relationships of wood with a waterborne opaque coating', *Progress in Organic Coatings*, 162, p. 106574.
- [13] Gholamiyan, H., Gholampoor, B., Mastouri, A. and Hosseinpourpia, R. (2025) 'Surface properties of oak wood (*Quercus castaneifolia*) coated with polyester reinforced with ceramic nanoparticles using a plasma deposition technique', *Journal of Coatings Technology and Research*, 22, pp. 1–9.
- [14] Žigon, J., Pavlič, M., Kovač, J. and Straže, A. (2025) 'Recoating performance of fresh and weathered wood surfaces through atmospheric dielectric barrier discharge plasma activation', *Wood Material Science & Engineering*, 20, pp. 1–16.
- [15] Macada, M. N., Devera, E. E., Cabangon, R. J. and Ramos, H. J. (2012) 'Effects of plasma modification on adhesion properties of wood', *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 32, pp. 70–75.
- [16] Mastouri, A., Efhamisizi, D., Tarmian, A. et al. (2024) 'Sustainable superhydrophobic and self-cleaning wood via wax within Epoxy/PDMS nanocomposite coatings: durability related to surface morphology', *Progress in Organic Coatings*, 186, p. 107951. doi: 10.1016/j.porgcoat.2023.107951.