



Effect of dielectric barrier discharge plasma treatment on the performance of clear and pigmented polyurethane coatings on wood surfaces

Afsaneh Tupa¹ | Hadi Gholamiyan^{2*} | Akbar Mastouri³ |
Mohamad Saleh Rostami⁴ | Rouzbeh Abbaszadeh⁵

1. Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Iran. afsaneh.topa@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, 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. Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Iran. Email: Mastouri_akbar@ut.ac.ir
4. Agricultural Engineering Research Institute, Iran. Email: s.rostami@areco.ac.ir
5. Department of Agriculture, Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST), Iran. Email: abbaszadeh@irost.org

ARTICLE INFO

Article type:

Research Article

Article History:

Received: 02 June 2026

Revised: 13 July 2026

Accepted: 15 August 2026

Published online: 14 September 2026

Keywords:

Beech wood,
Colored (white) polyurethane,
Plasma pretreatment (DBD),
Transparent polyurethane,
Wear index.

ABSTRACT

Introduction: Wood surface coating is usually done to improve the appearance, improve surface performance and thus increase the lifespan of wooden structures. However, the main problem is that most coatings are separated from the wood surface after exposure to humidity and site conditions, reducing the physical and mechanical properties of the structure. The main objective of this research is to modify the wood surface using modern plasma technology; in such a way that the durability of protective coatings for indoor and outdoor applications is increased and their premature separation is prevented.

Method: In this research, two types of transparent and colored (white) polyurethane protective coatings were used to cover the wood surface. Beech (*Fagus sylvatica*) wood surfaces were treated with dielectric barrier discharge (DBD) plasma pretreatment in a nitrogen gas environment for different times of 30, 60, 120 and 240 seconds before coating. After the treatments, various physicochemical and mechanical tests such as attenuated total reflectance Fourier transform infrared spectroscopy (ATR-FTIR) were performed to investigate the chemical changes of the surface, colorimetry to evaluate the visual and color changes of the surface, roughness to measure the changes in surface morphology, and abrasion resistance testing to investigate the mechanical durability of the coatings on coated and uncoated surfaces.

Results: The results of the study showed that plasma pretreatment increased the roughness of the wood surface, although it did not have a significant effect on the color factors of the surface. The main changes in the color components of the wood surface were affected by the type of coating, and colored polyurethane showed the greatest effect in this regard. Also, the roughness on colored coatings was somewhat higher than on clear coatings. In terms of mechanical properties, plasma pretreatment reduced the wear coefficient in all polyurethane coatings on beech wood, which indicates improved wear resistance and increased durability of the coating. The ATR-FTIR spectroscopy results also confirmed the chemical changes of the pretreated wood surface and the successful presence of the polyurethane coating.

Conclusion: Overall, plasma pretreatment at optimal time and conditions increased the durability of both types of polyurethane coatings (clear and colored) by modifying the wood surface morphology without negatively affecting the aesthetic properties. Since the pigments present in colored polyurethane and the aesthetic importance of clear coatings are combined with the synergistic effect of plasma technology, the potential for the application of these coatings in interior and exterior applications such as flooring, outdoor furniture, and decorative and ornamental industries is significantly increased.

Cite this article: Tupa, A., Gholamiyan, H., Mastouri, A., Saleh Rostami, M., Abbaszadeh, R. (2026). Effect of dielectric barrier discharge plasma treatment on the performance of clear and pigmented polyurethane coatings on wood surfaces. *Journal of Forest and Wood Products*, 79 (2), 189-202. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2026.415736.1395>





دانشگاه تهران

نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب

سایت نشریه: <https://jfwf.ut.ac.ir>

شاپا الکترونیکی: ۰۵۳۰-۳۳۸۳

بررسی تأثیر پلاسمای تخلیه مانع دی‌الکتریک

بر عملکرد پوشش‌های پلی‌یورتان شفاف و رنگدانه‌دار روی سطوح چوبی

افسانه توپا^۱ | هادی غلامیان^{۲*} | اکبر مستوری^۳ | محمد صالح رستمی^۴ | روزبه عباس‌زاده^۵

۱. گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: afsaneh.topa@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، ایران. رایانامه: hadi_gholamiyan@ut.ac.ir
۳. گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، ایران. رایانامه: mastouri_akbar@ut.ac.ir
۴. مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی - وزارت جهاد کشاورزی، ایران. رایانامه: s.rostami@areeo.ac.ir
۵. سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران. رایانامه: abbasazadeh@irost.org

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۲۳

کلیدواژه:

پیش‌ تیمار پلاسما (DBD)،

پلی‌اورتان شفاف،

پلی‌اورتان رنگی (سفید)،

چوب راش،

ضریب سایش.

مقدمه: پوشش‌دهی سطح چوب معمولاً به منظور بهبود خواص ظاهری، ارتقای عملکرد سطحی و در نتیجه افزایش طول عمر سازه‌های چوبی انجام می‌شود. با این حال، مسئله اصلی این است که اغلب پوشش‌ها پس از قرار گرفتن در معرض رطوبت و شرایط محل مصرف، از سطح چوب جدا شده و موجب کاهش خواص فیزیکی و مکانیکی سازه می‌شوند. هدف اصلی این تحقیق، اصلاح سطح چوب با استفاده از فناوری نوین پلاسما است؛ به گونه‌ای که دوام پوشش‌های محافظتی برای کاربردهای داخلی و خارجی افزایش یابد و از جداسازی زود هنگام آنها جلوگیری شود.

روش پژوهش: در این پژوهش از دو نوع پوشش محافظتی پلی‌یورتان شفاف و رنگی (سفید) برای پوشش سطح چوب استفاده شد. سطوح چوب راش (*Fagus sylvatica*) پیش از پوشش‌دهی، با کمک پیش‌ تیمار پلاسمای تخلیه مانع دی‌الکتریک (DBD) در محیط گاز نیتروژن و در زمان‌های مختلف ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۲۴۰ ثانیه تیمار شدند. پس از اعمال تیمارها، آزمون‌های مختلف فیزیکوشیمیایی و مکانیکی مانند طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه با بازتاب کلی تضعیف‌شده (ATR-FTIR) برای بررسی تغییرات شیمیایی سطح، رنگسنجی برای ارزیابی تغییرات بصری و رنگی سطح، زیربینجی برای اندازه‌گیری تغییرات مورفولوژی سطح و آزمون مقاومت سایشی برای بررسی دوام مکانیکی پوشش‌ها روی سطوح پوشش‌داده‌شده و پوشش‌نخورده انجام گرفت.

یافته‌ها: نتایج پژوهش نشان داد که پیش‌ تیمار پلاسما باعث افزایش زبری سطح چوب می‌شود، هرچند تأثیر چشمگیری بر عوامل رنگی سطح نداشته است. عمده‌ترین تغییرات در مؤلفه‌های رنگی سطح چوب متأثر از نوع پوشش بود و پلی‌یورتان رنگی بیشترین تأثیر را در این زمینه نشان داد. همچنین میزان زبری روی پوشش‌های رنگی تا حدودی بیشتر از پوشش شفاف بود. از نظر خواص مکانیکی، اعمال پیش‌ تیمار پلاسما موجب کاهش ضریب سایش در تمام پوشش‌های پلی‌یورتانی روی چوب راش شد که نشان‌دهنده بهبود مقاومت در برابر سایش و افزایش دوام پوشش است. نتایج طیف‌سنجی ATR-FTIR نیز تغییرات شیمیایی سطح چوب پیش‌ تیمار شده و حضور موفق پوشش پلی‌یورتان را تأیید کرد.

نتیجه‌گیری: در مجموع، پیش‌ تیمار پلاسما در زمان و شرایط بهینه، با اصلاح مورفولوژی سطح چوب و بدون تأثیر منفی بر خواص زیبایی‌شناختی، موجب افزایش دوام هر دو نوع پوشش پلی‌یورتان (شفاف و رنگی) شد. از آنجا که رنگدانه‌های موجود در پلی‌یورتان رنگی و اهمیت زیبایی‌شناختی پوشش‌های شفاف با اثر هم‌افزای فناوری پلاسما ترکیب می‌شوند، پتانسیل کاربرد این پوشش‌ها در مصارف داخلی و خارجی مانند کفپوش‌ها، مبلمان فضای بیرونی و صنایع دکوراتیو و تزئینی به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد.

استناد: توپا؛ افسانه، غلامیان؛ هادی، مستوری؛ اکبر، رستمی؛ محمد صالح، عباس‌زاده؛ روزبه (۱۴۰۵). بررسی تأثیر پلاسمای تخلیه مانع دی‌الکتریک بر عملکرد پوشش‌های پلی‌یورتان شفاف و

رنگدانه‌دار روی سطوح چوبی. نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب، ۷۹ (۲)، ۱۸۹-۲۰۲. DOI: <https://10.22059/jfwf.2026.415736.1395>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

<https://doi.org/10.22059/jfwf.2026.415736.1395>



۱. مقدمه

چوب یک ماده طبیعی و تجدیدپذیر است که به دلیل ماهیت زیبا شناختی و مهندسی خود از سالیان دور جهت ساخت مبلمان، پارکت، ابزار آلات و غیره مورد توجه بوده است و می‌تواند جایگزین عناصری مانند فولاد و بتن شود [۱]. با این وجود، سطوح محصولات چوبی در کاربردهای داخلی و خارجی غالباً در معرض انواع تنش‌های رطوبتی، مکانیکی و کهنگی قرار می‌گیرند [۲]. اگرچه با به‌کارگیری برخی گونه‌های بادوام می‌توان به افزایش طول عمر محصولات چوبی در شرایط پر مخاطره کمک کرد؛ اما عدم دسترس‌پذیری یا موضوع اقتصادی این گونه‌ها اهمیت به‌کارگیری روش‌های حفاظتی برای به‌کارگیری چوب‌های کم دوام را دو چندان می‌کند. در بسیاری از کاربردها، مقاومت در برابر سایش، از خواص فوق‌العاده مهم چوب و سازه‌های چوبی است. آزمون مقاومت به سایش، روشی است که به‌طور گسترده جهت اندازه‌گیری مقاومت کفپوش‌های چوبی و سایر مواد پانل چوبی استفاده می‌شود. مقاومت در برابر سایش در درجه اول تحت تأثیر دانسیته، آناتومی و ویژگی‌های سطح چوب قرار می‌گیرند [۳].

یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای افزایش عمر مفید سازه‌های چوب در شرایط محل مصرف، استفاده از انواع پوشش‌های آلی، معدنی، یا فلزی [۲] می‌باشد که لایه محافظی را در سطح چوب ایجاد می‌کنند. هدف از پوشش‌دهی سطوح چوبی علاوه بر بهبود زیبایی ظاهری آن، کاهش تخریب فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی آن است [۴، ۵]. تاریخچه استفاده پوشش در صنعت چوب و مبلمان نشان می‌دهد که به‌ترتیب پوشش‌های مومی، انواع روغن‌ها، انواع لاک‌ها، نظیر لاک و الکل و سپس پوشش‌های نیتروسلولزی، آلکیداها و اکریلیک‌ها، بیشترین میزان مصرف را در صنایع چوب و سازه‌های چوبی داشته است؛ ولی به دلیل مشکلات محیط‌زیستی یا پایداری ضعیف آنها، از پوشش مقاومت‌تر پلی‌یورتان در پوشش‌دهی سطح چوب استفاده می‌شود [۶]. پلی‌یورتان‌ها براساس ویژگی‌های شفافیت و پوشش‌دهی به دو دسته اصلی تقسیم می‌شود: (۱) پلی‌یورتان شفاف (T) که از واکنش ایزوسیانات (مانند دیفنیل متان دی‌ایزوسیانات یا تولوئن دی‌ایزوسیانات) با یک پلی‌ال (مانند پلی‌اتر، پلی‌استر با وزن مولکولی کم یا پلی‌کربنات) تولید می‌شود. (۲) پلی‌یورتان رنگی (C، سفید) که از واکنش ایزوسیانات‌ها با پلی‌ال‌هایی با وزن مولکولی کم و ساختارهای پیچیده‌تر (پلی‌استر، پلی‌اتر) تشکیل می‌شوند. این نوع پلی‌یورتان‌ها می‌توانند دارای پیوند عرضی باشند که باعث ایجاد مقاومت بیشتری در برابر سایش و آسیب‌های مکانیکی می‌شود [۶].

در میان روش‌های مختلف اصلاح سطح چوب، تیمار پلاسما به‌طور گسترده در دهه اخیر مورد استفاده قرار گرفته است [۷]؛ زیرا در مقایسه با سایر تیمارها، دارای مزایایی مانند حذف حلال و سازگاری با محیط‌زیست، زمان تیمار بسیار کوتاه، مناسب برای سطوح حساس به حرارت، قابل استفاده برای سطوح مواد مرکب چوبی، مقرون به صرفه و عدم نیاز به خشک کردن بیشتر مواد پس از پردازش و ایمنی می‌باشد [۸، ۹]. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که فناوری پلاسما در برخی کاربردها نسبت به روش‌های موجود، برتری دارد. در واقع، در یک درجه حرارت مطلق و غیرصفر، هر گازی دارای تعدادی اتم یونیزه شده است که به‌صورت یون‌های مثبت و منفی وجود دارند. ذرات باردار موجود در گازها، غلظت این یون‌ها را به حدی می‌رسانند که حرکت آنها را محدود نمایند. با افزایش غلظت یون‌ها، این محدودیت‌ها افزایش می‌یابد و در غلظت‌های به حد کافی بالا، برهمکنش میان ذرات باردار مثبت و منفی در درون گازها که از نظر الکتریکی، خنثی هستند، حجم ماکروسکوپیک پدید می‌آورند. گازی که در چنین غلظتی، یونیزه شده است، پلاسما نام دارد. بسته به درجه یونیزاسیون و انرژی داخلی سیستم، پلاسما را سرد و گرم می‌نامند. پلاسماهای داغ در دماهای بالا وجود داشته و دارای انرژی زیادی هستند. دمای الکترون در این نوع پلاسما ۱۰۰۰۰۰ درجه کلوین می‌باشد. چنین پلاسمایی را می‌توان توسط قوس‌های جوی، جرقه و شعله تولید کرد [۱۰]. در این پلاسما، دمای یون و اتم، یکسان است. پلاسمای سرد آمیزه‌ای از الکترون‌ها، یون‌های مثبت و منفی، اتم‌ها و مولکول‌های گاز خنثی، رادیکال‌های آزاد، اجزاء برانگیخته و فتون‌ها است. در یک پلاسمای سرد اجزاء اتمی، مولکولی و یونی دارای دماهای معمولی (دمای اتاق) بوده ولی دمای الکترون‌ها بسیار بیشتر از حد طبیعی (۳۰۰۰-۲۰۰۰ درجه کلوین) است [۱۱]. از آنجاکه پلاسما از تخلیه بار الکتریکی بین دو الکترود در محیطی انباشته از گاز به‌دست می‌آید، نوع و فشار گاز در آن، حائز اهمیت است. به‌عنوان مثال استفاده از گازهای غیرآلی باعث افزایش قطبیت سطح و در نتیجه نم‌پذیری می‌شوند. علت این موضوع واکنش‌های اکسیداسیونی است که منجر به تشکیل گروه‌های هیدروکسیل، کربوکسیل، آلدهید و دیگر گروه‌های قطبی در سطح چوب می‌شوند [۱۲]. از طرفی گروه‌های غیرقطبی مانند C-C و C=H در سطح چوب کاهش یافته و در نتیجه نم‌پذیری سطح و نفوذ چوب نسبت به مایعات افزایش می‌یابد [۱۳]. از طرفی، استفاده

از گازهای هیدروکربنی، به دلیل از بین رفتن مواد استخراجی (پاک‌سازی سطح) و لایه‌های مرزی ضعیف، نپذیری را کاهش داده و باعث آب‌گریز شدن سطح چوب می‌شوند [۱۴].

تاکنون مطالعات زیادی در خصوص اصلاح ویژگی‌های سطح چوب با استفاده از تیمار پلاسما انجام شده است. اما هدف از این مطالعه ارزیابی شرایط پلاسما (زمان پیش تیمار) بر خصوصیات سطحی و ظاهری چوب و به‌ویژه عملکرد پوشش‌ها در شرایط سایش است. بنابراین، پوشش‌های شفاف و رنگی متأثر از پیش تیمار پلاسما به‌طور مقایسه‌ای برای کاربردهای داخلی محصولات چوبی مورد هدف بوده که این موارد در تحقیقات کمتر مورد توجه بوده است.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. آماده‌سازی نمونه‌ها

گونه چوب مورد استفاده در این تحقیق، بخش چوب‌برون راش (*Fagus sylvatica*) بود. طبق مطالعه سوابق تحقیق، نمونه‌های چوبی با ابعاد $10 \times 10 \times 2$ میلی‌متر مکعب (مماسی×شعاعی×طول) تهیه و با استفاده از سنباده درجه ۱۲۰ و سپس ۲۲۰ پرداخت شدند. قبل از پوشش‌دهی تعدادی نمونه تحت شرایط پلاسما پیش تیمار شدند. قبل و بعد از پوشش‌دهی، نمونه‌ها در اتاق کلیما (رطوبت نسبی ۶۵ درصد و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد) به مدت ۳ هفته جهت متعادل‌سازی رطوبت قرار گرفتند.

۲-۲. شرح تیمارها

در جدول ۱ تیمارهای مختلف برحسب نوع، شرایط و سایر پارامترهای تجربی تیمار ارائه شده است. دو نوع پوشش پلی‌یورتان شفاف و پلی‌یورتان رنگی در این تحقیق استفاده شد که تنها تفاوت این دو پوشش در داشتن رنگدانه است (پوششی که همراه با رنگدانه است معروف به پلی‌یورتان رنگی (سفید) و پوششی که فاقد رنگدانه است معروف به پلی‌یورتان شفاف می‌باشد) (جدول ۲). تمام پوشش‌ها با ضخامت ۲۰۰ میکرومتر به وسیله یک فیلم‌کش و با سرعت حرکت ۱۰۰ میلی‌متر بر ثانیه روی چوب تیمار نشده و چوب تیمار پلاسما شده، اعمال شدند. سپس نمونه‌ها جهت خشک شدن و متعادل‌سازی رطوبت به مدت یک روز در دمای اتاق و ۲ هفته در اتاق کلیما قرار داده شدند.

جدول ۱. شرح تیمارهای انجام شده در این تحقیق

تیمار	نوع تیمار	کد
۱	چوب ماسیو	S
۲	پلاسما DBD ۳۰ ثانیه	P30
۳	پلاسما DBD ۶۰ ثانیه	P60
۴	پلی‌یورتان شفاف	T
۵	پلی‌یورتان رنگی	C
۶	پلاسما DBD ۱۲۰ ثانیه	P120
۷	پلاسما DBD ۲۴۰ ثانیه	P240
۸	پلاسما DBD ۳۰ ثانیه + پلی‌یورتان شفاف	TP30
۹	پلاسما DBD ۶۰ ثانیه + پلی‌یورتان شفاف	TP60
۱۰	پلاسما DBD ۱۲۰ ثانیه + پلی‌یورتان شفاف	TP120
۱۱	پلاسما DBD ۲۴۰ ثانیه + پلی‌یورتان شفاف	TP240
۱۲	پلاسما DBD ۳۰ ثانیه + پلی‌یورتان رنگی	CP30
۱۳	پلاسما DBD ۶۰ ثانیه + پلی‌یورتان رنگی	CP60
۱۴	پلاسما DBD ۱۲۰ ثانیه + پلی‌یورتان رنگی	CP120
۱۵	پلاسما DBD ۲۴۰ ثانیه + پلی‌یورتان رنگی	CP240

جدول ۲. مشخصات فنی عمومی، مشخصات فیزیکی‌شیمیایی و شاخص کنترلی: پلی‌یورتان مخصوص چوب (سیستم دو جزئی)

مشخصه فنی						
نوع رزین	گرانروی	درصد جامد	نسبت اختلاط	زمان خشک شدن سطحی/عمیق	تینر مناسب	براقیت
پلی‌یورتان دو جزئی (اکریلیک/ایزوسیانات)	۳۰ تا ۶۰ ثانیه (فنجان فورده ۴)	۳۵-۵۰ درصد	۲:۱ یا ۴:۱ (دستور سازنده)	۱۵ تا ۳۰ دقیقه / ۲۴ ساعت	تینر پلی‌اورتان مخصوص	مات (۰-۱۰)، براق (۸۰+)
نیاز به ترکیب با هاردنر (سخت‌کننده)	بسته به درصد اختلاط با تینر	تعیین‌کننده ضخامت لایه	رعایت نکردن و خشک نشدن	۲۵ درجه سانتی‌گراد / قابلیت سنباده‌زنی	تینر معمولی توصیه نمی‌شود	بر اساس سلیقه و کاربری
شاخص کنترلی						
مقدار NCO (در جزء B)	مقدار OH (در جزء A)	درصد جامد	ویسکوزیته (جزء A)	ضریب شکست (RI)		
استاندارد آزمایشگاهی: ۱۲ - ۲۳ درصد (بسته به نوع)	۳-۶ درصد (وزنی در جامد)	۴۰-۵۵ درصد	۱۰۰۰ - ۳۰۰۰ سانتی پوآز در ثانیه	۱/۴۸ - ۱/۵۲		
اهمیت برای کاربر نهایی: تعیین قدرت گیرش و سرعت خشک شدن	تعیین نسبت دقیق اختلاط با هاردنر	ضخامت فیلم پس از تبخیر حلال	سهولت پاشش و شره نکردن	شفافیت و عمق نهایی پوشش روی چوب		
پارامتر فنی						
دانسیته	عدد اسیدی	نقطه اشتعال	ضریب شکست	محتوای VOC		
محدوده استاندارد (واحد): (گرم بر سانتی‌متر مکعب) ۰/۹۵ تا ۱/۰۵	<۵ (میلی‌گرم پتاسیم - هیدروکسید بر گرم)	۲۱ تا ۲۸ درجه سانتی‌گراد	۱/۴۸ - ۱/۵۲	۴۵۰ - ۴۰۰ گرم بر لیتر		
اهمیت فنی: شاخص خلوص و وزن مخصوص رزین	نشان‌دهنده پایداری در برابر زردگرایی	ایمنی انبارداری و خطر آتش‌سوزی	شفافیت و عمق پوشش	استانداردهای زیست‌محیطی		

پیش تیمار پلاسما با استفاده از دستگاه DBD (تخلیه مانع دی‌الکتریک) متعلق به سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران در محیطی از گاز نیتروژن (گاز حامل)، فرکانس ۶۰ کیلوهرتز، طول پالس ۵-۱۰ میکروثانیه، شدت جریان ۷۰-۵۵ لیتر بر دقیقه، ولتاژ ۱۵ کیلوولت، دمای حدود ۷۰ درجه سانتی‌گراد، فاصله ۳ سانتی‌متر به مدت ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۲۴۰ ثانیه اجرا شد. در پلاسما DBD، دو الکترود (آلومینیوم، مس) در تماس با گاز قرار گرفتند اما بین آنها یک لایه عایق دی‌الکتریک (شیشه، سرامیک یا پلاستیک) قرار گرفت. گاز شیمیایی مورد استفاده، نیتروژن (N_2) بود. این لایه به گونه‌ای عمل کرد که زمانی که ولتاژ بالا به الکترودها اعمال شد منجر به تبدیل گاز به پلاسما شد؛ همچنین از جرقه‌های الکتریکی مستقیم جلوگیری کرد.

۲-۳. ارزیابی خواص

۲-۳-۱. طیف‌سنجی مادون قرمز انعکاسی (ATR-FTIR)^۱

جهت شناسایی گروه‌های عاملی و پیوندهای موجود در مولکول‌های سطح چوب، از طیف‌سنجی مادون قرمز انعکاسی استفاده شد. آزمون طیف‌سنجی در دامنه عدد موجی ۴۰۰-۴۰۰۰ سانتی‌متر معکوس و با ۶۴ اسکن بر روی نمونه‌های از قبل خشک شده، انجام شد.

۲-۳-۲. رنگ سنجی

به‌منظور بررسی شدت تغییرات رنگ سطوح تیمارهای پلاسما و پوشش داده شده از دستگاه رنگ‌سنجی مدل NRF110 استفاده شد (شکل ۱). ۳ فاکتور a^* (قرمزی)، b^* (زردی) و L^* (روشنایی) نمونه شاهد و قبل و بعد تیمارهای پلاسما و پوشش داده شده اندازه‌گیری شده است.

^۱ Attenuated total reflectance-Fourier transform infrared spectroscopy



شکل ۱. دستگاه رنگ‌سنجی مدل NRF110

۲-۳-۳. زبری سطح

به‌منظور بررسی کیفیت زبری نمونه‌ها قبل و بعد از سطوح تیمار پلاسمایی شده و پوشش داده شده از دستگاه زبری‌سنج مدل SJ-201P استفاده شد (شکل ۲).

۲-۳-۴. مقاومت به سایش

آزمون مقاومت سایشی طبق استاندارد ASTM D4060 توسط دستگاه سایش چرخان انجام شد (شکل ۳). این دستگاه دارای چرخ‌های ساینده با وزن ۵۰۰ گرم است که ۲۵۰ دور بر روی نمونه‌ها ساییده شدند. ضریب سایش (I) هر نمونه طبق رابطه ۱ محاسبه شد.

$$I = \frac{a-b \times 1000}{c}$$

رابطه ۱

که در آن a : وزن نمونه قبل از سایش (گرم)، b : وزن نمونه بعد از سایش (گرم) و c : تعداد چرخه‌های سایش است.



شکل ۳. دستگاه سایش چرخان مدل ۵۱۳۵



شکل ۲. دستگاه زبری‌سنج مدل SJ-201P

۲-۴. آنالیز آماری

تحلیل آماری انواع تیمارهای سطح در ۳ تکرار، با استفاده از آنالیز واریانس یک‌طرفه (ANOVA) در نرم‌افزار SPSS انجام شد. همچنین، گروه‌بندی داده‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن با حروف لاتین در سطح اطمینان ۹۵ درصد تعیین شد. انحراف معیار به‌عنوان اطمینان اندازه‌گیری‌ها به‌صورت میله خط در گزارش داده‌ها تنظیم شد.

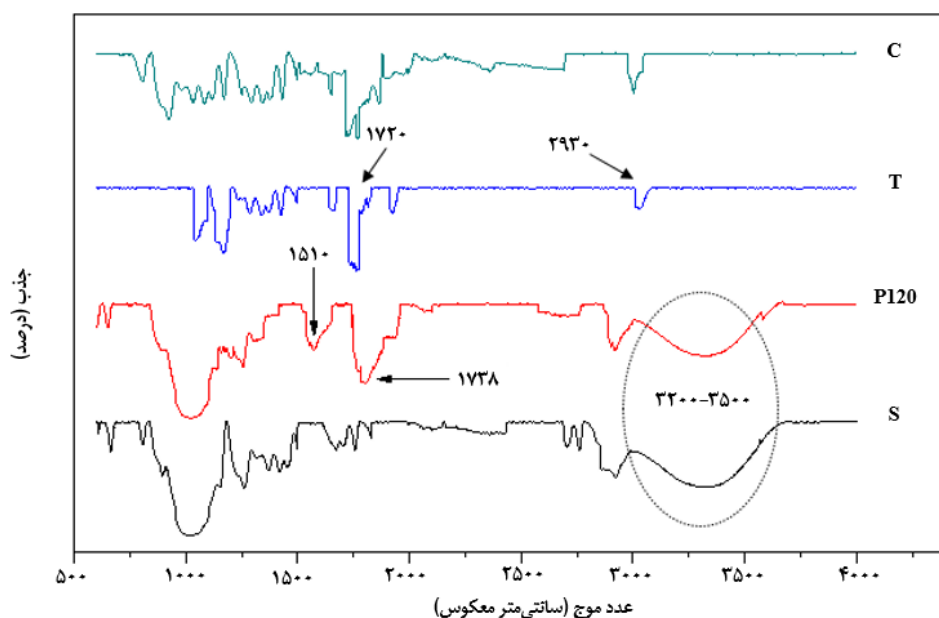
۳. یافته‌های پژوهش و بحث

۳-۱. طیف‌سنجی مادون قرمز انعکاسی (ATR-FTIR)

در شکل ۴ نتایج حاصل از طیف‌سنجی مادون قرمز نمونه‌های S، C، T و P120 نمایش داده شده است. تغییرات شیمیایی قابل توجهی برای چوب راش بعد از پیش تیمار پلاسما (P120) مشاهده شد. خلاصه پیک‌ها و تغییرات مشاهده شده در آزمون طیف‌سنجی مربوط به چوب پیش تیمار شده و انواع پوشش‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است. پیک‌های ۱۷۲۰ و ۲۹۳۰ سانتی‌متر معکوس در نمونه‌های پوشش خورده وجود گروه‌های یورتانی (N-H) را تأیید کردند. تفاوت جذبی در پیک کربونیل (~ 1720 سانتی‌متر معکوس) برای انواع پوشش‌ها نیز می‌تواند ناشی از ضخامت متغیر فیلم یا درصد جامد مختلف پوشش‌های پلی‌یورتان سفید یا شفاف باشد. افزایش جذب در باند ۱۷۳۸ سانتی‌متر معکوس برای چوب بدون پوشش پیش تیمار شده با پلاسما، احتمالاً حاکی از بهبود دسترس‌پذیری و واکنش-پذیری همی‌سلولزها و همچنین تغییرات شیمیایی سطح چوب است. علاوه بر این، حذف یا کاهش باند ۱۷۲۰ سانتی‌متر معکوس چوب پیش تیمار پلاسما به کاهش یا پاک‌سازی سطح از مواد رسوبی (لیگنین) اشاره دارد [۳۰].

جدول ۳. باندهای جذبی مربوط به چوب و انواع پوشش‌ها با آزمون طیف سنجی ATR-FTIR

پیک (سانتی‌متر معکوس)	مشخصه مولکولی و گروه‌های عاملی	منابع
۳۲۰۰-۳۵۰۰	ارتعاش کششی گروه‌های هیدروکسیل (-OH) ناشی از پیوندهای هیدروژنی درون مولکولی و بین مولکولی	[۱۵، ۵]
۱۷۲۰-۱۷۴۰	گروه‌های کربونیل (C=O) در ساختار چوب (همی‌سلولز، لیگنین) و گروه یورتان	[۲۹، ۱۷]
۲۹۳۰	کشش N-H در ساختار پلی‌یورتان	[۲۹]
۱۵۰۵-۱۵۲۰	ارتعاش خمشی N-H (Amide II) در ساختار پلی‌یورتان و همچنین ارتعاش کششی در گروه‌های C=C مربوط به ساختار آروماتیک لیگنین	[۲۹، ۱۷]

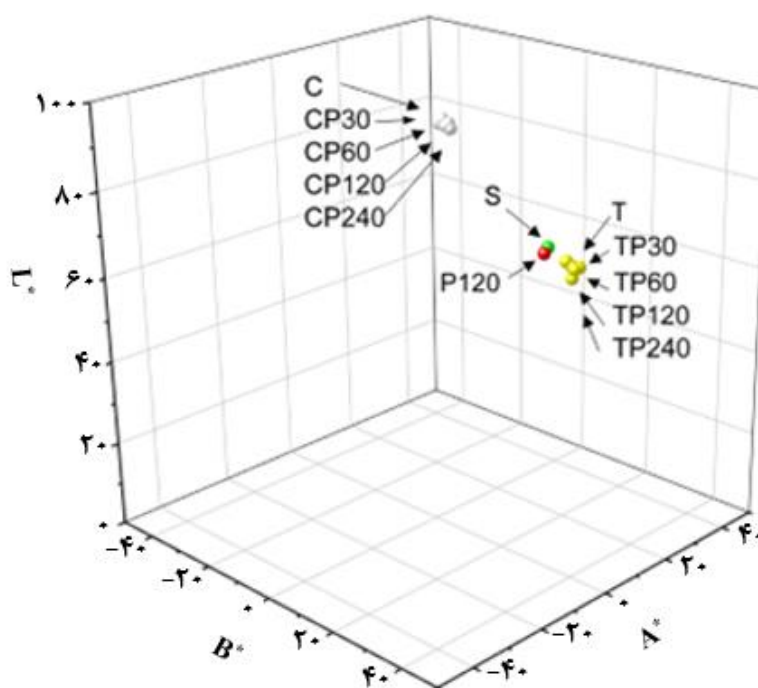


شکل ۴. طیف‌سنجی ATR-FTIR از نمونه‌های چوب ماسیو، پلی‌یورتان شفاف، پلی‌یورتان رنگی و پلاسمای DBD شده

۳-۲. رنگ‌سنجی

شکل ۵ تحلیل سه‌بعدی مختصات رنگی در تمام نمونه‌های تیمار شده را نشان می‌دهد. نمونه S و P120 در فاصله کمی از یکدیگر قرار گرفتند که نشان‌دهنده تغییر محدود مختصات رنگی در اثر تیمار پلاسما است [۱۹]. نمونه T و نمونه‌های TP30، TP60،

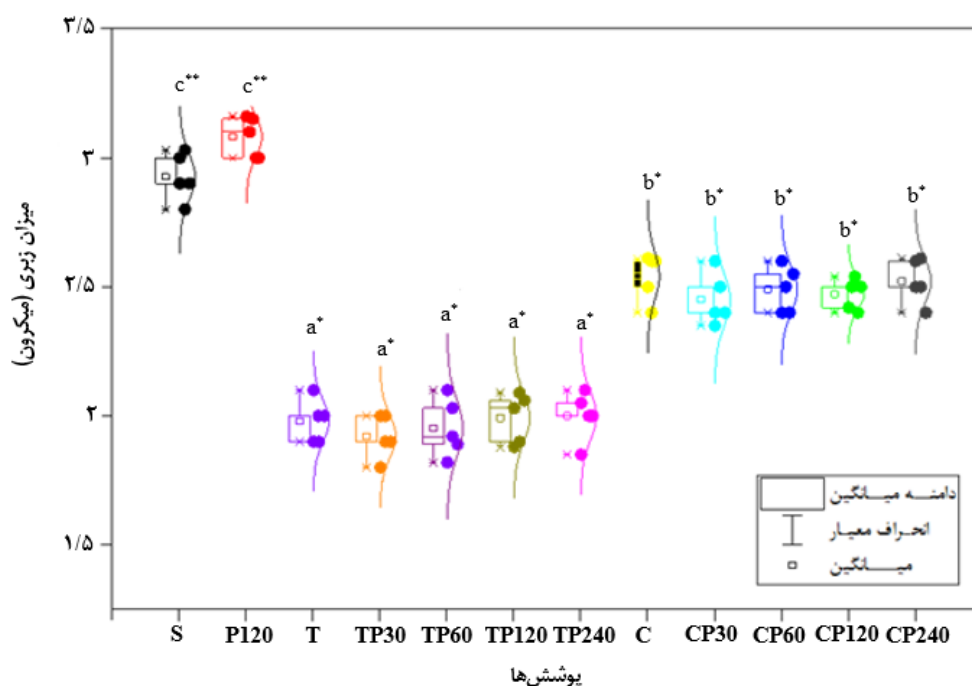
TP240 و TP120 خوشه‌ای مجزا ولی نزدیک به S تشکیل دادند. افزایش جزئی در b^* و تغییر محدود در a^* دیده شده است [۱۶]. همچنین، تیمار پلاسما باعث بهبود ترشوندگی و یکنواختی فیلم شده اما جابجایی فضایی نقاط TP نسبت به T بسیار محدود است [۲۲]. در نمودار سه‌بعدی، نمونه‌های C و نمونه‌های CP30، CP60، CP120 و CP240 به‌طور واضح در ناحیه‌ای مجزا با مقدار L^* بسیار بالاتر قرار گرفتند. نزدیکی نقاط CP به C نشان می‌دهد که تیمار پلاسما نیتروژن حتی در زمان‌های مختلف (۳۰ تا ۲۴۰ ثانیه) تأثیر قابل‌توجهی بر مختصات رنگی پوشش پلی‌یورتان رنگی ندارد [۲۳]. تیمار پلاسما نیتروژن در مدت زمان‌های مختلف، تأثیر معنی‌داری بر مؤلفه قرمزی و زردی و روشنایی رنگ چوب نداشت. تیمار پلاسما نیتروژن می‌تواند با ایجاد گروه‌های فعال و اصلاح سطح لیگنین، موجب تشکیل گروه‌های کربونیل و عوامل رنگ‌ساز جدید شود که اندکی زردی سطح را افزایش می‌دهد. این تغییرات معمولاً محدود و سطحی هستند و منجر به تغییرات ملایم رنگ می‌شوند [۱۹]. پوشش‌های پلی‌یورتان شفاف به‌دلیل شفافیت نوری بالا و عدم وجود رنگدانه، تغییر محسوس در مؤلفه رنگی a^* ایجاد نمی‌کنند و عمدتاً نقش حفاظتی دارند [۲۰]. کاهش مقدار a^* در این نمونه‌ها می‌تواند ناشی از ماهیت شیمیایی یا حضور افزودنی‌ها/رنگدانه‌ها در پلی‌یورتان رنگی باشد که باعث کاهش شدت ته‌رنگ قرمز چوب می‌شود. همچنین لایه پوششی ضخیم‌تر می‌تواند اثر رنگ طبیعی بستر چوب را تعدیل کند [۲۱]. از این جهت پوشش پلی‌یورتان رنگی، بیشترین تغییرات را در مؤلفه‌های رنگی چوب ایجاد می‌کنند. در پوشش‌های رنگدانه‌دار رنگی، نور به‌جای عبور از فیلم و بازتاب از بستر چوب، توسط ذرات رنگدانه پراکنده و جذب می‌شود. این پراکندگی موجب کاهش شدت زردی مشاهده‌شده و کاهش مقدار b^* می‌شود. تیمار پلاسما نیتروژن در مدت ۱۲۰ ثانیه تأثیر قابل‌توجهی بر روشنایی کلی چوب ندارد. اگرچه پلاسما موجب اصلاح شیمیایی سطح و افزایش انرژی سطحی می‌شود، اما تغییرات رنگی آن معمولاً محدود به لایه‌ای بسیار نازک بوده و تغییر محسوس در L^* ایجاد نمی‌کند [۱۹]. در مقایسه با چوب ماسیو و پوشش شفاف، پوشش رنگی بیشترین مقدار L^* را در میان تمام نمونه‌ها نشان می‌دهد (حدود ۹۵-۹۰). این افزایش چشمگیر روشنایی نشان می‌دهد که پوشش احتمالاً حاوی رنگدانه‌های روشن (مانند دی‌اکسید تیتانیوم) یا فیلرهای بازتابنده نور است. در پوشش‌های رنگدانه‌دار، نور عمدتاً در سطح فیلم پراکنده و بازتاب می‌شود و بستر چوب تأثیر کمی در رنگ نهایی دارد. تیمار پلاسما پیش یا پس از اعمال پوشش پلی‌یورتان پوششی، تأثیر معنی‌داری بر روشنایی نهایی ندارد؛ زیرا عمدتاً ساختار و ترکیب پوشش نسبت به اصلاح سطح چوب رنگ ظاهری را بیشتر کنترل می‌کند [۲۳].



شکل ۵. مقدار a^* ، b^* و L^* انواع پوشش‌ها

۳-۳. زبری سنجی

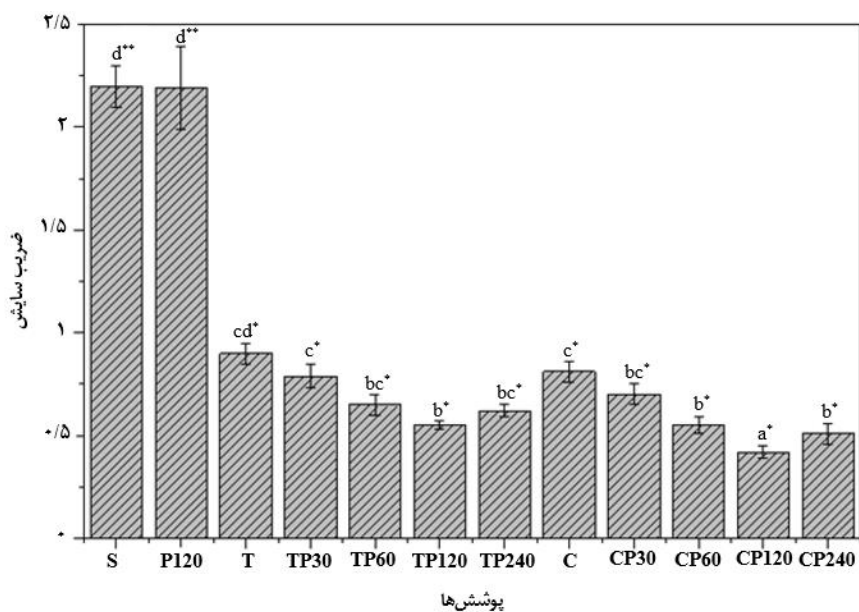
شکل ۶ میزان زبری سطح تمام نمونه ها را نشان می دهد. به طور کلی، نمونه های بدون پوشش بالاترین میزان زبری سطح را در مقایسه با نمونه های پوشش خورده نشان دادند. مقدار ضخامت پوشش ها روی چوب نیز با استریومیکروسکوپ حدوداً ۶۸ میکرومتر اندازه گیری شد. به این جهت، پوشش دهی باعث کاهش زبری چوب راش شد. اگرچه چوب S دارای زبری سطح نسبتاً بالا (در محدوده حدود ۲۹-۳۰ میکرومتر) است. در نمونه P120 یعنی چوب ماسیو پلاسمای دیده، افزایش معنی دار زبری سطح مشاهده می شود (گروه آماری C**). تأثیر پلاسمای در شرایط زمانی مختلف، تأثیری بر زبری سطح پوشش ها نداشت. یعنی در نمونه های دارای پوشش با پلی یورتان پوششی (CP30، CP60، CP120 و CP240) و T، اعمال پلاسمای موجب تغییرات زیادی در زبری سطح پوشش نشده است. در نمونه C زبری بالاتری نسبت به نمونه T مشاهده شد (گروه b*). در واقع پوشش های پوششی زبری بالاتری نسبت به پوشش شفاف داشتند. نمونه چوب ماسیو دارای زبری سطح نسبتاً بالا (در محدوده حدود ۲۹-۳۰ میکرومتر) است. این مقدار ناشی از ساختار آناتومیک چوب شامل آوندها، پره های چوبی و ناهمگنی دیواره سلولی است. پلاسمای نیتروژن پیوندهای سطحی را شکسته و موجب افزایش انرژی سطح و زبری می شود. اعمال پوشش پلی یورتان شفاف و پوششی موجب کاهش قابل توجه زبری سطح چوب راش شد. این کاهش به دلیل تشکیل فیلم پلیمری یکنواخت است که ناهمواری های سطح چوب را پر کرده و سطحی هموارتر ایجاد می کند. پلی یورتان ها به دلیل ویسکوزیته مناسب و قابلیت فیلم سازی بالا، می توانند خلل و فرج سطح چوب را پوشش دهند و زبری میانگین (Ra) را کاهش دهند [۲۳]. با افزایش زمان تیمار، زبری پوشش اعمال شده بیشتر می شود که ناشی از نفوذ بیشتر پوشش مایع پلیمری و شاید تشکیل فیلم پلی یورتان کمتر و ایجاد ریزحفرات و ساختارهای میکرو-نانو است. پلاسمای نیتروژن می تواند پیوندهای سطحی پلی یورتان را اصلاح کرده و با ایجاد زبری کنترل شده، چسبندگی لایه های بعدی یا خواص ترشوندگی را بهبود دهد [۱۸]. نمونه C زبری بالاتری نسبت به نمونه T دارد که این موضوع می تواند ناشی از درصد جامد بالاتر، حضور رنگدانه ها و فیلرهای پوشش پلی یورتان رنگی باشد. وجود ذرات رنگدانه و افزودنی ها معمولاً باعث افزایش میکروتوپوگرافی سطح می شود و در نتیجه Ra افزایش می یابد [۲۴]. افزایش زمان پلاسمای موجب رشد تدریجی Ra شده که نشان دهنده اثر تجمعی فرسایش سطحی است. در پوشش های حاوی رنگدانه، پلاسمای می تواند ماتریس پلیمری اطراف ذرات را برداشت کرده و برجستگی ذرات را افزایش دهد که به افزایش زبری منجر می شود.



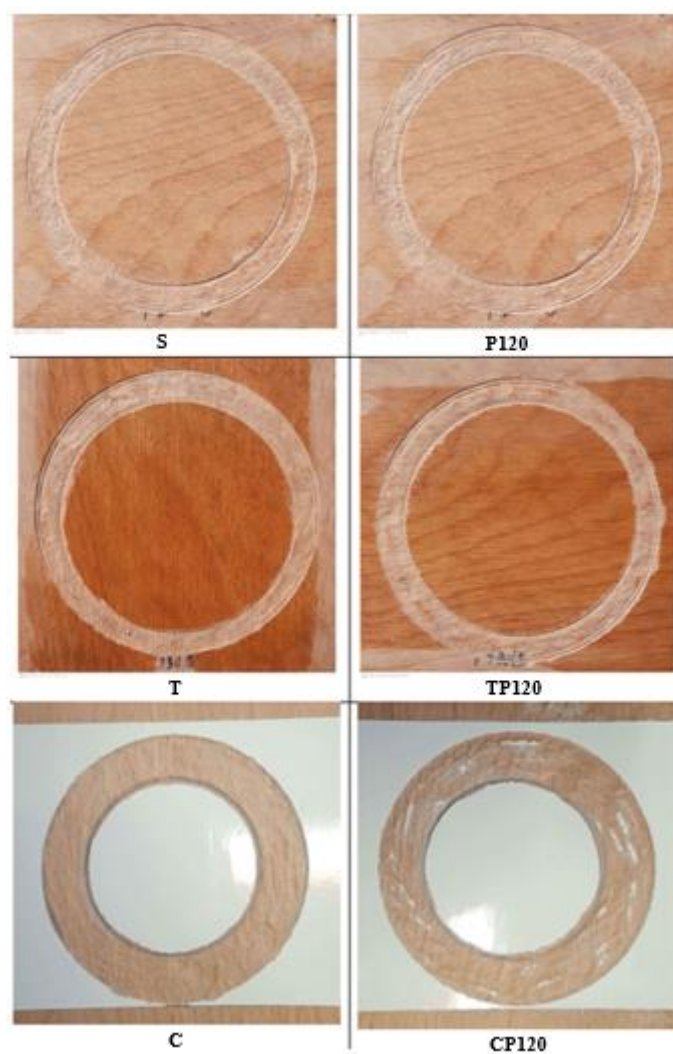
شکل ۶. زبری سطح نمونه های خام و پوشش داده شده

۳-۴. مقاومت سایشی

شکل ۷ مقاومت سایشی تمام نمونه‌ها را به شکل ضریب سایش نشان می‌دهد. بیشترین سایش مربوط به نمونه‌های S و P120 بود که در گروه آماری d قرار گرفتند. اعمال هر دو نوع پوشش باعث کاهش چشمگیر و معنی‌دار ضریب سایش چوب ماسیو شد. در نمونه‌های TP30 تا TP240 با افزایش زمان تیمار پلاسما از ۳۰ تا ۱۲۰ ثانیه، روند کاهش میزان سایش مشاهده شد و نمونه TP120 کمترین مقدار را در این گروه نشان داد (گروه b). در TP240 افزایش نسبی سایش مشاهده شد و نمونه C نسبت به T مقاومت سایشی بهتری نشان داد (گروه c). در نمونه‌های CP30 تا CP240 کاهش قابل توجه میزان سایش تا نمونه CP120 مشاهده شد که کمترین مقدار کل نمودار را نشان می‌دهد (گروه a). در CP240 افزایش جزئی نسبت به CP120 مشاهده شد. در شکل ۸، تصاویری هندسی و ظاهری سطوح بعد از آزمون سایش نشان داده شده است. تیمار پلاسما به‌تنهایی تأثیر قابل توجهی بر مقاومت سایشی چوب بدون پوشش ندارد. چوب به دلیل ساختار ناهمگن لیگنوسلولزی، تخلخل بالا و سختی نسبتاً پایین، مستعد تخریب سایشی است [۲۵]. با اعمال پوشش پلی‌یورتان، کاهش چشمگیر در ضریب سایش به دلیل تشکیل یک لایه پیوسته پلیمری با قابلیت جذب و توزیع تنش‌های مکانیکی رخ می‌دهد. پوشش پلی‌یورتان‌ها مات به دلیل ساختار رنگدانه‌شده مقاومت سایشی مناسبی از خود نشان می‌دهند [۱۶]. با افزایش زمان تیمار پلاسما، روند کاهش سایش مشاهده می‌شود که این رفتار بیانگر بهبود چسبندگی بین سطحی و افزایش انسجام فیلم است. بهبود چسبندگی باعث کاهش جداشدگی موضعی پوشش در حین آزمون سایش می‌شود. در TP240 افزایش نسبی سایش مشاهده می‌شود که احتمالاً ناشی از تخریب سطحی یا ایجاد تردی در اثر تیمار بیش از حد پلاسما است. در واقع پیش تیمار پلاسما به طبع بهبود نفوذ و جذب و افزایش اتصال‌پذیری پوشش با سطح چوب، ضریب سایش پوشش را کاهش می‌دهد. در نتیجه تیمار پلاسما با افزایش انرژی سطحی و ایجاد گروه‌های عاملی فعال، پیوند بین پوشش و زیرلایه را تقویت می‌کند، اما زمان‌های طولانی با فرسایش سطحی و تخریب مکانیکی ممکن است تأثیر منفی بر چسبندگی یا مقاومت سایشی داشته باشد. مطالعات نشان می‌دهد که بهبود چسبندگی بین سطحی منجر به افزایش مقاومت سایشی پوشش‌ها می‌شود، زیرا جداشدگی موضعی و ترک‌های ریز در مرز مشترک کاهش می‌یابد [۲۶]. نتایج حاصل از بررسی پارامتر سایش در چوب‌های تیمار شده بیانگر آن است که ویژگی‌های سطحی چوب به شدت تحت تأثیر نوع پوشش و تیمار پلاسما قرار می‌گیرد. مقدار سایش در نمونه S و P120 بیشترین میزان را نشان داد که بیانگر ضعف ذاتی چوب در برابر سایش مکانیکی و کارایی محدود پلاسما به صورت مستقل می‌باشد. فعال‌سازی سطح توسط پلاسما در این حالت، اگرچه منجر به افزایش گروه‌های قطبی OH- و COOH- می‌شود، اما نبود لایه محافظ منسجم (پوشش) موجب شد تا این اصلاح سطحی اثر محسوسی در مقاومت سایشی نداشته باشد. در نمونه‌های T و C کاهش قابل توجهی در مقادیر سایش مشاهده شد. این کاهش ناشی از ایجاد فیلم پلیمری با سختی مناسب بر سطح چوب و کاهش تماس مستقیم الیاف سلولزی با عامل ساینده است. تفاوت میان پوشش شفاف و رنگی را می‌توان به ضخامت و چگالی متفاوت شبکه پلی‌یورتانی نسبت داد؛ در پوشش‌های نوع پوششی شبکه پلیمری متراکم‌تر و سخت‌تر بوده و از این رو مقاومت به سایش بالاتری ایجاد کرده است. در نمونه‌های TP و CP تأثیرات هم‌افزایی مشهود است. تیمار پلاسما پیش از پوشش‌دهی سبب ایجاد فعالیت سطحی بالاتر، افزایش انرژی سطح، بهبود ترشوندگی و افزایش چسبندگی پوشش به بستر چوبی می‌شود. این اثر به‌ویژه در زمان‌های ۱۲۰ و ۲۴۰ ثانیه قابل ملاحظه است، جایی که نمونه‌های TP120، TP240، CP120 و CP240 مقاومت سایشی چشمگیرتری نسبت به سایر تیمارها نشان دادند. کمترین میزان سایش در نمونه CP120 مشاهده شد که به نظر می‌رسد زمان بهینه تیمار پلاسما برای افزایش پیوستگی بین چوب و پوشش پلی‌یورتان باشد. زمان‌های کوتاه‌تر (۳۰ و ۶۰ ثانیه) احتمالاً منجر به فعال‌سازی ناکافی سطح و زمان‌های طولانی‌تر (۲۴۰ ثانیه) ممکن است موجب تخریب جزئی ساختار سطحی و کاهش یکنواختی پیوند پوشش شوند. چنین رفتار زمانی در تیمارهای پلاسما در پژوهش‌های پیشین نیز گزارش شده است [۲۷]. تیمار CP120 به عنوان شرایط بهینه برای کسب بالاترین مقاومت سایشی شناخته می‌شود. این نتیجه با مطالعات منتشر شده توسط Bahrami و همکاران (۲۰۲۰) نیز همخوانی دارد، که در آن بهبود قابل توجه خواص مکانیکی و مقاومت سطحی چوب با پوشش پلی‌یورتان گزارش شده است [۲۸]. در پژوهشی دیگر نیز ذکر شده است که پیش تیمار سطح چوب با پلاسما بدون تأثیر قابل توجهی بر ظاهر پوشش، موجب چربی‌زدایی و پاک‌سازی سطح شده و متعاقباً عملکرد پوشش روی چوب بهبود می‌یابد [۳۰].



شکل ۷. ضریب سایش نمونه‌های خام و پوشش داده شده



شکل ۸. شکل ظاهری نمونه‌ها بعد از آزمون سایش چرخان

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق از پلاسمای DBD که یک پلاسمای سرد است و برخلاف پلاسمای گرم، خورنده نیست، استفاده شد. اصلاح سطحی توسط پلاسمای نیتروژن بدون تخریب ظاهری یا تغییر محسوس رنگ انجام شد. پلاسمای به‌تنهایی نمی‌تواند چوب را در برابر سایش مقاوم کند، اما وقتی همراه با پوشش باشد عملکرد بسیار بهتری دارد. پوشش پلی‌یورتان رنگی عملکرد بهتری نسبت به پوشش شفاف دارد. کمترین سایش یا بالاترین مقاومت سایشی مربوط به تیمارهای CP120 و CP240 بود. این تیمارها نشان می‌دهند که پلاسمای در کنار یک پوشش ضخیم پلی‌یورتانی بیشترین مقاومت در برابر سایش را ایجاد می‌کند. بنابراین، بهترین تیمار با مقاومت بالایی سایشی در کل آزمایش، CP120 بود و می‌تواند به‌عنوان مناسب‌ترین روش برای کاربردهایی که نیاز به مقاومت سایشی بالایی دارند، توصیه شود. اثر تیمار پلاسمای بر ویژگی‌های رنگی چوب غیر معنی‌دار بوده و نوع پوشش، یعنی پوشش پلی‌یورتان رنگی رنگدانه‌دار، تأثیر بارزتری بر تغییرات رنگی چوب داشت. پوشش پلی‌یورتان رنگی زبری سطح بیشتری نسبت به پوشش پلی‌یورتان شفاف داشت ولی شرایط پلاسمای تأثیر زیادی بر زبری سطح دو نوع پوشش چوب نداشت. پوشش پلی‌یورتان رنگی عملکرد مکانیکی بهتری نسبت به پلی‌یورتان شفاف نشان داد. بنابراین، اصلاح سطح روشی مؤثر برای افزایش مقاومت سایشی سیستم‌های پوششی چوبی است. با این وجود، پوشش‌های شفاف نیز از اهمیت بالایی زیبا شناختی برخوردار هستند، که قابلیت آنها در کاربردهای تزئینی یا داخلی بارزتر است. از این رو، یافته‌ها نشان می‌دهد که ترکیب پیش اصلاح سطح با فناوری پلاسمای و پوشش پلی‌یورتان می‌تواند راهکار مؤثری برای افزایش مقاومت سایشی و دوام سطحی چوب در کاربردهای نظیر کف‌پوش، مبلمان فضای بیرونی و صنایع تزئینی باشد. به‌منظور بررسی دقیق‌تر پیشنهاد می‌شود که گازهای دیگر پلاسمای و همچنین تأثیر نوع گونه چوبی نیز در تحقیقات آتی بررسی شود.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش: نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید است.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حمایت مالی

حمایت از این پژوهش از طرف دانشگاه تهران، دانشکده منابع طبیعی در قالب پژوهانه پایان‌نامه دانشجویی انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: دانشجو: اندازه‌گیری‌های میدانی، گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج. نویسنده دوم: استاد راهنمای پایان‌نامه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، نگارش، اصلاح و نهایی‌سازی مقاله. نویسندگان سوم، چهارم و پنجم: اساتید مشاور پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش و مطالعه مقاله.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

References

- [1] Nath, S.K. (2017). Use Wood—Combat Climate Change. In Wood is good: Current trends and future prospects in wood utilization (pp. 469-478). Springer Singapore.

- [2] Gholamiyan, H., Gholampoor, B., Mastouri, A. & 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*, 1-9. <https://doi.org/10.1007/s11998-024-01015-2>
- [3] Ncube, E. (2008). Use of a simple abrasive-wear resistance test device to assess the suitability of selected hardwoods for wood flooring. *Scientific Research and Essays*, 3(5), 168-173.
- [4] Gholamiyan, H. (2019). Studying the effect of corona treatment on improving the mechanical properties of nitrocellulose and polyurethane coatings used in wooden furniture. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, (3). (In Persian)
- [5] Mastouri, A., Efhamisizi, D. & Tarmian, A. (2024). Sustainable superhydrophobic and self-cleaning wood via wax within Epoxy/PDMS nano-composite coatings: Durability related to surface morphology. *Progress in Organic Coatings*, 186, 107951. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107951>
- [6] Blanchet, P. & Pepin, S. (2021). Trends in chemical wood surface improvements and modifications: A review of the last five years. *Coatings*, 11(12), 1514. <https://doi.org/10.3390/coatings11121514>
- [7] Youssefi, R., Maier, J. & Scheffknecht, G. (2021). Experimental investigations on plasma-assisted wood pellet ignition for the start-up of biomass-fired power stations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138, 110522. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110522>
- [8] Gholamiyan, H., Gholampoor, B. & Hosseinpourpia, R. (2022). Application of waterborne acrylic and solvent-borne polyester coatings on plasma-treated fir (*Abies alba* M.) wood. *Materials*, 15(1), 370. <https://doi.org/10.3390/ma15010370>
- [9] Pillai, R.R. & Thomas, V. (2023). Plasma Surface Engineering of Natural and Sustainable Polymeric Derivatives and Their Potential Applications. *Polymers*, 15(2), 400. <https://doi.org/10.3390/polym15020400>
- [10] Wu, S. (2017). Polymer interface and adhesion. Routledge.
- [11] Sarmadi, M. & Denes, F. (1996). Surface modification of polymers under cold plasma conditions. *Tappi Journal*, 79(8), 189-204.
- [12] Odráškova, M., Zahoranová, A., Tiňo, R. & Černák, M. (2008). Plasma activation of wood surface by diffuse coplanar surface barrier discharge. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 28(2), 203-211. <https://doi.org/10.1007/s11090-008-9121-3>
- [13] Wolkenhauer, A., Avramidis, G., Hauswald, E., Militz, H. & Viöl, W. (2009). Sanding vs. plasma treatment of aged wood: A comparison with respect to surface energy. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29(1), 18-22. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2008.01.004>
- [14] Avramidis, G., Militz, H., Avar, I., Viöl, W. & Wolkenhauer, A. (2012). Improved absorption characteristics of thermally modified beech veneer produced by plasma treatment. *European Journal of Wood and Wood Products*, 70(5), 545-549. <https://doi.org/10.1007/s00107-011-0578-6>
- [15] Gonultas, O. & Candan, Z. (2018). Chemical characterization and FTIR spectroscopy of thermally compressed eucalyptus wood panels. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 20, 431-442. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2018005030301>
- [16] Oertel, G. (Ed.) (1994). Polyurethane handbook (2nd ed.). Hanser Publishers.
- [17] Mastouri, A., Efhamisizi, D., Shirmohammadli, Y. & Oladi, R. (2021). Physicochemical properties of thermally treated poplar wood in silicone and rapeseed oils: A comparative study. *Journal of Building Engineering*, 43, 102511. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102511>
- [18] Primc, G. & Mozetič, M. (2024). Surface modification of polymers by plasma treatment for appropriate adhesion of coatings. *Materials*, 17(7), 1494. <https://doi.org/10.3390/ma17071494>
- [19] Avramidis, G., Hauswald, E., Militz, H. & Viöl, W. (2009). Plasma treatment of wood and its effect on surface chemistry. *Wood Science and Technology*, 43, 261-271. <https://doi.org/10.1007/s00226-008-0231-5>
- [20] Randall, D. & Lee, S. (2002). The polyurethanes book. Wiley.
- [21] Skoog, D.A., Holler, F.J. & Crouch, S.R. (2018). Principles of instrumental analysis (6th ed.). Cengage Learning.

- [22] Acda, M.N., Devera, E.E., Cabangon, R.J. & Ramos, H.J. (2012). Effects of plasma modification on adhesion properties of wood. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 32, 70-75. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2011.10.003>
- [23] Wicks Jr, Z.W., Jones, F.N., Pappas, S.P. & Wicks, D.A. (2007). Organic coatings: science and technology. John Wiley & Sons.
- [24] Bierwagen, G. (2011). Film formation in coatings. *Progress in Organic Coatings*, 72(3), 428-437. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2011.05.012>
- [25] Fengel, D. & Wegener, G. (1989). Wood: Chemistry, ultrastructure, reactions. Walter de Gruyter.
- [26] Mittal, K.L. (2013). Adhesion measurement of films and coatings (2nd ed.).
- [27] Podgorski, L., Rouxhet, L. & Gérardin, P. (2015). Surface modification of wood by plasma treatment for improved adhesion. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 62, 15-22. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.06.010>
- [28] Bahrami, M., Taghiyari, H.R. & Schmidt, O. (2020). Effect of polyurethane coatings on the mechanical and surface properties of wood. *Coatings*, 10(2), 168. <https://doi.org/10.3390/coatings10020168>
- [29] Rashvand, M. & Ranjbar, Z. (2014). Degradation and stabilization of an aromatic polyurethane coating during an artificial aging test via FTIR spectroscopy. *Materials and Corrosion*, 65(1), 76-81. <https://doi.org/10.1002/maco.201206797>
- [30] Bizjak Štrus, N., Kellar Tučeková, Z., Brodňanský, D., Kellar, K. & Dahle, S. (2026). DCSBD plasma treatment as an alternative to commercial surface degreasing agents before applying wood coatings. *Cellulose*, 33, 3587-3600. <https://doi.org/10.1007/s10570-026-06000-0>