

## (OPEN ACCESS)

### Evaluation of the Performance of Water-Based Polyurethane Coating Applied by Spin Coating at Different Thicknesses on Beech Wood under Accelerated Aging Conditions

Fatemeh Hasanzadeh Fard<sup>1</sup>, Mehdi Jonoobi<sup>2\*</sup> and Peyman Ahmadi<sup>3\*</sup>

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

2\*-Corresponding Author, Professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran,

Email: [mehdi.jonoobi@ut.ac.ir](mailto:mehdi.jonoobi@ut.ac.ir)

3\*-Corresponding Author, Postdoctoral Researcher, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran,

Email: [ahmadi.p@ut.ac.ir](mailto:ahmadi.p@ut.ac.ir)

#### Article Info

##### Article type:

Full Length Research Paper

##### Article history:

Received: 03 December 2025

Revised: 28 December 2025

Accepted: 04 January 2026

Published online: 20 March 2026

##### Keywords:

Water-based polyurethane;  
spin coating;  
pull-off adhesion;  
accelerated aging;  
film thickness;  
multi-objective optimization.

#### ABSTRACT

**Background and Objectives:** Surface coating plays a crucial role in enhancing the durability, dimensional stability, and environmental resistance of wood. In this context, water-based polyurethane (WBPU) coatings have attracted increasing attention as sustainable alternatives to solvent-based systems due to their lower VOC emissions and satisfactory mechanical and aesthetic performance. However, the functional efficiency of these coatings is strongly influenced by the application method and, in particular, by coating thickness. Despite its significance, systematic investigations on the effect of coating thickness especially when applied using advanced techniques such as spin coating under aging conditions remain limited. The present study introduces spin coating as a novel approach for wood finishing and evaluates the influence of different WBPU coating thicknesses on the surface and mechanical performance of beech wood (*Fagus orientalis*). The main objective is to determine an optimal coating thickness that provides a balanced performance in terms of hydrophobicity, adhesion, visual stability, and resistance to accelerated aging.

**Materials and Methods:** Beech wood specimens were coated using a commercial acrylic-based WBPU applied via spin coating at four different application levels (3, 6, 9, and 12 coating cycles). Each cycle involved a fixed spin speed of 2000 rpm and a duration of 30 seconds. The thickness of the resulting films was measured through stereomicroscopy and image analysis. A comprehensive set of physical and surface tests was conducted both before and after artificial aging, including water absorption (ASTM D5795), surface roughness (SJ-201P profilometer), dynamic water contact angle (ASTM D5946), color variation (CIE-Lab,  $\Delta E$ ), tensile pull-off adhesion strength (ASTM D4541), and scratch adhesion (ASTM D3359). The accelerated aging

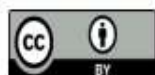


process simulated environmental degradation through a humidity-temperature chamber, allowing for the assessment of coating durability over time. In addition, multi-objective optimization using Minitab's Response Optimizer was employed to identify the film thickness that offered the best overall functional performance.

**Results:** Results showed a nearly linear increase in film thickness from 75  $\mu\text{m}$  (3 cycles) to 286  $\mu\text{m}$  (12 cycles). Thicker coatings demonstrated lower water absorption and higher contact angles exceeding 90° indicating enhanced hydrophobic properties. After aging, thicker films also showed reduced color change ( $\Delta E$ ), with the 9-cycle treatment presenting the best balance of aesthetic and mechanical attributes. This treatment exhibited the highest tensile adhesion strength (2.99 MPa) before aging, and it retained significant adhesion after aging, suggesting strong interfacial bonding and structural integrity. In contrast, the 12-cycle treatment, while superior in terms of water resistance, showed a noticeable drop in adhesion, potentially due to internal stresses or micro-cracks caused by excessive film thickness. Scratch adhesion remained high (5B) in all treatments before aging, but minor deterioration was observed in thicker coatings after aging. The multi-criteria optimization revealed that a film thickness of approximately 206  $\mu\text{m}$  corresponding closely to the 9-cycle treatment provided the highest composite desirability score (0.94) across all evaluated parameters. This result confirms that increasing thickness beyond an optimal range does not necessarily improve overall performance and may instead compromise adhesion or visual consistency due to mechanical stress accumulation during drying or exposure.

**Conclusion:** In conclusion, spin coating is demonstrated to be an effective and innovative method for applying uniform, controllable WBPU coatings on wooden substrates. This study confirms that coating thickness is a pivotal factor influencing water resistance, surface quality, color stability, and adhesion. An intermediate thickness (210  $\mu\text{m}$ ) offers the most favorable combination of performance attributes, making it suitable for practical use in interior wood products, furniture, and protective applications. The research supports the integration of spin coating into sustainable wood finishing systems and provides a foundation for further exploration of advanced coating technologies in the wood science field.

**Cite this article:** Fatemeh Hasanzadeh Fard, Mehdi Jonoobi and Peyman Ahmadi. 2026. Evaluation of the Performance of Water-Based Polyurethane Coating Applied by Spin Coating at Different Thicknesses on Beech Wood under Accelerated Aging Conditions. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 41(1), 69-91. DOI: <https://doi.org/10.22092/ijwpr.2026.371631.1822>



Copyright: © 2025 by the authors. This is an open access, peer-reviewed article published by Research Institute of Forests and Rangelands (<http://ijwpr.areeo.ac.ir/>) and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

## بررسی عملکرد پوشش پلی‌اورتان پایه آب لایه نشانی شده به‌وسیله پوشش دهی دورانی در ضخامت‌های مختلف روی چوب راش تحت کهنگی تسریع شده

فاطمه حسن‌زاده فرد<sup>۱</sup>، مهدی جنوبی<sup>۲\*</sup> و پیمان احمدی<sup>۳\*</sup>

۱-دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲-نویسنده مسئول، استاد، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، پست الکترونیک: [mehdi.jonoobi@ut.ac.ir](mailto:mehdi.jonoobi@ut.ac.ir)

۳-نویسنده مسئول، پژوهشگر فوق دکتری، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، پست الکترونیک: [ahmadi.p@ut.ac.ir](mailto:ahmadi.p@ut.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: کامل علمی - پژوهشی	بیان مسئله و اهداف: پوشش دهی سطح چوب نقش مهمی در افزایش دوام، پایداری ابعادی و مقاومت آن در برابر عوامل محیطی دارد. در این میان، پوشش‌های پلی‌اورتان پایه آب (WBPU) به دلیل سازگاری زیست‌محیطی و عملکرد مناسب، به‌عنوان جایگزینی پایدار برای سامانه‌های پایه حلال موردتوجه قرار گرفته‌اند. با این حال، عملکرد این پوشش‌ها به‌شدت تحت تأثیر روش اعمال و ضخامت فیلم قرار دارد. با وجود اهمیت این عامل، بررسی نظام‌مند اثر ضخامت پوشش، به‌ویژه هنگام اعمال با روش‌های نوین مانند روش اسپین‌کوئینگ، در شرایط کهنگی تسریع‌شده محدود است. در این پژوهش، روش اسپین‌کوئینگ به‌عنوان رویکردی نوآورانه برای پوشش‌دهی چوب معرفی شده و اثر ضخامت‌های مختلف پوشش WBPU بر عملکرد سطحی و مکانیکی چوب راش ( <i>Fagus orientalis</i> ) ارزیابی می‌شود. هدف اصلی، تعیین ضخامت بهینه‌ای است که تعادل مناسبی میان آب‌گریزی، چسبندگی، ثبات ظاهری و دوام در برابر کهنگی ایجاد کند.
تاریخ‌های مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۱۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۴ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۲/۲۹	مواد و روش‌ها: در این پژوهش، نمونه‌های چوب راش با استفاده از یک پوشش پلی‌اورتان پایه آب آکرلیکی تجاری، به‌روش اسپین‌کوئینگ و در چهار سطح (۳، ۶، ۹ و ۱۲ دور پوشش) تیمار شدند. در هر دور، سرعت چرخش ۲۰۰۰ دور بر دقیقه و زمان اعمال ۳۰ ثانیه بود. ضخامت نهایی فیلم‌ها با استریو میکروسکوپ و پردازش تصویری اندازه‌گیری شد. مجموعه‌ای جامع از آزمون‌های فیزیکی و سطحی، قبل و بعد از کهنگی تسریع‌شده، بر روی نمونه‌ها انجام گردید؛ از جمله جذب آب، زبری سطح، زاویه تماس قطره آب و تغییر رنگ ( $\Delta E$ ) چسبندگی کششی و چسبندگی خراشی. کهنگی تسریع‌شده از طریق قراردهی در محفظه دما-رطوبت انجام شد. در ادامه، برای یافتن ضخامت بهینه، از بهینه‌سازی چندمعیاره با استفاده از ابزار Response Optimizer نرم‌افزار Minitab استفاده شد.
واژه‌های کلیدی: پلی‌اورتان پایه آب، اسپین‌کوت، مقاومت چسبندگی، کهنگی تسریع‌شده، ضخامت لایه، بهینه‌سازی چندهدفه.	نتایج: نتایج نشان داد که افزایش تعداد لایه‌ها، ضخامت پوشش را به‌صورت تقریباً خطی از ۷۵ تا ۲۸۶ میکرومتر افزایش داد. پوشش‌های ضخیم‌تر، جذب آب کمتری نشان دادند و زاویه تماس قطره آب در آن‌ها بیش از ۹۰ درجه بود که بیانگر افزایش خاصیت آب‌گریزی است. پس از کهنگی، تغییر رنگ نمونه‌ها در پوشش‌های ضخیم‌تر کاهش یافت؛ به‌طوری‌که تیمار ۹ دور بهترین تعادل را از نظر ثبات رنگ (۷/۸۴). زبری پایین و حفظ براقیت داشت. این تیمار بالاترین چسبندگی کششی را بیش از کهنگی (۲/۹۹ مگاپاسکال) نشان داد و پس از کهنگی نیز چسبندگی قابل‌توجهی حفظ شد که بیانگر اتصال بین سطحی قوی و ساختار پایدار بود. در مقابل، تیمار ۱۲ دور با وجود مقاومت رطوبتی بالاتر، افت چسبندگی قابل‌ملاحظه‌ای داشت که احتمالاً ناشی از تنش‌های داخلی یا ایجاد ریز ترک در لایه‌های ضخیم بود. چسبندگی خراشی در همه تیمارها در شرایط اولیه در سطح (SB) باقی ماند، ولی در تیمارهای ضخیم‌تر پس از کهنگی کمی کاهش یافت. فرایند بهینه‌سازی چندمعیاره نشان داد که ضخامت حدود

۲۰۶ میکرومتر (مطابق با تیمار ۹ دور)، بالاترین امتیاز مطلوبیت ترکیبی (۰/۹۴) را در میان تمامی پارامترهای ارزیابی شده کسب می‌کند. این یافته تأیید می‌کند که افزایش ضخامت از یک مقدار بهینه، لزوماً بهبود عملکرد را در پی ندارد، حتی ممکن است به افت چسبندگی یا یکنواختی ظاهری به علت تنش مکانیکی در فرایند خشک شدن یا طی عمر مفید منجر شود.

نتیجه‌گیری: می‌توان نتیجه گرفت که اسپین‌کوئینگ روشی مؤثر و نوآورانه برای اعمال پوشش‌های یکنواخت و با ضخامت کنترل‌شده پلی‌اورتان پایه آب بر روی زیر لایه‌های چوبی است. ضخامت پوشش، عامل تعیین‌کننده‌ای در بهبود مقاومت رطوبتی، کیفیت سطح، ثبات رنگ و چسبندگی نهایی به‌شمار می‌رود. ضخامت میانه در حدود ۲۱۰ میکرومتر، بهترین عملکرد ترکیبی را ارائه می‌دهد و برای کاربردهای عملی در مبلمان داخلی، اجزای معماری و حفاظت از آثار چوبی پیشنهاد می‌شود. این پژوهش منبایی مناسب برای توسعه سامانه‌های پوشش‌دهی پایدار و مهندسی‌شده در صنعت چوب فراهم می‌کند.

استناد: فاطمه حسن‌زاده فرد، مهدی جنوبی و پیمان احمدی. ۱۴۰۵. بررسی عملکرد پوشش پلی‌اورتان پایه آب لایه نشانی شده به وسیله پوشش دهی دورانی در ضخامت‌های مختلف روی چوب راش تحت کهنگی تسریع شده. نشریه تحقیقات علوم چوب و کاغذ ایران، ۴۱(۱)، ۶۹-۹۱.

DOI: <https://doi.org/10.22092/ijwpr.2026.371631.1822>

## مقدمه

و پوشش‌های شفاف تشکیل‌دهنده فیلم با جاذب‌های UV، به‌طور مؤثر از سطوح چوبی در برابر تخریب اکسیداتیو ناشی از نور و تغییر رنگ محافظت می‌کنند (Hon et al., 1985). پوشش‌های برپایه آبی (water borne) به دلیل کاهش انتشار ترکیبات آلی فرار (VOCs)، تطابق با مقررات محیط زیستی و سهولت در فرایند اعمال، در دو دهه اخیر رشد چشمگیری داشته‌اند (Liu et al., 2020).

پوشش‌دهی چرخشی، روشی پرکاربرد برای رسوب‌دهی لایه‌های نازک یکنواخت روی زیرلایه‌ها است، روشی که نیروهای گریز از مرکز و ویسکوز برای کنترل ضخامت لایه باهم رقابت می‌کنند (Scriven, 1988). این فرایند شامل رسوب‌دهی مواد مایع روی مرکز زیرلایه و به‌دنبال آن چرخش با سرعت‌های دلخواه برای پخش پوشش از طریق نیروی گریز از مرکز است (Mustafa & Jameel, 2021). ضخامت لایه به‌سرعت چرخش، زمان، ویسکوزیته و غلظت محلول بستگی دارد و مدل‌های ریاضی برای پیش‌بینی ویژگی‌های پوشش در دسترس هستند (Mustafa & Jameel, 2021). مطالعات متعددی نشان داده‌اند که روش‌های پوشش سطح، ضخامت پوشش، روش اعمال لایه، آماده‌سازی سطح زیرلایه و شرایط پس از اعمال پوشش

پوشش‌های سطحی بر پایه پلی‌اورتان به‌ویژه وقتی بر روی سطوح چوبی اعمال می‌شوند، نقش بسیار حیاتی در بهبود دوام، زیبایی و عملکرد آن‌ها ایفا می‌کنند. چوب، به دلیل ساختار ناهمسان‌گرد، جذب رطوبت بالا و واکنشیدگی و هم‌کشیدگی ابعاد ناشی از تغییرات رطوبتی و دمایی، در محیط‌های کاربردی مستعد تخریب سریع است (Derome et al., 2012; Marais et al., 2022). برای رفع این محدودیت‌ها، پوشش‌ها عملکرد دوگانه‌ای دارند: محافظت از مواد چوبی زیرین در برابر زوال محیطی و افزایش خواص زیبایی‌شناختی (Viitanen & Ritschkoff, 2011). پوشش‌های پلی‌اورتان به‌عنوان یک راه‌حل حفاظتی رایج، به‌ویژه فرمولاسیون‌های مبتنی بر حلال که نیاز به ارزیابی جامع از ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی، شیمیایی و ایمنی در برابر آتش دارند، ظهور کرده‌اند (Ružinská et al., 2014). سیستم‌های پوشش شفاف به‌ویژه برای حفظ بافت و رنگ طبیعی چوب و درعین حال محافظت از آن مورد توجه قرار گرفته‌اند (Cogulet et al., 2018). تحقیقات نشان داده است که عوامل پوشش‌دهنده مختلف، از جمله پوشش‌های نفوذکننده

بین ضخامت پوشش، روش لایه‌نشانی و خواص سطحی در شرایط محیطی نامناسب، ضروری به نظر می‌رسد. بسیاری از مطالعات ضخامت پوشش را به صورت تقریبی یا سطحی گزارش کرده‌اند و کنترل دقیق آن به‌ویژه در کاربرد چوب و با روش‌هایی مانند اسپین‌کوٹینگ (Spin coating) به ندرت دیده شده است. در پژوهشی [Xu و Liu](#) (۲۰۲۲) نشان دادند که فرایند اعمال پوشش تأثیر قابل توجهی بر چسبندگی، سایش و براقیت دارد، اما ضخامت دقیق و لایه‌نشانی با اسپین‌کوٹینگ مورد بررسی قرار نگرفته بود. استفاده از فناوری لایه‌نشانی دقیق مانند روش پوشش دهی دورانی یا اسپین‌کوٹینگ برای تولید پوشش‌های یکنواخت با ضخامت کنترل‌شده در زیرلایه‌های چوبی، یک رویکرد نوظهور در مطالعات مواد و پوشش به‌شمار می‌رود. این پژوهش قصد دارد تا با تمرکز بر پوشش‌های اسپین‌کوت شده چوب راش، تحلیل جامعی از رابطه بین تعداد لایه‌ها (ضخامت مؤثر) و تغییر خواص سطحی، قبل و بعد از کهنگی تسریع شده، انجام دهد؛ موضوعی که تاکنون کمتر در ادبیات پوشش چوب به صورت یکپارچه دیده شده است.

این پژوهش به این دلیل نوآورانه محسوب می‌شود که چندین بُعد را هم‌زمان مدنظر قرار می‌دهد؛ اولاً، استفاده از روش اسپین‌کوٹینگ برای اعمال پوشش پلی اورتان بر چوب راش که امکان کنترل دقیق ضخامت و یکنواختی فیلم را فراهم می‌کند؛ ثانیاً، طراحی تیمارها بر اساس تعداد دفعات لایه‌نشانی و ارزیابی طیفی از ضخامت مؤثر برای پوشش؛ ثالثاً، اندازه‌گیری جامع خواص سطحی شامل زبری سطح، زاویه تماس آب، تغییر رنگ ( $\Delta E$ )، چسبندگی، سختی سطح، براقیت و جذب آب انجام شد. البته تحلیل آماری برای تعیین تیمار بهینه (ضخامت بهینه پوشش) بر اساس عملکرد کلی شاخص‌ها نیز انجام خواهد شد. این ترکیب روش‌شناسی و تحلیل جامع، این پژوهش را به‌عنوان یکی از مطالعات پیشرو در زمینه پوشش سطحی چوب با رویکرد ضخامت کنترل‌شده و دوام محیطی معرفی می‌کند.

(مانند خشک‌سازی، پخت، انقباض) تأثیر قابل‌توجهی بر خواص نهایی سطح پوشش‌شده دارند ([Molina & Ramirez-Barat, 2023](#); [Madhavi et al., 2022](#)).

برای نمونه، [Mucci](#) و همکاران (۲۰۲۴) در بررسی پوشش‌های پلی اورتان بر پایه آب نشان دادند که اگرچه پوشش‌های پایه حلال به‌طور سنتی به دلیل عملکرد بهتری داشته‌اند، ولی پوشش‌های آبی پایه با طراحی مناسب می‌توانند جایگزینی سازگار با محیط‌زیست باشند. همچنین، پژوهش [Scrinzi](#) و همکاران (۲۰۱۱) نشان داد که تابش فرابنفش و رطوبت متناوب می‌تواند باعث کاهش براقیت و افت مقاومت پوشش‌های پلی‌اورتان پایه آب در برابر لکه و مایعات خانگی شوند. اهمیت پرداختن به این موضوع در شرایط کاربردی بسیار ملموس است. سطوح پوشش‌شده چوب در ساختمان، مبلمان یا محیط‌های بیرونی با شرایط پیچیده‌ای مانند چرخه‌های متناوب رطوبت و خشکی، تابش نور خورشید، تغییر دما، جذب آب یا نفوذ بخار مواجه‌اند. چنین شرایطی می‌تواند منجر به ترک خوردگی پوشش، پایین آمدن چسبندگی، تغییر رنگ و کاهش براقیت شود. برای نمونه، در مطالعه‌ای بر روی چوب راش پوشش‌شده با پوشش‌های پلی‌اورتان نشان داده شده است که افزایش رطوبت و چرخه‌های محیطی، باعث افزایش زبری سطح و کاهش چسبندگی می‌شود ([Ozdemir & Hiziroglu, 2009](#)). بنابراین، تعیین ضخامت بهینه پوشش که هم عملکرد سطحی مطلوب داشته باشد و هم دوام خوبی در برابر شرایط محیطی نشان دهد، از اهمیت بالایی برخوردار است؛ به‌نحوی که انتخاب ضخامت نامناسب ممکن است منجر به مشکلاتی مانند تنش‌های داخلی، لایه‌لایه شدن، یا یکنواختی ضعیف پوشش شود. به‌ویژه، پوشش‌های بسیار نازک ممکن است پوشش‌دهی کامل زیرلایه را فراهم نکنند و نفوذ رطوبت را به حداقل نرسانند و پوشش‌های بسیار ضخیم ممکن است هنگام نشست، خشک شدن یا انقباض دچار ترک یا جدا شدن شوند ([Tomar et al., 2020](#)). در این راستا، بررسی دقیق رابطه

## مواد و روش‌ها

## مواد

در ایــــن پژوهش از گونه چوبی راش (*Fagus Orientalis*) باسن تقریبی ۵۴ سال، به‌عنوان بستر پایه برای اعمال پوشش استفاده شد. نمونه‌ها از بخش برون چوب انتخاب و با ابعاد ۵۰×۵۰×۵ میلی‌متر، (طول × عرض × ضخامت) برای آزمون‌های پوشش‌دهی تهیه شد. ابعاد نمونه‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شدند تا به‌صورت کنترل شده و مناسب نمونه‌ها، روی پد ساکشن دستگاه قرار بگیرند. برای آماده‌سازی سطح، نمونه‌ها ابتدا پرداخت مکانیکی شدند و بعد با سنباده‌های با دانه‌بندی (P) ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۲۰ پرداخت نهایی گردیدند تا سطحی یکنواخت و عاری از ناهمواری برای اعمال پوشش فراهم شود. پیش از پوشش‌دهی، نمونه‌ها به مدت یک هفته در شرایط استاندارد (دما  $20 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی  $65 \pm 5$  درصد) مشروط‌سازی شدند.

پوشش مصرفی در این پژوهش، پلی‌اورتان پایه آب آکرلیک بود که در شرکت رزین فام تهیه و استفاده شد. این پوشش مطابق اطلاعات ارائه‌شده توسط تولیدکننده، دارای درصد مواد جامد حدود ۳۵-۴۰ درصد، ویسکوزیته متوسط

در محدوده ۳۰۰-۶۰۰ mPa.s (در دمای ۲۵ °C)، pH نزدیک به خنثی (۷-۸) و چگالی تقریبی  $1/05 \text{ g/cm}^3$  بوده است. شرایط پیشنهادی خشک شدن شامل خشک‌شدن سطحی در دمای محیط طی ۲۰-۳۰ دقیقه و پخت نهایی پس از ۲۴ ساعت است. این پوشش‌ها به‌صورت تجاری در دسترس بوده و دارای ویژگی‌هایی مانند زمان خشک شدن سریع، شفافیت بالا، مقاومت در برابر خراش، مقاومت نوری و مقاوم در برابر آب است.

## روش‌ها

فرایند اعمال پوشش با استفاده از تکنیک پوشش‌دهی دورانی (Spin Coating) انجام شد. پارامترهای ثابت این روش شامل سرعت چرخش ۲۰۰۰ دور در دقیقه (rpm) و زمان اسپری ۳۰ ثانیه برای هر مرحله بود. برای بررسی تأثیر تعداد دفعات اعمال پوشش بر ویژگی‌های نهایی، پوشش در چهار سطح مختلف (۳، ۶، ۹ و ۱۲ بار اعمال) بر سطوح چوبی اجرا شد (جدول ۱). دستگاه مورد استفاده در این پژوهش به سامانه وکیوم مجهز بود و نمونه‌های چوبی به‌وسیله مکش ایجادشده بر روی پد ساکشن دستگاه به‌صورت پایدار تثبیت شدند.

## جدول ۱- شرح تیمارها و اعمال پوشش بر روی سطح چوب

Table 1- Description of treatments, application of coating on wood surface

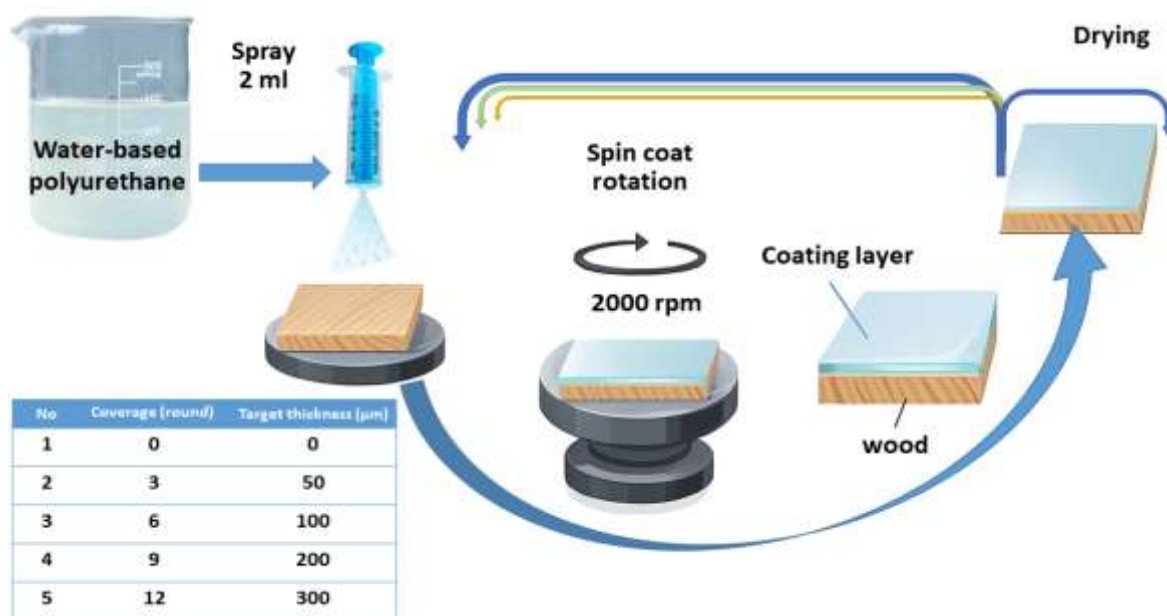
No	Coverage (round)	Target thickness ( $\mu\text{m}$ )	Treatment code
1	0	0	C
2	3	50	T <sub>1</sub>
3	6	100	T <sub>2</sub>
4	9	200	T <sub>3</sub>
5	12	300	T <sub>4</sub>

تعیین شده با استفاده از سرنگ دقیق روی سطح نمونه ریخته شده تا لایه‌ای یکنواخت ایجاد شود (شکل ۱). پس از هر دور

در هر مرحله، مقدار ۲ میلی‌لیتر از پوشش پلی‌اورتان در هنگام چرخاندن صفحه دستگاه پوشش‌دهی دورانی با سرعت

نسبی ۵۰٪) نگهداری شدند تا فرایند خشک شدن کامل شود. تمامی مراحل در محیط آزمایشگاهی با تهویه مناسب و کنترل گردوغبار انجام شد. تمام تیمارها در ۳ تکرار انجام گردید.

پوشش‌دهی، نمونه‌ها به مدت ۱۰ دقیقه در دمای محیط نگهداری شدند تا پوشش اولیه به صورت سطحی خشک شود. پس از اعمال لایه نهایی، تمام نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در شرایط محیطی ثابت (دمای  $23 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد و رطوبت



شکل ۱- اعمال پوشش پلی‌اورتان پایه آب بر روی چوب راش با روش پوشش‌دهی دورانی  
 Figure 1. Applying water-based polyurethane coating to beech wood using the spin coating method

در پایان چرخه نهایی، خواص نمونه‌ها اندازه‌گیری شد تا میزان پایداری پوشش در برابر شرایط رطوبتی بررسی گردد.

بررسی ضخامت و نفوذ فیلم پوشش پلی‌اورتان پایه آب برای بررسی ضخامت فیلم پوشش پلی‌اورتان پایه آب روی سطح چوب، از تصاویر استریو میکروسکوپ استفاده شد. در روش استریو میکروسکوپ (Stereo Microscope)، پس از اعمال پوشش در تعداد دوره‌های مختلف (۳، ۶، ۹ و ۱۲ دور)، نمونه‌ها در ابعاد کوچک (حدود  $1 \times 1$  سانتی‌متر) بریده شدند. سپس سطح پوشش یافته تحت بزرگنمایی ۲۰ تا ۴۰ برابر در استریو میکروسکوپ قرار گرفت. از آنجاکه استریو میکروسکوپ قابلیت بررسی سه‌بعدی نسبی دارد، امکان مشاهده مستقیم ضخامت نسبی لایه و یکنواختی سطح پوشش فراهم شد. تصاویر گرفته‌شده برای تحلیل دقیق در

### کهنگی تسریع شده

در این پژوهش، به منظور ارزیابی دوام و رفتار نمونه‌های پوشش‌خورده با پلی‌اورتان بعد از کهنگی، از یک شیوه‌نامه کهنگی چرخه‌ای تر-خشک استفاده شد که مبتنی بر روش‌های اصلاح شده در منابع معتبر است (Li-ying et al., 2007; Mastouri et al., 2025). این آزمون شامل چهار چرخه متوالی بود که در هر چرخه، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آب غوطه‌ور شده، سپس ۲۴ ساعت در شرایط محیطی، هوا خشک شدند و در ادامه به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد در آون قرار گرفتند. این روش شرایط تکرار شونده رطوبت محیطی و خشک شدن تدریجی را شبیه‌سازی کرده و تنش‌های ناشی از جذب و دفع آب در چوب و لایه پوشش را بازنمایی می‌کند.

نرم افزارهای آنالیز تصویر (مانند ImageJ) مورد پردازش قرار گرفتند و میانگین ضخامت ظاهری لایه پوشش محاسبه شد.



شکل ۲- تصاویر استریو میکروسکوپ  
Figure 2. Stereo microscope images

معرض رطوبت،  $W_1$  وزن خشک نهایی نمونه‌ها و  $A$  سطح

$$\text{جذب آب (g/m}^2\text{)} = \frac{W_0 - W_1}{A}$$

مقطع نمونه در معرض رطوبت.

برای هر گروه (تیمار با ۳، ۶، ۹ و ۱۲ دور پوشش و شاهد) حداقل ۳ نمونه تحلیل شد و میانگین و انحراف معیار گزارش گردید. این روش به پژوهشگر امکان می‌دهد تا مقادیر کمی جذب آب را در پوشش‌های چوبی تعیین کرده و اثر تعداد لایه‌های پوشش یا شرایط تیمار را بر خاصیت محافظتی پوشش ارزیابی نماید.

#### آزمون زبری سطح

این آزمون در آزمایشگاه فیزیک گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ دانشگاه تهران انجام شد. اندازه‌گیری کیفیت سطح به روش پروفیلومتری و بر اساس تکنیک سوزنی با استفاده از دستگاه زبری سنج مدل SJ-201P ساخت شرکت Mitutoyo کشور ژاپن انجام شد. مقدار زبری نمونه‌ها در جهت عمود بر الیاف اندازه‌گیری شد. از طریق این دستگاه پارامترهای  $R_a$  (میانگین زبری)،  $R_z$  (ارتفاع بلندترین قله تا

#### جذب آب پوشش

نمونه‌های چوبی پوشش داده شده (پس از اعمال پوشش پلی‌اورتان پایه آب) و نمونه‌های شاهد بدون پوشش، ابتدا در شرایط (دمای  $23 \pm 3^\circ\text{C}$  و رطوبت نسبی  $60 \pm 5\%$ ) به مدت ۴۸ ساعت مشروط سازی شدند. سپس، مطابق استاندارد ASTM D5795-16، از یک حلقه روی سطح (حلقه کوب (Cobb Ring)) استفاده شده تا میزان آبی که از سطح پوشش عبور کرده و توسط زیرلایه چوبی جذب می‌شود محاسبه گردد. در این روش، بر روی سطح نمونه‌ها به صورت افقی یک حلقه Cobb قرار گرفته و بر روی سطح ثابت شد. سپس طبق توصیه استاندارد، مقدار مشخصی از آب مقطر داخل حلقه ریخته و به مدت ۶۰ دقیقه در تماس با سطح باقی ماند. پس از پایان زمان تماس ۶۰ دقیقه، آب داخل حلقه خارج و سطح نمونه به دقت خشک شد. آنگاه وزن نمونه‌ها بلافاصله توزین شد ( $W_0$ ). سپس نمونه‌ها در رابطه (۱)

دمای  $105^\circ\text{C}$  به مدت ۲۴ ساعت خشک و وزن نهایی نمونه‌ها دوباره ( $W_1$ ) ثبت شد. میزان جذب آب طبق رابطه ۱ محاسبه شد.

که در آن،  $W_0$  وزن مرطوب نمونه‌ها بعد از قرارگیری در

$\Delta L$ ،  $\Delta a$  و  $\Delta b$  به ترتیب تغییرات  $L^*$ ،  $a^*$  و  $b^*$  در قبل و بعد از کهنگی تسریع شده است.

#### تر شوندگی سطح

به منظور ارزیابی خاصیت تر شوندگی، زاویه تماس قطره آب بر روی سطح نمونه‌ها به روش دینامیک انجام شد. در این روش قطره‌ای به حجم ۱۰ میکرولیتر روی سطح نمونه‌ها ریخته و زاویه تماس قطره به مدت ۹۰ ثانیه به وسیله دوربین تصویربرداری گردید. در مدت ۹۰ ثانیه، به طور مشخص، برای هر تیمار ۱۰ تا ۱۲ تصویر از زاویه تماس قطره آب تهیه شد. سپس تصاویر به دست آمده با استفاده از نرم افزار ImageJ آنالیز شد. اندازه گیری زاویه تماس نمونه‌های تیمار شده قبل و بعد از کهنگی تسریع شده به مدت ۹۰ ثانیه استفاده شد. نحوه اندازه گیری زاویه تماس در شکل ۳، نشان داده شده است (با رابطه ۴ محاسبه شده است).

$$\theta = 2 \cdot \arctan\left(\frac{H}{R}\right)$$

رابطه (۴)

که در آن،  $\theta$  زاویه تماس قطره،  $H$  ارتفاع قطره،  $R$  شعاع قطره.

عمیق ترین دره) و  $R_q$  (ارتفاع) اندازه گیری شد. برای مقایسه زبری نمونه‌ها قبل و بعد از کهنگی تسریع شده، زبری نسبی بر اساس رابطه ۲ محاسبه شد.

$$R = \frac{R_t}{R_o}$$

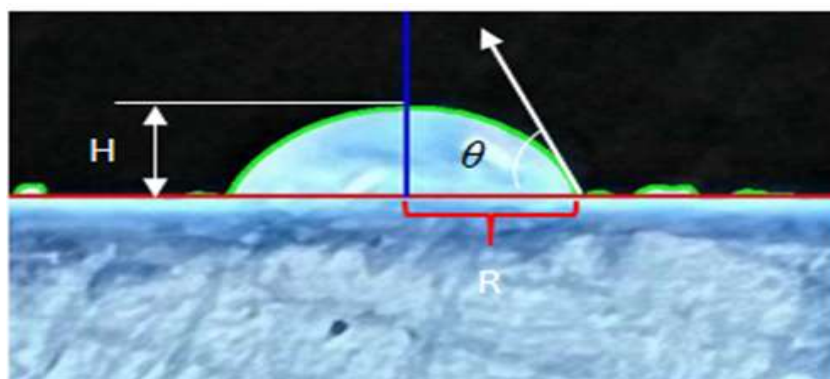
رابطه (۲)

که در آن  $R$  زبری نسبی،  $R_T$  پارامتر زبری بعد از کهنگی تسریع شده،  $R_o$  پارامتر زبری قبل از کهنگی تسریع شده است.

#### آزمون رنگ سنجی

این آزمون در آزمایشگاه فیزیک گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ و بر اساس سیستم CIE-Lab انجام شد. محل اندازه گیری رنگ، دایره‌ای به قطر ۵ سانتی متر در سطح مماسی نمونه‌های تحت آزمایش بود. برای انجام این کار از دستگاه رنگ سنجی مدل NRF145 ساخت کشور چین استفاده شد. با تابش رنگ بر روی نمونه‌ها و بر اساس نور منعکس شده، پارامترهای  $a^*$ ،  $b^*$ ،  $L^*$  و  $h^*$  قبل و پس از تغییر رنگ ( $\Delta E^*$ ) به ترتیب با استفاده از رابطه ۳ محاسبه کهنگی تسریع شده اندازه گیری گردید. همچنین شاخص شد.

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2} + \Delta L^{*2})} \quad \text{رابطه (۳)}$$



شکل ۳- زاویه تماس قطره آب با نرم افزار ImageJ

Figure 3- Water drop contact angle with ImageJ software

### چسبندگی کششی

ارزیابی میزان چسبندگی پوشش‌ها بر سطح نمونه‌های تیمار شده و پوشش داده شده از طریق آزمون چسبندگی کششی (Pull off) بر اساس استاندارد ASTM D ۴۵۴۱ با استفاده از دستگاه پول آف (Electrometer 510 (Canada, Ontario, Automatic) انجام شد. برای انجام این آزمون، ابتدا دالی‌های دستگاه (قطعات جدا از دستگاه به شکل استوانه‌ای) به کمک چسب مخصوص اپوکسی بر روی سطح نمونه‌ها چسبانده شدند. سپس، اطراف دالی‌ها به وسیله گردبر برش داده شدند. دالی‌ها به کمک دستگاه چسبندگی کششی از سطح چوب پوشش داده شده جدا شده و میزان نیروی لازم برای جداسازی لایه پوشش رنگی از سطح چوب محاسبه شد.

### چسبندگی خراشی

آزمون چسبندگی خراشی (Cross cut (Peel)) به منظور ارزیابی مقاومت فیلم خشک پوشش پلی‌اورتان پایه آب در

برابر جداسدگی از سطح زیرلایه چوب، مطابق استاندارد ASTM D3359 انجام شد. در این روش، با استفاده از دستگاه کراس کات (Capelle, Netherland KIT CC3000)، شبکه‌ای از برش‌های عمود بر هم بافاصله یکنواخت بر روی سطح پوشش ایجاد گردید. پس از انجام برش‌ها، نوار چسب استاندارد بر روی سطح اعمال و بعد با زاویه و سرعت مشخص جدا شد. میزان جداسدگی فیلم پوشش از سطح زیرلایه به صورت کیفی ارزیابی گردید.

درجه‌بندی چسبندگی بر اساس مقیاس B۵ تا B۰ انجام شد که در آن درجه B۵ نشان‌دهنده عدم جداسدگی پوشش و درجه B۰ بیانگر جداسدگی گسترده فیلم است. معیارهای دقیق هر درجه‌بندی، شامل درصد سطح جدا شده و توصیف رفتار پوشش، مطابق استاندارد ASTM D3359 بوده و به طور خلاصه در جدول ۲ ارائه شده‌اند. نتایج آزمون چسبندگی خراشی نمونه‌ها با استفاده از این درجه‌بندی‌ها تفسیر و گزارش شدند.

جدول ۲- درجه‌بندی‌ها به طور گسترده در ارزیابی کیفیت چسبندگی فیلم‌های پوشش بر روی سطوح مختلف بر اساس استانداردهای

بین‌المللی مانند ASTM D3359 یا ISO 2409

**Table 2 - Ratings widely used in evaluating the adhesion quality of coating films on various surfaces based on international standards such as ASTM D3359 or ISO 2409**

NO	Grading	Description	Removed Area (%)
1	5B	The square edges are perfectly smooth, and None of the lattice squares are disconnected	0%
2	4B	Small flakes of the coating are dislodged at intersections, affecting less than 5% of the surface.	< 5%
3	3B	Small flakes of coating are separated around the borders and at cut intersections.	5% - 15%
4	2B	Along the margins and on several of the squares, the coating has flaked.	15% - 35%
5	1B	The coating has peeled around the borders of the broad ribbon cuts, and entire squares have separated.	35%- 65%
6	0B	Across the coating, there is severe flaking and peeling.	>65%

## بهینه‌سازی

به منظور شناسایی ضخامت بهینه پوشش پلی‌یورتان پایه آبی با روش پوشش دهی چرخشی، از بهینه‌سازی چندمعیاره با بهره‌گیری از ابزار Response Optimizer در نرم‌افزار Minitab استفاده شد. در این روش، با تعریف اهداف مجزای عملکردی شامل کاهش جذب آب، کاهش زبری سطح، کاهش تغییر رنگ، افزایش زاویه تماس و افزایش مقاومت به چسبندگی، پارامتر ضخامت پوشش به‌عنوان تنها متغیر مستقل در نظر گرفته شد و مقدار بهینه آن از میان تیمارهای مختلف استخراج گردید.

## آنالیز داده‌ها

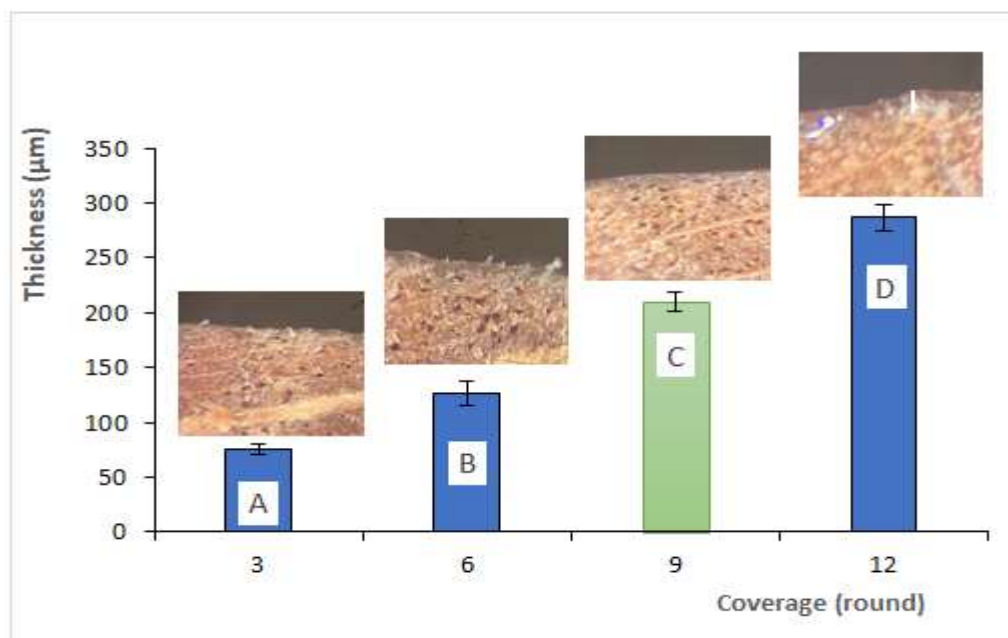
داده‌های به‌دست‌آمده در نرم‌افزار Excel 2010 وارد شده و پس از تهیه گزاره‌های توصیفی (میانگین، انحراف معیار)، با استفاده از نرم‌افزار SPSS آزمون‌های آماری شامل تجزیه واریانس و آزمون گروه‌بندی دانکن انجام شد. در مرحله بعد

انتخاب لایه نشانی بهینه برای دستیابی به ضخامت مناسب از نرم‌افزار Minitab 16 استفاده شد.

## نتایج

ضخامت و نفوذ فیلم پوشش پلی‌یورتان پایه آب

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از آزمون ضخامت پوشش پلی‌یورتان پایه آب اعمال‌شده روی چوب راش با استفاده از روش پوشش‌دهی دورانی، رابطه‌ای واضح و معنادار میان تعداد دفعات اعمال پوشش و ضخامت نهایی لایه مشاهده شد (شکل ۴). نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تعداد دفعات پوشش‌دهی از ۳ به ۱۲ دور، ضخامت پوشش از حدود ۷۵ میکرومتر به بیش از ۳۰۰ میکرومتر افزایش یافته است. این روند صعودی و نزدیک به خطی، نه تنها از نظر آماری معنادار است، بلکه در چارچوب مدل‌های فیزیکی توجیه‌پذیر می‌باشد.



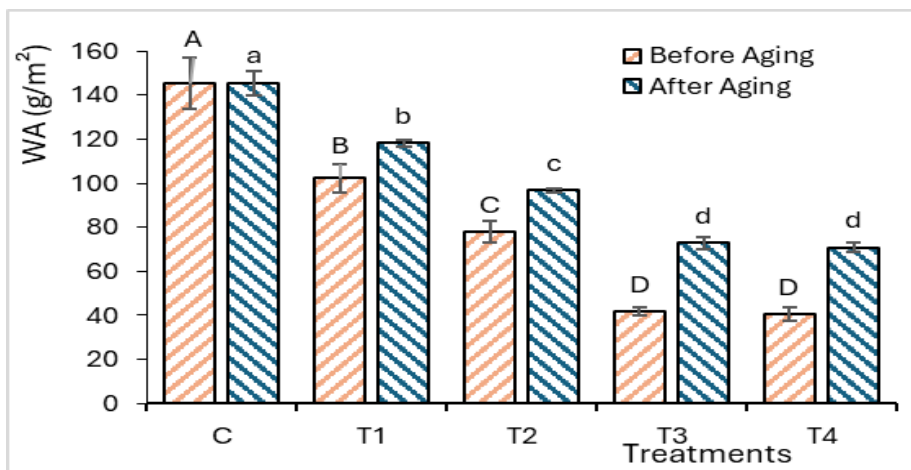
شکل ۴- تغییرات ضخامت پوشش پلی‌یورتان پایه آب بر سطح چوب راش در تعداد دفعات مختلف پوشش‌دهی با روش پوشش‌دهی دورانی

Figure 4. Changes in the thickness of water-based polyurethane coating on beech wood surface at different coverage round using the spin coating method

موجب افزایش جذب آب در این تیمار شد، اما عملکرد آن همچنان نسبت به T1 به طور محسوستری بهتر بوده و نشان‌دهنده نقش مؤثر ضخامت بیشتر در بهبود خاصیت مانع‌سازی پوشش است. کمترین مقادیر جذب آب مربوط به تیمارهای با ضخامت بالاتر، یعنی T3 و T4، می‌باشد. در تیمار T3 (حدود ۲۱۰ میکرومتر)، جذب آب پیش از کهنگی حدود  $73 \text{ g/m}^2$  و پس از کهنگی حدود  $42 \text{ g/m}^2$  اندازه‌گیری شد. تیمار T4 (حدود ۲۸۶ میکرومتر) نیز رفتار مشابهی نشان داد، به طوری که جذب آب پیش از کهنگی در حدود  $70 \text{ g/m}^2$  و پس از کهنگی در حدود  $40 \text{ g/m}^2$  ثبت گردید. این نتایج نشان می‌دهد که افزایش ضخامت پوشش تا این محدوده، نفوذ آب به سطح چوب را به طور مؤثری محدود کرده و پایداری رطوبتی پوشش را حتی پس از کهنگی تسریع‌شده حفظ می‌کند. با این حال، مقادیر نزدیک جذب آب در تیمارهای T3 و T4 بیانگر آن است که افزایش ضخامت پوشش فراتر از مقدار مشخص، بهبود قابل توجهی در مقاومت رطوبتی ایجاد نمی‌کند و عملکرد پوشش به یک سطح اشباع نزدیک می‌شود. این رفتار نشان می‌دهد که ضخامت‌های میانی تا بالا، تعادل مناسبی میان عملکرد مانع‌سازی و کارایی پوشش فراهم می‌کنند.

### جذب آب پوشش

نتایج آزمون جذب آب نمونه‌های شاهد و پوشش‌دار قبل و بعد از فرایند کهنگی تسریع‌شده در شکل ۵ ارائه شده است. به طور کلی، اعمال پوشش پلی‌اورتان پایه آب باعث کاهش قابل توجه جذب آب در تمامی تیمارها نسبت به نمونه شاهد گردید و این اثر با افزایش ضخامت پوشش تشدید شد. در نمونه شاهد بدون پوشش (C)، مقدار جذب آب قبل و بعد از کهنگی تقریباً ثابت و در حدود  $145 \text{ g/m}^2$  اندازه‌گیری شد که نشان می‌دهد فرایند کهنگی تأثیر محسوس بر رفتار رطوبتی چوب بدون پوشش نداشته و نفوذ آب همچنان به طور مستقیم از طریق ساختار چوب انجام شده است. در تیمار T1 با ضخامت پوشش حدود  $75 \text{ میکرومتر}$ ، جذب آب پیش از کهنگی برابر با  $102 \text{ g/m}^2$  و پس از کهنگی به  $96 \text{ g/m}^2$  افزایش یافت. این افزایش بیانگر افت نسبی عملکرد پوشش در ضخامت‌های پایین است که احتمالاً ناشی از پوشش‌دهی ناقص خلل و فرج سطحی و حساسیت بیشتر فیلم نازک به تخریب ناشی از چرخه‌های رطوبتی است. با افزایش ضخامت پوشش در تیمار T2 (حدود  $120 \text{ میکرومتر}$ )، جذب آب پیش از کهنگی به  $78 \text{ g/m}^2$  کاهش یافت و پس از کهنگی به  $96 \text{ g/m}^2$  رسید. اگرچه کهنگی



شکل ۵- میزان جذب آب نمونه‌های پوشش‌دار با ضخامت‌های مختلف و نمونه شاهد، قبل و بعد از کهنگی تسریع‌شده

Figure 5. Water absorption rate of coated samples with different thicknesses and the control sample, before and after accelerated aging

## آزمون زبری سطح

فرایند کهنگی شده است. در مقابل، تیمارهای پوشش یافته با ضخامت‌های مختلف باعث کاهش زبری سطح شدند، اما نتایج آنالیز واریانس نشان داد اعمال پوشش قبل از کهنگی معنی دار نبوده است. به طور خاص، در تیمار T2 و T3 با ضخامت‌های ۱۲۰ و ۲۱۰ میکرومتر، زبری سطح پس از کهنگی به ۵/۹۲ و ۶/۱۰ میکرومتر محدود شد که در مقایسه با تیمار شاهد، کاهش قابل توجهی داشته است، اما از نظر آماری همچنان معنادار نبوده است.

نتایج حاصل از آزمون زبری سطح (Ra) نشان داد که اعمال پوشش پلی‌یورتان پایه آب تأثیر قابل توجهی بر کاهش زبری سطح چوب راش داشته است (جدول ۳). در نمونه شاهد بدون پوشش، زبری سطح قبل از کهنگی به طور میانگین ۶/۹۴ میکرومتر و پس از کهنگی ۷/۹۳ میکرومتر اندازه‌گیری شد که بالاترین مقادیر در میان تیمارها بودند. این نتایج نشان می‌دهد که عدم وجود پوشش محافظ باعث افزایش زبری در نتیجه تأثیر مستقیم عوامل محیطی در طول

جدول ۳- اثر ضخامت پوشش پلی‌یورتان پایه آب بر زبری سطح چوب راش قبل و بعد از آزمون کهنگی تسریع شده

**Table 3 - Effect of water-based polyurethane thickness on beech wood surface roughness before and after accelerated aging test**

No	Treatments	Coating Thickness	Average Roughness (Ra)		Relative Roughness (R)
			Before Aging	After Aging	
1	Control (C)		6.94 (0.39) <sup>a</sup>	7.93 (0.44) <sup>a</sup>	1.14 <sup>a</sup>
2	T1		6.34 (0.31) <sup>a</sup>	7.33 (0.48) <sup>a</sup>	1.15 <sup>a</sup>
3	T2		4.94 (0.66) <sup>a</sup>	5.92 (0.84) <sup>a</sup>	1.19 <sup>ab</sup>
4	T3		4.82 (0.97) <sup>a</sup>	6.10 (1.22) <sup>a</sup>	1.26 <sup>b</sup>
5	T4		5.68 (1.55) <sup>a</sup>	7.36 (1.54) <sup>a</sup>	1.26 <sup>b</sup>
Significance (Sig.)			0.304	0.236	0.023

نکته: مقادیر ارائه شده داخل جدول میانگین  $\pm$  (انحراف معیار) هستند. حروف لاتین (a, b) در هر ستون نشان‌دهنده عدم تفاوت معنادار آماری بین تیمارها در سطح احتمال  $P=0.05$  طبق آزمون دانکن (Duncan's multiple range test) می‌باشند. مقادیر Sig. در ردیف انتهایی جدول، سطح معنی‌داری آزمون آنالیز واریانس را برای هر متغیر نشان می‌دهند.

Note: The values presented in the table are expressed as average (standard deviations). Lowercase letters (a, b) within each column indicate no statistically significant difference among treatments at the 0.05 probability level according to Duncan's multiple range test. The Sig. values in the bottom row of the table represent the significance levels obtained from the analysis of variance (ANOVA) for each variable.

## آزمون رنگ‌سنجی

تغییر رنگ ناشی از پوشش

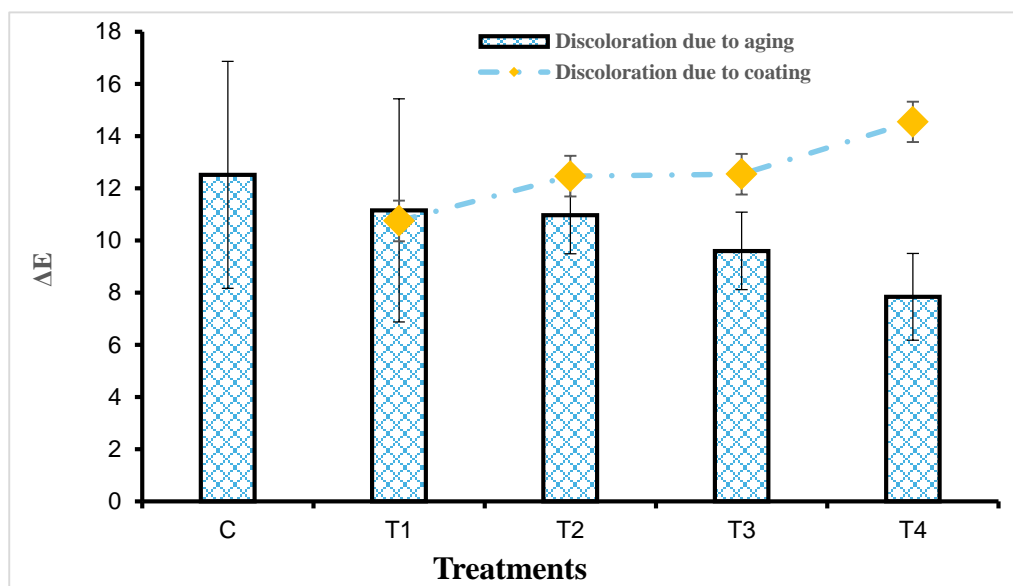
ضخامت پوشش و میزان تغییر رنگ رابطه مستقیم مشاهده شد، به طوری که با افزایش ضخامت پوشش،  $\Delta E$  نیز افزایش یافت.

نتایج حاصل از تغییر رنگ ( $\Delta E$ ) ناشی از فرایند کهنگی تسریع شده در نمونه‌های پوشش‌دار با ضخامت‌های مختلف نشان‌دهنده الگوی معناداری است. تیمار شاهد (بدون پوشش) دارای بزرگ‌ترین  $\Delta E$  برابر با حدود ۱۲/۵۱ بوده

نتایج شکل ۶ و ۷، نشان داد که شاخص تغییر رنگ  $\Delta E$  ناشی از اعمال پوشش پلی‌یورتان پایه آب، در تمامی تیمارها نسبت به نمونه شاهد (C) افزایش یافته است. این افزایش در تیمار T4 برابر ۱۴/۵۴ بیشترین و در تیمار T1 با مقدار ۱۰/۷۵ کمترین مقدار را داشته است. به طور کلی، بین

بالا (T4) مقدار  $\Delta E$  حدود ۷/۸۴ را ثبت کرده است. کاهش تدریجی  $\Delta E$  با افزایش ضخامت پوشش حکایت از آن دارد که پوشش پلی یورتان پایه آب در محافظت از رنگ سطح در برابر پیری مؤثر عمل می‌کند.

که نشان می‌دهد سطح چوب بدون محافظ در مواجهه با عوامل پیرسازی دچار بالاترین میزان تغییر رنگ شده است. در مقابل، با افزایش ضخامت پوشش، مقدار  $\Delta E$  به‌طور قابل توجه کاهش یافته است؛ به‌گونه‌ای که تیمار با ضخامت



شکل ۶- مقدار تغییر رنگ ( $\Delta E$ ) ناشی از فرایند کهنگی تسریع‌شده در تیمارهای مختلف پوشش پلی یورتان پایه آب با ضخامت‌های متفاوت

**Figure 6. Color change value ( $\Delta E$ ) due to accelerated aging process in different treatments of water-based polyurethane with different thicknesses**

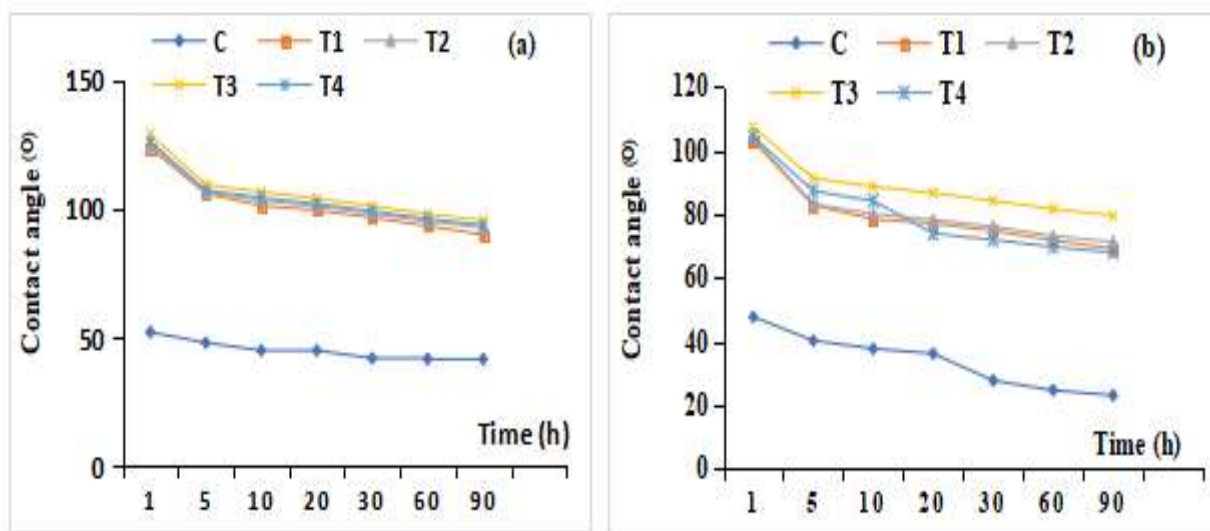
درجه داشتند که تا پایان آزمون به حدود ۹۰ درجه کاهش یافت. پس از اعمال فرایند کهنگی تسریع‌شده (شکل ب)، کاهش معنی‌داری در زاویه تماس مشاهده شد؛ به‌گونه‌ای که نمونه کنترل زاویه خود را تا حدود ۳۵ درجه کاهش داد و تیمارهای پوشش‌داده نیز کاهش یافتند. با این حال، تیمار T3، همچنان زاویه تماس بالا را حفظ کرد، در حالی که تیمارهای با ضخامت پایین‌تر مانند T1 و ضخامت بالا مانند T4 کاهش نشان دادند. این موضوع نشان می‌دهد که پوشش‌ها با ضخامت بالا بر اثر کهنگی دچار زبری و ریز ترک‌های سطحی می‌شود.

تر شوندگی سطح در شکل ۸ (الف و ب)، تغییرات زاویه تماس آب بر روی سطح نمونه‌های شاهد C و نمونه‌های پوشش‌داده شده با پلی اورتان (T1 تا T4) به مدت ۹۰ ثانیه، قبل (الف) و بعد (ب) از آزمون کهنگی تسریع‌شده، نشان داده شده‌اند. نتایج این داده‌ها گویای تفاوت بارز رفتار تر شوندگی در تیمارهای مختلف است. در حالت اولیه (شکل الف)، نمونه کنترل (C) فاقد پوشش، زاویه تماس پایینی در حدود ۴۱-۵۲ درجه را نشان داد که نشانه سطحی با خاصیت آب‌دوستی نسبی بود. در مقابل، نمونه‌های پوشش‌خورده (به‌ویژه T3 و T4 با ضخامت‌های بالاتر) زاویه تماس اولیه‌ای در حدود ۱۳۰



شکل ۷- تغییرات ظاهری در نمونه‌های پوشش داده‌شده و بدون پوشش، قبل (ردیف بالا) و بعد (ردیف پایین) کهنه‌سازی، با افزایش تدریجی ضخامت پوشش از راست (۷۵ میکرومتر) به چپ (۲۸۶ میکرومتر)

Figure 8. Appearance changes in coated and uncoated samples, before (top row) and after (bottom row) aging, with gradual increase in coating thickness from left (75 μm) to right (286 μm)



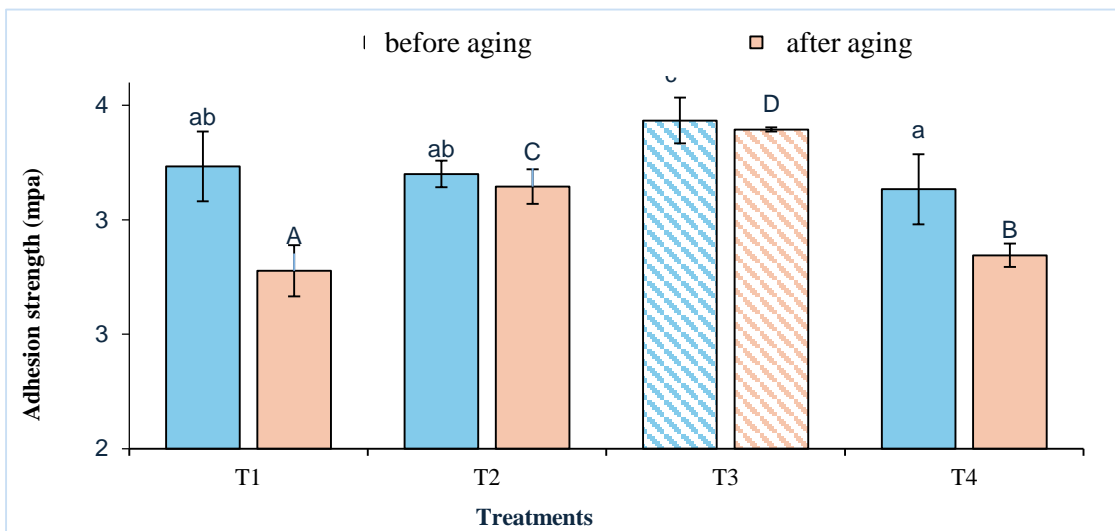
شکل ۸- تغییرات زاویه تماس قطره آب روی تیمارهای مختلف در بازه زمانی ۹۰ ثانیه، قبل (الف) و بعد (ب) از کهنگی تسریع شده

Figure 8. Changes in the contact angle of water drops on different treatments over a period of 90 seconds, before (a) and after (b) accelerated aging

از کهنگی میان تیمارها مشهود بود؛ به طوری که تیمار T3 بیشترین پایداری را نشان داد، در حالی که عملکرد تیمار T4 کاهش یافت اما همچنان بهتر از تیمارهای T1 و T2 باقی ماند. تیمار شاهد (بدون پوشش) شاخص مقاومت قابل مقایسه‌ای ندارد و حذف شده است. گروه بندی آماری به وضوح نشان می‌دهد که ضخامت پوشش بر عملکرد چسبندگی اثر معنادار دارد ( $P < 0.05$ ). در مقابل، افت عملکرد در تیمار با ضخامت بسیار بالا (T4) و تیمارهای بسیار نازک (T1) به دلایل مختلف قابل تبیین است.

### چسبندگی کششی

نتایج ارائه شده در شکل ۹، بیانگر مقادیر میانگین مقاومت به چسبندگی (Pull-off) برای پوشش‌های پلی‌یورتان پایه آب با ضخامت‌های متفاوت (T1 تا T4) قبل و بعد از کهنگی تسریع شده است. قبل از کهنگی، تیمار T3 (ضخامت میانه) بیشترین مقاومت چسبندگی (۳/۴۳ MPa) را نشان داد و با گروه بندی دانکن D از بقیه متمایز شد؛ در حالی که T1 کمترین مقدار بعد از کهنگی را به خود اختصاص داد. البته بعد از کهنگی، مقاومت همه تیمارها کاهش یافت. با این حال، تفاوت در میزان حفظ عملکرد پس



شکل ۹- مقاومت به چسبندگی پوشش پلی‌یورتان پایه آب با ضخامت‌های مختلف، قبل و بعد از کهنگی تسریع شده، حروف لاتین روی نمودار گروه بندی دانکن در سطح ( $P < 0.05$ ) را نشان می‌دهد.

Figure 10. Adhesion strength of water-based polyurethane with different film thicknesses, before and after accelerated aging.

The lowercase letters on the graph indicate Duncan's grouping at the significance level of  $P < 0.05$ .

درجه 4B تغییر یافت، یعنی پوسته‌های کوچکی از پوشش در تقاطع‌ها جدا شدند و تأثیری کمتر از ۵٪ سطح بود. در مقابل، تیمارهایی مانند T1 و T2 همچنان سطحی با درجه 5B را حفظ کرده‌اند؛ یعنی هیچ جداسازی قابل مشاهده‌ای در شبکه‌های خراش دیده نشد. به نحوی که نتایج چسبندگی باید در ارتباط با دیگر شاخص‌های اندازه‌گیری شده مانند زبری سطح و جذب آب سنجیده شود. پوششی که زبری پایین‌تر و جذب آب کمتری پس از کهنگی داشته باشد، احتمالاً

### چسبندگی خراشی

نتایج آزمون چسبندگی خراش (Cross-cut) بر روی تیمارهای مختلف (T1 تا T4) نشان داد که قبل از کهنگی، در سطح پوشش همه تیمارها، لبه‌های مربع‌ها کاملاً صاف بوده و هیچ‌یک از مربع‌های شبکه‌ای جدا نشده بودند (جدول ۴). به طوری که تمامی نمونه‌ها در درجه 5B ارزیابی شدند (جدول ۴). پس از کهنگی تسریع شده، در تیمارهایی با ضخامت بالاتر (T3 و T4)، کاهش عملکرد مشاهده شد و به

چسبندگی بهتری نیز خواهد داشت. در این پژوهش مشاهده شد تیماری که کمترین زبری پس از کهنگی را داشت (مثلاً،  $T_3$ ) بهترین مقاومت چسبندگی را ثبت کرد؛ این روند

جدول ۴- نتایج آزمون چسبندگی خراش برای پوشش‌های پلی‌یورتان پایه آب با ضخامت‌های مختلف قبل و بعد از کهنگی، استاندارد

**ASTM D3359**
**Table 4. Results of scratch adhesion test for water-based polyurethane coatings with different film thicknesses, before and after aging, according to ASTM D3359 standard**

NO	Treatments	Aging	Grading	Description
1	T1	Before aging	5B	The square edges are perfectly smooth, and None of the lattice squares are disconnected.
2		After aging	5B	
3	T2	Before aging	5B	
4		After aging	5B	
5	T3	Before aging	5B	Small flakes of the coating are dislodged at intersections, affecting less than 5% of the surface.
6		After aging	4B	
7	T4	Before aging	5B	The square edges are perfectly smooth, and None of the lattice squares are disconnected.
8		After aging	4B	Small flakes of the coating are dislodged at intersections, affecting less than 5% of the surface.

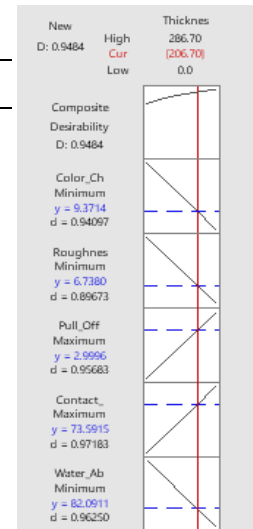
مقادیر تیمارهای آزمایشی نشان می‌دهد که ضخامت‌های پایین‌تر در تیمارهای T1 با ۷۵ میکرومتر با جذب آب و زبری بالا و ضخامت‌های بسیار بالا T4 با ضخامت ۲۸۶/۷ میکرومتر، با افت شدید در چسبندگی و افزایش  $\Delta E$  همراه هستند. این مسئله نشان می‌دهد که افزایش بیش‌ازحد ضخامت لزوماً موجب بهبود عملکرد نمی‌گردد، بلکه ممکن است به دلیل افزایش تنش‌های درونی و کاهش نفوذپذیری بخار، عملکرد مکانیکی و نوری پوشش تضعیف شود. در مقابل، ضخامت میانه نزدیک به ۲۱۰ میکرومتر توازنی مناسب میان خواص فیزیکی و شیمیایی ایجاد کرده است.

بهینه‌سازی ضخامت پوشش با رویکرد چندمعیاره نتایج تحلیل نشان داد که ضخامت بهینه پوشش برای رسیدن به بهترین تعادل عملکردی برابر با ۲۰۶/۷ میکرومتر است. در این مقدار، مطلوبیت ترکیبی برابر با ۰/۹۴۸۴ حاصل شد که نشان‌دهنده دستیابی به سطح بسیار مطلوبی از تمام خواص هدف‌گذاری شده است. به‌طور مشخص، در این ضخامت، مقدار جذب آب  $82 \text{ g/m}^2$ ، زاویه تماس  $75/19$  درجه، مقاومت به چسبندگی  $2/99 \text{ MPa}$ ، زبری سطح  $6/78$  و تغییرات رنگ  $9/37$  واحد گزارش گردید که همگی در محدوده‌های مطلوب قرار دارند. مقایسه این نتایج با

## جدول ۵- بهینه‌سازی چندهدفه برای تعیین ضخامت بهینه پوشش پلی‌اورتان پایه آب

**Table 5- Multi-objective optimization for determining the optimal thickness of water-based polyurethane coating.**

Parameter	Predicted Value	Goal Type	Desirability (d)
Color change ( $\Delta E$ )	9.37	Minimize	0.95
Surface roughness ( $\mu\text{m}$ )	6.78	Minimize	0.90
Adhesion (MPa)	2.99	Maximize	0.96
Contact angle ( $^\circ$ )	75.19	Maximize	0.98
Water absorption ( $\text{g}/\text{m}^2$ )	82.00	Minimize	0.97
Overall desirability			0.94


**بحث**

میان‌ه پوشش پلی‌اورتان مانند حدود ۲۱۰ میکرومتر (۹ دور پوشش‌دهی) در بسیاری از پژوهش‌ها به‌عنوان گزینه‌ای مناسب معرفی شده‌اند، مثلاً [Francis](#) (۲۰۱۹) نشان می‌دهد درحالی‌که پوشش‌های ضخیم‌تر عموماً محافظت بیشتری ایجاد می‌کنند، بهبود دوام در حدود ۲۵۰ میکرون (۱۰ میلی‌لیتر) برای سیستم‌های پوشش اتمسفری ثابت می‌ماند و ضخامت‌های تا حدودی بیشتر برای شرایط غوطه‌وری مفید است. این نشان‌دهنده یک محدوده ضخامت بهینه است که فراتر از آن مواد اضافی بازده کاهش را فراهم می‌کند. مطالعه [Tirumkudulu](#) و [Punati](#) (۲۰۲۰) تأکید می‌کند که لایه‌های خیلی ضخیم، در فرایند خشک‌شدن دچار تنش و لایه‌لایه شدن می‌شوند که می‌تواند به افت عملکرد چسبندگی و دوام نهایی بینجامد. ضخامت‌های بالاتر از ۲۰۰ میکرومتر مزایایی مانند مقاومت بالاتر به رطوبت و UV فراهم می‌کنند، اما در مقابل خطرهایی مانند ترک‌خوردگی را نیز در پی دارند. البته استفاده از روش دقیق اندازه‌گیری ضخامت با استریو میکروسکوپ، اعتبار علمی این پژوهش را تقویت می‌کند.

یافته‌های این پژوهش از نظر ضخامت پوشش با مدل‌های نظری فرایند پوشش‌دهی دورانی کاملاً هم‌خوانی دارد. بر اساس مدل [Scriven](#) (۱۹۸۸) ضخامت فیلم حاصل از پوشش‌دهی دورانی تابعی از پارامترهایی مانند ویسکوزیته پوشش، سرعت چرخش و تعداد دفعات اعمال است. افزایش تعداد دفعات اعمال منجر به افزایش پوشش تجمع یافته روی سطح می‌شود که در صورت خشک شدن مؤثر، منجر به افزایش ضخامت نهایی می‌گردد. [Mucci](#) و همکاران (۲۰۲۳) در مرور خود بر پوشش‌های پلی‌اورتان پایه آب، تأکید کرده‌اند که ضخامت کنترل‌شده کلیدی برای دستیابی به عملکرد نوری، مکانیکی و محیطی بهینه است. ضخامت‌های بالاتر به‌ویژه در سیستم‌های شفاف، نقش مهمی در افزایش براقیت و محافظت در برابر UV ایفا می‌کنند، مشروط به اینکه از یکنواختی پوشش اطمینان حاصل شود و از ترک‌خوردگی جلوگیری گردد. تحقیقات در مورد بهینه‌سازی ضخامت پوشش، ملاحظات مهمی را برای سیستم‌های پوشش محافظ آشکار می‌کند. از منظر فنی، ضخامت‌های

می‌دهد که کهنگی پوشش موجب زبری و ترک‌های سطحی در ضخامت‌های بالا می‌شود. تحلیل آماری دانکن نیز نشان داد که تیمارهای T3 و T4 (به ترتیب با ضخامت ۲۱۰ و ۲۸۶ میکرومتر) در یک گروه آماری جداگانه (b) قرار گرفتند، در حالی که تیمارهای با ضخامت کمتر در گروه a یا ab بودند. این موضوع بیانگر آن است که کنترل ضخامت پوشش، به‌ویژه در بازه ۱۲۰-۲۰۰ میکرومتر، نقش مؤثری در بهبود یکنواختی و کیفیت سطح ایفا کرده است. در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از پوشش پلی‌یورتان پایه آب با ضخامت‌های میانه تا زیاد (به‌ویژه ۲۱۰ تا ۲۸۶ میکرومتر) اگرچه موجب کاهش زبری اولیه سطح چوب می‌شود، اما در برابر کهنگی تسریع شده عملکرد محافظتی مطلوبی ندارد. این موضوع به‌ویژه در کاربردهای داخلی با چرخه‌های نوری و رطوبتی قابل توجه، اهمیت بیشتری دارد.

[Turgut](#) و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند که استفاده از پوشش رزینی محافظ، مقادیر  $\Delta E$  را در تمام مواد آزمایش‌شده افزایش می‌دهد. این یافته‌ها در مجموع از این فرضیه پشتیبانی می‌کنند که تغییرات ضخامت پوشش، خواص نوری سطح را از طریق تغییر در بازتاب نور و ویژگی‌های جذب تغییر می‌دهد. پوشش ضخیم‌تر ممکن است باعث ایجاد لایه‌های مترکم‌تری شود که خصوصیات اپتیکی چوب را تحت تأثیر قرار داده و به بروز تغییرات محسوس‌تری در پارامترهای رنگی منجر شود. نتایج حکایت از آن دارد که اگرچه افزایش ضخامت پوشش می‌تواند حفاظت بهتری از سطح ایجاد کند، اما با افزایش قابل توجه در  $\Delta E$  همراه است که ممکن است از منظر زیبایی‌شناختی در کاربردهای خاص چوب نامطلوب باشد.

از سوی دیگر، عملکرد بهتر پوشش‌های ضخیم‌تر را می‌توان به ایجاد یک سد فیزیکی قوی‌تر نسبت به نفوذ نور، رطوبت و گرما نسبت داد. فیلم ضخیم‌تر توانایی بیشتری دارد تا از نفوذ و تجزیه لیگنین و سایر ترکیبات رنگ‌زا جلوگیری کند که این موضوع با نتایج مطالعه [Slabejová](#) و همکاران (۲۰۲۳) مبنی بر کاهش  $\Delta E$  در پوشش‌های

افزایش ضخامت تا بیش از ۲۰۰ میکرومتر (T3) موجب کاهش قابل توجه از جذب آب شده است، به طوری که مقدار بیش از کهنگی ۴۱ و پس از کهنگی  $72 \text{ g/m}^2$  است. این نشان می‌دهد که ضخامت بیشتر پوشش پلی‌یورتان، مقاومت بالاتری در برابر رطوبت و کهنگی دارد. تیمار T4 پایین‌ترین میزان جذب آب را هم قبل ( $40 \text{ g/m}^2$ ) و هم بعد از کهنگی ( $70 \text{ g/m}^2$ ) نشان می‌دهد. باین‌حال، میزان جذب آب قبل از کهنگی تفاوت معناداری با پوشش‌های با ضخامت پایین‌تر (T3) ندارد. گرچه در زمان اولیه عملکرد بهتری دارد، اما ممکن است تحت تنش‌های ناشی از پیرسازی سریع (مانند ترک‌های ریز یا جداسدگی سطحی) قرار بگیرد. کهنگی تسریع شده باعث افزایش جذب آب در همه گروه‌ها شد که این موضوع به احتمال زیاد ناشی از ایجاد ریزترک‌ها و تنزل کیفیت پیوند سطحی پوشش است. مطابق با نتایج مطالعه [Mucci](#) و همکاران، (۲۰۲۳) که نشان داد پوشش‌های ضخیم‌تر مقاومت بهتری در برابر جذب آب دارند، اما در صورتی که فرایند خشک شدن کنترل نشده باشد یا مواد افزودنی به درستی فرموله نشده باشند، پوشش‌های ضخیم‌تر ممکن است در اثر کهنگی دچار ترک خوردگی شده و عملکردشان افت کند ([Mucci et al., 2024](#)). همچنین [Tomar](#) و همکاران (۲۰۲۰)، اشاره کرده‌اند که ضخامت بهینه پوشش باید به گونه‌ای انتخاب شود که توازن مناسبی میان خواص مانع‌سازی و انعطاف‌پذیری فراهم گردد که در پژوهش حاضر ضخامت بیش از ۲۰۰ میکرومتر (T3 & T4) چنین ویژگی‌ای را از خود نشان داده است.

کاهش زبری سطح در تیمارهای انجام شده با ضخامت‌های بیشتر (T3) را می‌توان به تشکیل فیلم یکنواخت، پرکننده خلل و فرج سطحی و ایجاد سد فیزیکی در برابر نفوذ رطوبت و تابش UV نسبت داد ([Yong et al., 2022](#)). علاوه بر این، مقدار زبری نسبی (R) نیز برای تیمارهای با ضخامت بالا بیشتر بود، به گونه‌ای که در تیمار T4، زبری نسبی به  $1/26$  افزایش یافت در حالی که این مقدار در ضخامت‌های پایین‌تر  $1/15$  اندازه‌گیری شد. این نشان

این مطالعه نیز منعکس شده است.

افزایش ضخامت تا مقدار متوسط (T3) می‌تواند منجر به پُر شدن کامل خلل و فرج سطح چوب، بهبود ترشوندگی اولیه و تثبیت بهتر لایه چسبنده شود؛ یافته‌ای که در مطالعه [Erdinler](#) (۲۰۱۹) نیز گزارش شده است؛ بنابراین، عملکرد قابل توجه T3 در این مطالعه، از منظر ساختاری قابل انتظار است. پوشش با ضخامت بیشتر ممکن است حاوی تنش‌های درونی بیشتر، مؤلفه انقباضی بالا هنگام خشک شدن و ضعف در چسبندگی میان‌لایه‌ای شود؛ موضوعی که در مطالعه [Gupta](#) (۲۰۱۶) درباره مقاومت چسبندگی پوشش‌های پلی‌یورتان با ضخامت‌های زیاد نیز مورد تأیید قرار گرفته است. از سوی دیگر، تیمارهای با ضخامت کمتر ممکن است نتوانند سطح زیرلایه را به‌طور یکنواخت بپوشانند و تحت شرایط محیطی ناهمگونی عملکرد نشان دهند. البته تأثیر کهنگی تسریع‌شده نیز کاملاً مشهود است. کاهش عمومی مقاومت چسبندگی پس از کهنگی امکان تخریب ساختار چسبنده، رطوبت، انبساط و انقباض زیرلایه و شکنندگی پیوند پوشش-لایه چوبی را نشان می‌دهد. این سازوکار در مطالعات دیگری نیز گزارش شده است. به‌طوری‌که [Jabbar](#) و همکاران (۲۰۲۳)، کاهش دوام عملکرد چسبندگی تحت تأثیر محیط را به‌عنوان یکی از نقاط ضعف پوشش‌ها معرفی کردند. این نتیجه با دیگر بخش‌های این پژوهش (مثلاً کاهش زبری سطح، افزایش زاویه تماس در ضخامت‌های متوسط) نیز همسو است و دیدگاه یکنواختی، انسجام فیلم و محافظت سطحی را تأیید می‌کند.

اگرچه در بسیاری از مطالعات به‌صورت موردی و بررسی تک پارامتر افزایش ضخامت موجب نتیجه مطلوب خواهد شد ([Gupta et al., 2016](#)). اما زمانی که به بررسی پارامترهای متعدد خواهیم پرداخت شرایط متفاوت خواهد بود. یافته‌های به‌دست‌آمده با نتایج مطالعات پیشین هم‌راستا هستند، که گزارش کردند ضخامت‌های بین ۲۰۰ تا ۲۵۰ میکرومتر در پوشش‌های پایه آبی بر پایه پلی‌یورتان، بهبود معنی‌داری در مقاومت به رطوبت، دوام نوری و خواص سطحی

با ضخامت بیشتر همخوانی دارد. در آن مطالعه، افزایش ضخامت فیلم پوششی روی چوب‌های مختلف منجر به کاهش چشمگیر در تغییرات رنگ هنگام قرارگیری در معرض نور و محیط داخلی شد. [Özgenç](#) و همکاران (۲۰۱۹) گزارش کردند که افزایش ضخامت پوشش می‌تواند پس از هوازدگی/کهنگی موجب بهبود ثبات رنگ و کاهش  $\Delta E$  شود. نتایج این پژوهش نیز در شرایط پس از کهنگی تسریع‌شده (شکل ۶) نشان داد که تیمارهای با ضخامت بیشتر،  $\Delta E$  پایین‌تری نسبت به ضخامت‌های کمتر دارند. از سوی دیگر، لازم است به این نکته توجه شود اگرچه ضخامت بالا مزیت‌هایی دارد اما ممکن است مشکلات جانبی نیز به دنبال داشته باشد؛ برای نمونه، مطالعه [Sahin](#) و همکاران (۲۰۲۳) تأکید دارد که در شرایط پیری مصنوعی شدید، حتی پوشش‌های ضخیم‌تر نیز با افزایش زبری یا تخریب سطحی مواجه شده‌اند که این موضوع می‌تواند در بلندمدت به افزایش  $\Delta E$  منجر گردد؛ بنابراین، انتخاب ضخامت بهینه باید میان دستیابی به محافظت بالا و اجتناب از معایب احتمالی، متوازن باشد.

مطابق با نتایج پژوهش [Gibbons](#) و همکاران (۲۰۲۰)، زاویه تماس قطره‌های آب یکی از شاخص‌های کلیدی در ارزیابی کارایی پوشش‌های ضدآب است و پوشش‌هایی با زاویه تماس بیش از ۹۰ درجه به‌عنوان آب‌گریز طبقه‌بندی می‌شوند. این روند به‌روشنی نشان می‌دهد که اعمال پوشش موجب افزایش زاویه تماس و کاهش ترشوندگی سطح می‌شود، موضوعی که مطابق با یافته‌های پیشین [Chang](#) و همکاران (۲۰۱۵) درباره اصلاح هیدروفوب سطح چوب است. گروه‌بندی مشاهده‌شده در نمودار نیز حکایت از آن دارد که ضخامت پوشش عامل تعیین‌کننده در پایداری زاویه تماس و مهار ترشوندگی در شرایط کهنگی است. مطابق با مطالعات [Mucci](#) و همکاران (۲۰۲۳)، پوشش‌های بر پایه آب با ضخامت مناسب و چسبندگی مناسب می‌توانند حتی پس از مواجهه با شرایط سخت عمرانی، زاویه تماس بالاتر از آستانه ۹۰ درجه را حفظ نمایند؛ چیزی که در تیمار T3

رنگ پس از کهنگی تسریع شده داشتند، اما به دلیل ایجاد تنش‌های داخلی ناشی از ضخامت بیش از حد، در آزمون‌های چسبندگی عملکرد ضعیف‌تری نسبت به لایه‌های میانی داشتند. به‌طور کلی، تحلیل بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از نرم‌افزار Minitab نیز نشان داد که ضخامت حدود ۲۰۶ میکرومتر (معادل با ۸-۹ دور پوشش) بهترین توازن را میان پارامترهای عملکردی مختلف ایجاد می‌کند. این تیمار نه تنها توانست عملکرد بهینه‌ای را در طول کهنگی ارائه دهد، بلکه از نظر زیبایی‌شناسی، سازگاری با محیط‌زیست (به دلیل پایه آبی بودن پلی‌یورتان) و کاربرد صنعتی نیز قابل توجه بود. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که کنترل دقیق ضخامت پوشش در فرایندهای پوشش‌دهی، به‌ویژه با استفاده از روش‌های نوین مانند اسپین‌کوت، نقش کلیدی در بهبود کارایی عملکردی و دوام چوب‌های تیمار شده دارد و می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر در صنایع چوب، مبلمان و حفاظت آثار چوبی تاریخی استفاده شود.

ایجاد می‌کنند، بدون آن‌که موجب ایجاد ترک یا جدایش شوند (Karbalaee *et al.*, 2021; Šmidriaková *et al.*, 2022).

#### نتیجه‌گیری

این پژوهش به‌طور جامع به بررسی تأثیر ضخامت پوشش پلی‌یورتان پایه آب بر خواص عملکردی سطح چوب راش با استفاده از روش پوشش‌دهی دورانی پرداخت. نتایج نشان داد که افزایش تعداد دفعات پوشش‌دهی (۳ تا ۱۲ دور)، منجر به افزایش ضخامت فیلم از حدود ۷۵ تا ۲۸۶ میکرومتر شد و این افزایش ضخامت به‌صورت معناداری بر ویژگی‌های فیزیکی، سطحی و مکانیکی نمونه‌ها تأثیر گذاشت. ضخامت‌های بالاتر باعث کاهش قابل توجه جذب آب سطحی، بهبود خاصیت آب‌گریزی (افزایش زاویه تماس قطره)، حفظ بهتر رنگ و براقیت و کاهش زبری سطح شدند. از نظر مقاومت مکانیکی، نمونه‌های با ضخامت متوسط (حدود ۲۱۰ میکرومتر) بهترین چسبندگی را در آزمون پول‌آف و خراش نشان دادند. با این حال، ضخامت‌های بسیار بالا گرچه مزایای بیشتری در ممانعت از نفوذ آب و ثبات

## References

- Cogulet, A., Blanchet, P. and Landry, V., 2018. The multifactorial aspect of wood weathering: a review based on a holistic approach of wood degradation protected by clear coating. *BioResources*, 13(1):2116-2138. <https://doi.org/10.15376/biores.13.1.Cogulet>
- Chang, H., Tu, K., Wang, X. and Liu, J., 2015. Fabrication of mechanically durable superhydrophobic wood surfaces using polydimethylsiloxane and silica nanoparticles. *Rsc Advances*, 5(39), 30647-30653. <https://doi.org/10.1039/C5RA03070F>
- Derome, D., Rafsanjani, A., Patera, A., Guyer, R. and Carmeliet, J., 2012. Hygromorphic behaviour of cellular material: hysteretic swelling and shrinkage of wood probed by phase contrast X-ray tomography. *Philosophical Magazine*, 92(28-30), 3680-3698. <https://doi.org/10.1080/14786435.2012.715248>
- Erdinler, E. S., Koc, K. H., Dilik, T. and Hazir, E., 2019. Layer thickness performances of coatings on MDF: Polyurethane and cellulosic paints. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 21(3), 317-326. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2019005000304>
- Francis, R. A., 2019. Dry Film Thickness: Is More Coating Always Better?. In *Coatings+ 2019* (pp. 1-8). Association for Materials Protection and Performance. <https://doi.org/10.5006/S2019-00019>
- Gibbons, M. J., Nikafshar, S., Saravi, T., Ohno, K., Chandra, S. and Nejad, M., 2020. Analysis of a wide range of commercial exterior wood coatings. *Coatings*, 10(11), 1013. <https://doi.org/10.3390/coatings10111013>
- Gupta, S., John, A. and Kumar, V. S., 2016. Studies on effect of coat thickness on the moisture uptake by a hardwood substrate. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 18(3), 443-456. <https://doi.org/10.4067/S0718221X2016005000040>
- Hon, D. N. S., Chang, S. T. and Feist, W. C., 1985. Protection of wood surfaces against photooxidation. *Journal of Applied Polymer Science*, 30(4), 1429-1448. <https://doi.org/10.1002/app.1985.070300410>
- Jabbar, M., Adnan, M., Shaker, K., Abdullah, T., Nawab, Y., Hussain, R. and Malik, A. U., 2023. Strength and durability that last Mechanical properties of polyurea and polyurethane coated composites. *Polymer Composites*, 44(7), 4324-4335. <https://doi.org/10.1002/pc.27412>
- Karbalaeei, H., Taremiyan, A., Rasouli, D. and Pourmahdian, S., 2021. The use of UV curing epoxy-acrylate and urethane-acrylate coatings for improving the weathering resistance of wood. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 28(1), 115-132. <https://doi.org/10.22069/jwfst.2021.18638.1903>
- Li-ying, W. A. N., Bo, Z. H. A. N. G., Qing, Z. H. A. O., Yun-ying, W. A. N. G., & Jiang-yan, M. E. N. G. (2007). Study on the artificially-accelerated aging behavior of PU coating. *Journal of Nanchang Hangkong University (Natural science edition)*, 21(1), 52-56.
- Liu, C. and Xu, W. 2022. Effect of Coating Process on Properties of Two-Component Waterborne Polyurethane Coatings for Wood. *Coatings*, 12(12), 1857. <https://doi.org/10.3390/coatings12121857>
- Liu, X., Hong, W. and Chen, X., 2020. Continuous production of water-borne polyurethanes: A review. *Polymers*, 12(12), 2875. <https://doi.org/10.3390/polym12122875>
- Madhavi, G., Kishan, N. and Raghavendra, C. R., 2022. A review on recent approaches in the field of surface coating. *Materials Today: Proceedings*, 52, 403-406. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.075>
- Marais, B. N., Brischke, C. and Militz, H., 2022. Wood durability in terrestrial and aquatic environments—A review of biotic and abiotic influence factors. *Wood Material Science & Engineering*, 17(2), 82-105. <https://doi.org/10.1080/17480272.2020.1779810>
- Mastouri, A., Efhamisisi, D., Tarmian, A., Esposito Corcione, C. and Gholinejad Pirbazari, A., 2025. Silanes for conservation of archaeological woods using modeled birch wood: antifungal, physical-chemical and TGA studies. *Scientific Reports*, 15(1), 28815. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-14167-w>
- Molina, M. T., Cano, E. and Ramírez-Barat, B., 2023. Testing protective coatings for metal conservation: the influence of the application method. *Heritage Science*, 11(1), 94. <https://doi.org/10.1186/s4049402300937-0>
- Mucci, V. L., Hormaiztegui, M. E., Amalvy, J. I. and Aranguren, M. I., 2024. Formulation, structure and properties of waterborne polyurethane coatings: a brief review. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 38(4), 489-516. <https://doi.org/10.1080/01694243.2023.2240587>
- Mustafa, H. A. M. and Jameel, D. A., 2021. Modeling and the main stages of spin coating process: A review. *Journal of Applied Science and Technology Trends*, 2(02), 119-123. <https://doi.org/10.38094/jastt203109>
- Ozdemir, T. and Hiziroglu, S., 2009. Influence of surface roughness and species on bond strength between the wood and the finish. *Forest Products*

- Journal, 59(6), 90-95. <https://doi.org/10.1080/17480272.2023.2269138>
- Özgenç, Ö, Durmaz, S., Kuştaş, S. and Bilici, E., 2021. Durability in outdoor conditions of coating systems based on waterborne acrylic resin with commercial UV absorber and tree bark extract. *Drewno. Prace Naukowe. Doniesienia. Komunikaty*, 64(207), 111-124. <https://hdl.handle.net/20.500.12809/9432>
- Ružinská, E., Mitterová, I. and Zachar, M., 2014. Evaluation of thermal degradation of wood with environmentally problematic application of coatings. *Advanced materials research*, 1001, 300-305. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1001.300>
- Sahin, S., Esteves, B., Can, A., Sivrikaya, H., Domingos, I., Ferreira, J. and Ayata, Ü, 2023. Effects of artificial weathering on the surface properties of coated radiata pine. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 25. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2023000100429>
- Scrinzi, E., Rossi, S., Deflorian, F. and Zanella, C., 2011. Evaluation of aesthetic durability of waterborne polyurethane coatings applied on wood for interior applications. *Progress in Organic Coatings*, 72(1):81-87. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2011.03.013>
- Scriven, L. E., 1988. Physics and applications of dip coating and spin coating. *MRS Online Proceedings Library*, 121(1), 717-729. <https://doi.org/10.1557/PROC-121-717>
- Slabejová, G., Vidholdová, Z. and Šmidriaková, M., 2023. Effect of Two Different Ageing Exposures on the Colour Stability of Transparent Polyurethane Finishing. *Polymers*, 15(15), 3313. <https://doi.org/10.3390/polym15153313>
- Šmidriaková, G. and Slabejová, G., 2022. The effect of coating film thickness on the quality of surface finish on lightweight plywood. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*, 64(1):39-58. <https://doi.org/10.17423/afx.2022.64.1.04>
- Tirumkudulu, M. S. and Punati, V. S., 2022. Solventborne polymer coatings: Drying, film formation, stress evolution, and failure. *Langmuir*, 38(8), 2409-2414. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.1c03124>
- Tomar, B. S., Shahin, A. and Tirumkudulu, M. S., 2020. Cracking in drying films of polymer solutions. *Soft Matter*, 16(14), 3476-3484. <https://doi.org/10.1039/C9SM02294E>
- Turgut, S., Bağış, B., Korkmaz, F. M. and Tamam, E., 2014. Do surface treatments affect the optical properties of ceramic veneers? *The Journal of prosthetic dentistry*, 112(3), 618-624. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2014.04.001>
- Viitanen, H. and Ritschkoff, A. C., 2011. Coating and surface treatment of wood. In *Fundamentals of mold growth in indoor environments and strategies for healthy living* (pp. 463-488). Wageningen Academic. [https://doi.org/10.3920/978-90-8686-722-6\\_17](https://doi.org/10.3920/978-90-8686-722-6_17)
- Yong, Q., Chang, J., Liu, Q., Jiang, F., Wei, D. and Li, H., 2020. Matt polyurethane coating: correlation of surface roughness on measurement length and gloss. *Polymers*, 12(2), 326.