



University of Tehran

Effect of oil heat treatment on weathering resistance of poplar wood

Maryam Haseli¹ | Davood Efhamsisi² | Ali Abdulkhani³ | Reza Oladi⁴

1. Department of Wood and Paper Sciences and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: mariam.haseli@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Wood and Paper Sciences and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: efhami@ut.ac.ir
3. Department of Wood and Paper Sciences and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: abdolkhani@ut.ac.ir
4. Department of Wood and Paper Sciences and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: oladi@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:

Research Article

Article History:

Received: 16 January 2024

Revised: 21 April 2024

Accepted: 27 April 2024

Published online: 04 June 2024

Keywords:

Contact angle,
Heat treatment,
Poplar wood,
Soybean oil,
Weathering.

ABSTRACT

Different methods have been developed for the heat treatment of wood. Oil heat treatment (OHT), as a unique method, can provide a dry and oxygen-free heating medium. This study used a pilot-scale oil heat treatment to treat poplar wood at different temperatures to enhance its weathering resistance. Poplar timber was subjected to oil heat treatment using a specific heating program at three target temperatures (180, 190, and 200 °C), each held for two hours. The specimens were prepared and subjected to 1000 hours of accelerated weathering with a Gardner wheel. Water absorption and volumetric swelling were also determined during seven days of soaking in water. Contact angle measurements of water droplets, colorimetry, and ATR-FTIR analysis were also conducted before and after weathering. The dimensional stability of treated wood increased with higher processing temperature. Although the water absorption values of treated wood were lower than those of the control specimens, the difference was not significant. The samples exhibited an obvious color difference before weathering due to oil heat treatment, but their color changed to silver-gray tans after weathering. The maximum ΔE value after weathering was observed in the samples treated at 200 °C. Weathering increased the wettability of wood surfaces, but the treated samples still had a higher water droplet contact angle than those of the control sample. ATR-FTIR results determined that oil heat treatment is not an effective method for preventing the degradation of lignin in wood surface exposed to weathering factors.

Cite this article: Haseli, M., Efhamsisi, D., Abdulkhani, A., Oladi, R. (2024). Effect of oil heat treatment on weathering resistance of poplar wood. *Journal of Forest and Wood Products*, 77 (1), 55-71. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwpp.2024.371195.1279>



© The Author(s) **Publisher:** The University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwpp.2024.371195.1279>



تأثیر تیمار روغن گرمایی بر مقاومت به هواز دگی چوب صنوبر

مریم حاصلی^۱ | داود افهامی سیسی^{۲*} | علی عبدالخانی^۳ | رضا اولادی^۴

۱. گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: mariam.haseli@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: efhami@ut.ac.ir
۳. گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: abdolkhani@ut.ac.ir
۴. گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: oladi@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

روش‌های مختلفی برای تیمار حرارتی چوب، توسعه یافته و تجاری‌سازی شده‌اند. در میان آنها تیمار روغن گرمایی روش منحصر به فردی است که محیط حرارت‌دهی خشک و عاری از اکسیژن را فراهم می‌کند. در این مطالعه، از یک روش نیمه‌صنعتی برای تیمار روغن گرمایی الوار چوب صنوبر در دماهای مختلف به منظور افزایش مقاومت به هواز دگی آن استفاده شد. الوارهای چوبی طی یک برنامه حرارت‌دهی معین در سه دمای هدف مختلف (۱۸۰، ۱۹۰ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد) با زمان ماند ۲ ساعت تیمار شدند. سپس نمونه‌های آزمونی از آنها تهیه شده و در معرض ۱۰۰۰ ساعت هواز دگی تسریع شده با چرخ‌گردن قرار گرفتند. جذب آب و واکنش‌دهی ابعاد نمونه‌ها نیز طی هفت روز غوطه‌وری در آب مورد بررسی قرار گرفت. آزمون‌های اندازه‌گیری زاویه تماس قطره آب، رنگ‌سنجی و آنالیز ATR-FTIR قبل و بعد از هواز دگی انجام شد. نمونه‌های تیمار شده، همکشی‌دهی حجمی کمتری نسبت به نمونه شاهد داشتند و با افزایش دمای حرارت‌دهی بر کارایی ضد واکنش‌دهی افزود شد. میزان جذب آب نمونه‌های تیمار شده گرچه کمتر از نمونه شاهد بود اما تفاوتی بین تیمارهای مختلف مشاهده نشد. با آنکه قبل از هواز دگی، نمونه‌ها به دلیل تیمار روغن گرمایی با یکدیگر تفاوت رنگی آشکاری داشتند اما بعد از هواز دگی، رنگ سطح همه آنها به خاکستری تا نقره‌ای فام تغییر یافت. بیشترین میزان تغییرات رنگ مربوط به تیمار در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد بود. هواز دگی باعث افزایش ترشوندگی سطح نمونه‌ها شد، اما کماکان نمونه‌های تیمار شده زاویه تماس قطره آب بالاتری نسبت به نمونه شاهد داشتند. نتایج ATR-FTIR نشان داد که تیمار روغن گرمایی روشی مؤثری برای حفاظت از لیگنین سطح چوب در معرض عوامل هواز دگی نمی‌باشد.

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۳/۱۵

کلیدواژه:

تیمار حرارتی،

چوب صنوبر،

روغن سویا،

زاویه تماس،

هواز دگی.

استناد: حاصلی، مریم؛ افهامی سیسی، داود؛ عبدالخانی، علی؛ اولادی، رضا (۱۴۰۳). تأثیر تیمار روغن گرمایی بر مقاومت به هواز دگی چوب صنوبر. نشریه جنگل و فرآورده‌های

چوب، ۷۷ (۱)، ۵۵-۷۱. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2024.371195.1279>

۱. مقدمه

استفاده از چوب درختان دست کاشت به دلیل کاهش جنگل‌های طبیعی و محدود شدن استفاده از چوب درختان جنگلی اهمیت فزاینده‌ای در صنایع چوب پیدا کرده‌اند. بنابراین، صنوبر به‌عنوان یکی از مهمترین گونه‌های تند رشد و با توجه به دوره بهره‌برداری کوتاه‌مدت می‌تواند نقش مهمی در تأمین منابع چوبی و کاهش فشار بر جنگل‌های طبیعی ایفا کند [۱، ۲]. با این حال، چوب این گونه، ثبات ابعادی کمی داشته و در معرض تغییرات رطوبتی مستعد اعوجاج و تابیدگی است. بنابراین، استفاده از این ماده در ساخت سازه‌های چوبی در تماس با رطوبت محدود است.

در سال‌های گذشته روش‌های اصلاحی متنوعی برای بهبود ویژگی‌های مختلف چوب مانند ثبات ابعاد در برابر تغییرات رطوبت، افزایش مقاومت در برابر تنش‌های مکانیکی، بهبود دوام زیستی در برابر قارچ و حشرات چوب‌خوار و افزایش مقاومت به هوازدگی توسعه یافته‌اند. از متداول‌ترین روش‌های حفاظت چوب، اشباع آن با مواد شیمیایی مختلف با ماهیت سمی است. امروزه، استفاده از این مواد به دلیل اثر منفی بر سلامتی انسان و محیط‌زیست محدود شده است [۳]. اصلاح حرارتی یکی از روش‌های دوست‌دار محیط‌زیست و جایگزین حفاظت شیمیایی چوب است [۴-۵]. در این روش، چوب اغلب در دمای ۱۸۰ تا ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد اصلاح حرارتی شده و با تغییر خواص فیزیکی و شیمیایی، پایداری ابعاد و دوام زیستی آن افزایش می‌یابد [۳]. طی این فرآیند، ساختار شیمیایی اجزای چوب تغییر یافته و با تجزیه حرارتی همی سلولزها، رفتار نپذیری چوب کاهش می‌یابد که موجب ثبات ابعاد بیشتر چوب می‌شود [۶].

روش‌های مختلفی برای تیمار حرارتی چوب وجود دارد که تفاوت اساسی بین این روش‌ها در محیط حرارت‌دهی است. محیط‌های حرارت‌دهی مختلفی شامل بخار آب، آب، خلاء، گازهای خنثی و روغن‌های مختلف گیاهی، معدنی و پارافین تاکنون برای تیمار حرارتی چوب، بررسی و در برخی موارد تجاری‌سازی شده‌اند [۳، ۷، ۸]. تفاوت در محیط حرارت‌دهی می‌تواند در نتیجه نهایی مؤثر باشد. تیمار حرارتی چوب در بخار آب یا آب در مقایسه با حرارت‌دهی در محیط خشک، باعث واکنش‌های تخریبی شدیدتری در پلیمرهای دیواره سلول‌های چوبی می‌شود. همچنین حرارت‌دهی چوب در محیطی با اکسیژن زیاد منجر به واکنش‌های اکسیداسیونی مخرب شده که نتیجه آن افت شدید مقاومت‌های مکانیکی چوب است [۳، ۷، ۹].

در بین روش‌های تیمار حرارتی چوب، حرارت‌دهی در روغن‌های گیاهی مزایای بیشتری برای اصلاح حرارتی چوب دارد. در تیمار روغن گرمایی می‌توان از انواع روغن‌های گیاهی شامل سویا، کلزا، بزرک (کنان)، آفتابگردان و پالم استفاده کرد [۹]. حرارت‌دهی در روغن‌های گیاهی محیطی خشک و عاری از اکسیژن برای حرارت‌دهی چوب فراهم می‌سازد. از طرف دیگر ماهیت آب‌گریز روغن هم‌سو با تجزیه حرارتی همی سلولزها می‌تواند بر کاهش هرچه بیشتر نپذیری چوب کمک کند. روغن داغ با انتقال حرارت سریع و یکنواخت به چوب، دسترسی اکسیژن به چوب را محدود کرده و تخریب اکسیداسیونی اجزای دیواره سلول‌های چوبی را کاهش می‌دهد [۱۰، ۱۱]. در نتیجه، حرارت‌دهی چوب در داخل روغن‌های گیاهی با یکسان در نظر گرفتن همه شرایط نسبت به سایر روش‌های تیمار حرارتی باعث افت کمتر ویژگی‌های مکانیکی می‌شود [۱۲].

عملکرد چوب در برابر هوازدگی پدیده‌ای پیچیده است که تحت تأثیر عوامل مختلف اقلیمی، تشعشعات خورشیدی، آلودگی هوا و میکروارگانیسم‌های زنده قرار دارد. عملکرد چوب‌های تیمار حرارتی شده در برابر هوازدگی بارها مورد بررسی قرار گرفته است. به‌طور کلی، نتایج پژوهش‌ها نشان داده‌اند که چوب‌های تیمار حرارتی شده اگرچه دوام زیستی بالاتری دارند و به دلیل ثبات ابعاد بالاتر کمتر دچار اعوجاج و تابیدگی می‌شوند، اما خاکستری‌شدن سطح چوب به دلیل جذب طیف فرابنفش نور خورشید کماکان وجود خواهد داشت [۱۳].

تفاوت‌های ساختاری در بین گونه‌های چوبی ممکن است بر عملکرد آنها در فضای باز مؤثر باشد. از این‌رو، مطالعه روی گونه‌های چوبی مختلف، تحت تأثیر تیمار حرارتی و عملکرد آنها در کاربردهای بیرون از ساختمان ضروری است. تأثیر تیمار روغن گرمایی بر خواص فیزیکی و شیمیایی چوب در سال‌های گذشته بارها مورد بحث قرار گرفته است، اغلب این تحقیقات در مقیاس آزمایشگاهی بوده و تفاوت‌های عمده‌ای در روش تیمار حرارتی دارند. در برخی تحقیقات از روش تانک گرم و سرد [۱۴] و یا خنک‌سازی داخل روغن داغ [۴، ۵] برای تیمار روغن گرمایی چوب استفاده شده است که چوب تا حدی زیادی با روغن آغشته

می‌شود. با این روش، مقدار زیادی روغن در فاز خنک‌سازی جذب چوب می‌شود که باعث چسبناکی سطح آن شده و یا در تابستان‌های گرم مشکل نشت روغن از چوب وجود خواهد داشت. در برخی دیگر از روش‌ها، چوب بلافاصله بعد از حرارت‌دهی از روغن داغ بیرون کشیده شده و در محیط پیرامون خنک‌سازی می‌شود که با حداقل جذب روغن همراه است [۱۵]. در این روش، اگرچه جذب روغن بسیار کم و کنترل شده است اما قرارگیری ناگهانی چوب داغ در محیط پیرامون، می‌تواند باعث احتراق چوب و واکنش‌های تخریبی اکسیداسیونی شود.

اگرچه ویژگی‌های گونه‌های مختلف چوب با استفاده از تیمار روغن گرمایی در مطالعات گذشته مورد بررسی قرار گرفته است، اما در این مطالعه از یک روش نیمه‌صنعتی توسعه یافته در داخل کشور برای تیمار روغن گرمایی استفاده شده است که هدف آن جذب کنترل شده روغن و در نهایت خنک‌سازی چوب با استفاده از اسپری بخار آب پس از تخلیه روغن داغ است. توسعه روش‌های آزمایشگاهی و تبدیل آنها به مقیاس نیمه‌صنعتی و صنعتی با پیچیدگی‌های زیادی همراه است که می‌تواند روی ویژگی‌های محصول خروجی اثرگذار باشد. این پژوهش، بخشی از یک مطالعه گسترده روی ویژگی‌های مختلف چوب صنوبر حرارت‌دهی شده با تیمار روغن گرمایی در مقیاس نیمه‌صنعتی با استفاده از روغن سویا در سه دمای ۱۸۰، ۱۹۰ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد است. مطالعه بر روی گونه‌های بومی کشور و بهبود کیفیت آنها با استفاده از روش‌های دوست‌دار محیط‌زیست می‌تواند کاربردهای جدیدی را برای آنها توسعه دهد. در تحقیق حاضر، برخی ویژگی‌های فیزیکی و عملکرد چوب صنوبر روغن گرمایی شده در برابر هوازگی تسریع شده بررسی شده است.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. مواد اولیه

در این پژوهش از چوب صنوبر (*Populus alba*) خریداری شده در شهرستان کرج استفاده شد. الوارهای صنوبر با ابعاد اسمی (مماسی) 30×7 (شعاعی) $\times 7$ (طول) 220 سانتی‌متر مکعب پیش از تیمار حرارتی تا رطوبت $10 \pm 2/26$ درصد هوا خشک شدند. روغن گیاهی سویا از شرکت کشت و صنعت شمال خریداری و برای تیمار حرارتی استفاده شد. پس از تیمار حرارتی الوارهای صنوبر، نمونه‌های آزمونی مطابق با استانداردهای مربوطه تهیه شدند.

۲-۲. فرآیند تیمار روغن گرمایی

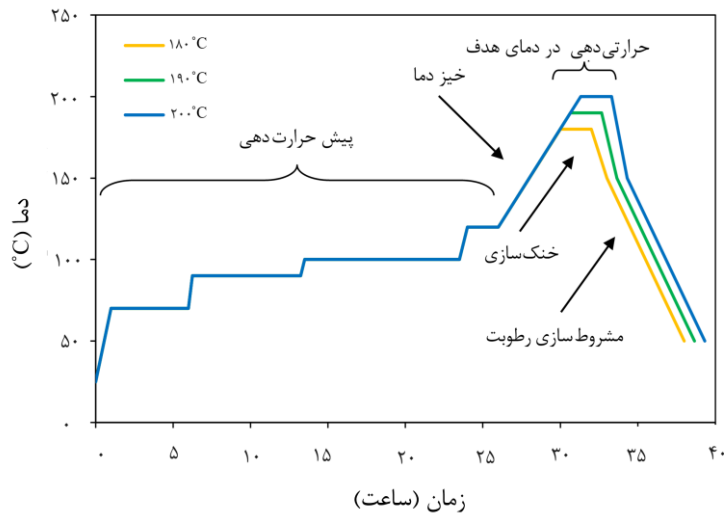
تیمار روغن گرمایی الوارهای صنوبر در کوره نیمه‌صنعتی طراحی شده توسط شرکت دانش‌بنیان حفاظت‌گران چوب پارس و در سه دمای ۱۸۰، ۱۹۰ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، به مدت دو ساعت انجام گرفت. برنامه حرارت‌دهی استفاده شده دارای سه مرحله بود (شکل ۱). (۱) پیش حرارت‌دهی: مدت زمان این بخش از برنامه حدود ۲۶ ساعت بود که با هدف خشک کردن کامل چوب تا دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد؛ (۲) حرارت‌دهی در دمای هدف: در این مرحله، دما با نرخ $0/25$ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه افزایش یافته و بعد از رسیدن به دمای هدف به مدت دو ساعت حرارت‌دهی انجام شد؛ (۳) تخلیه سیلندر و مشروط‌سازی رطوبتی: در این مرحله، روغن داغ بلافاصله با کمک یک پمپ از کوره حرارت‌دهی تخلیه شده و پس از بسته شدن دریچه خروج مواد، برای خنک‌سازی و متعادل سازی رطوبت از تزریق بخار آب استفاده شد.

۲-۳. اندازه‌گیری تغییرات وزن نمونه‌ها

تعداد ۱۰ نمونه با ابعاد $450 \times 5 \times 5$ سانتی‌متر مکعب برای اندازه‌گیری تغییرات وزن نمونه‌ها استفاده شدند. بدین‌منظور، ابتدا نمونه‌ها با ترازوی با دقت $0/01$ گرم توزین شده و در اجاق (آون) با دمای 103 ± 2 درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت خشک شدند (W_0). پس از فرآیند تیمار نیز فرآیند خشک شدن دوباره تکرار و وزن پس از تیمار توزین شد (W_1). درصد تغییرات وزن ($WC\%$) بر مبنای وزن اولیه، طبق رابطه ۱ محاسبه شد.

$$WC (\%) = ((W_1 - W_0) / W_0) \times 100$$

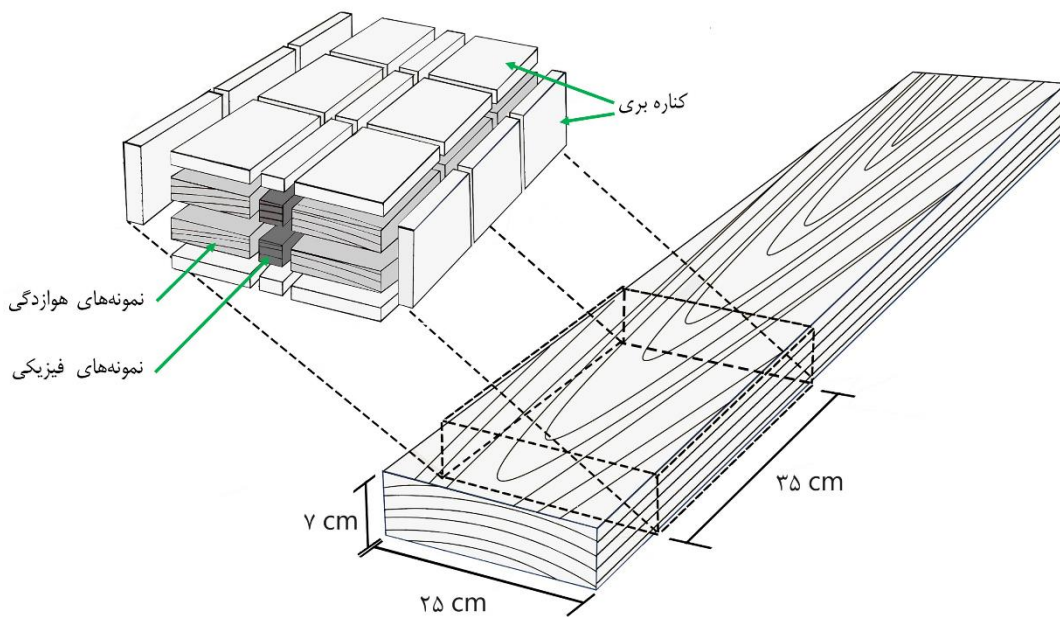
رابطه ۱)



شکل ۱. برنامه زمان-دما برای فرآیند تیمار روغن گرمایی چوب صنوبر در سه دمای هدف

۲-۴. نمونه گیری

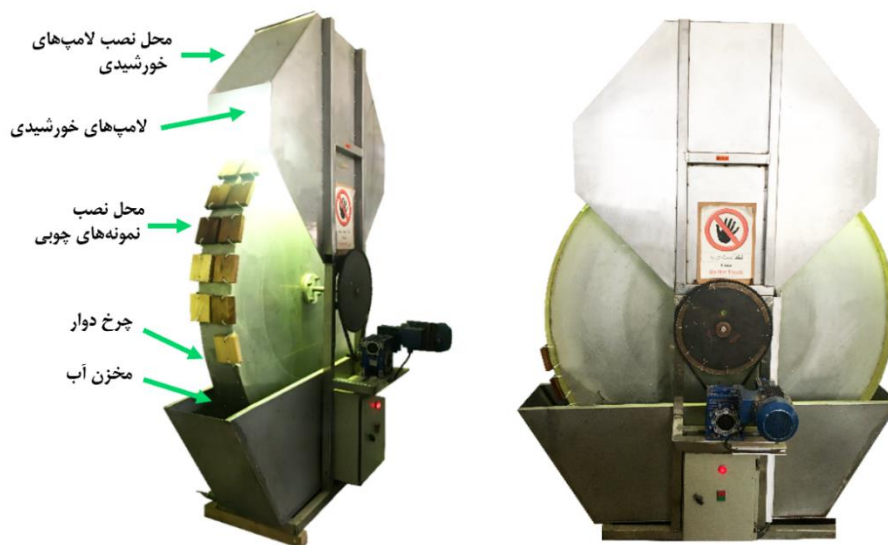
به منظور بررسی عملکرد چوب در برابر هوازدگی از هر یک از الوارهای تیمار شده و شاهد با ابعاد سانتی متر مکعب $220 \times 30 \times 7$ تعداد شش نمونه با الگوی برش بینایی (زاویه حلقه‌های سالانه ۵ تا ۴۵ درجه) و عاری از هر گونه پوسیدگی، ترک و یا گره با ابعاد اسمی سانتی متر مکعب (ضخامت) $2 \times (عرض) 10 \times (طول) 12$ طبق الگوی نمایش داده شده در شکل ۲ تهیه شد. برای اندازه‌گیری برخی از ویژگی‌های فیزیکی مانند جذب آب و همکشیدگی حجمی نیز تعداد ۱۰ نمونه با ابعاد سانتی-متر مکعب (مماسی) $2 \times (شعاعی) 2 \times (طول) 3$ تهیه شد. سطح نمونه‌ها ابتدا با استفاده از سنباده زبر (مش ۱۰۰، ۱۲۰ و ۱۵۰) و سپس با استفاده از سنباده نرم (مش ۱۸۰) آماده‌سازی شد.



شکل ۲. نحوه برش نمونه‌ها برای آزمون‌های فیزیکی و هوازدگی

۲-۵. آزمون هوازدگی تسریع شده

نمونه‌های آزمونی با ابعاد و الگوی حلقه‌های سالانه مطابق استاندارد BS EN 927-6 [۱۶] تهیه شدند. آزمون هوازدگی تسریع شده با چرخ هوازدگی گاردنر انجام شد (شکل ۳). تحقیقات نشان داده است، چرخ گاردنر نسبت به هوازدگی طبیعی قادر است ۱۲ بار شدت هوازدگی را تسریع کرده و از طرفی نتایج آن نسبت به دستگاه QUV به هوازدگی طبیعی نزدیک‌تر است [۱۷]. نمونه‌های چوبی تهیه شده قبل از انجام آزمون هوازدگی به مدت دو هفته در اتاق کلیما با رطوبت نسبی 65 ± 5 درصد و دمای 20 ± 2 درجه سانتی‌گراد مشروط‌سازی شدند. سپس نمونه‌ها بر روی یک چرخ دوار، تثبیت شده و با چرخش پی‌درپی در معرض لامپ‌های شبیه‌ساز نور خورشید و آب قرار گرفتند. مدت زمان هر چرخش کامل چرخ ۹۰ دقیقه و مدت زمان هوازدگی نمونه‌ها در این دستگاه، ۱۰۰۰ ساعت بود. نمونه‌ها ۱۲ دقیقه در داخل حمام آب، ۲۷ دقیقه در معرض محیط آزمایشگاهی، ۲۴ دقیقه در معرض لامپ‌های جیوه‌ای و ۲۷ دقیقه دیگر نیز در معرض محیط آزمایشگاهی بودند. لامپ‌های استفاده شده از نوع جیوه‌ای بوده که دارای یک پیک قوی در ناحیه طول موج ۳۶۰ نانومتر می‌باشند که در بازار به نام لامپ خورشیدی^۱ شناخته می‌شوند و طیف نوری آن‌ها بسیار شبیه به نور خورشید است. پس از اتمام دوره هوازدگی، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در فضای آزمایشگاه قرار گرفتند و در نهایت برای متعادل‌سازی رطوبت به اتاق کلیما منتقل شدند. سپس آزمون‌های ATR-FTIR، رنگ‌سنجی و زاویه تماس قطره آب قبل و بعد از هوازدگی بر روی نمونه‌ها انجام شد.



شکل ۳. تصویری از چرخ گاردنر برای هوازدگی تسریع شده (سمت راست) و نحوه قرارگیری نمونه‌ها (سمت چپ)

۲-۶. آزمون زاویه تماس قطره آب

به منظور ارزیابی خاصیت ترشوندگی و میزان آبگریزی، زاویه تماس قطره آب بر روی سطح نمونه‌ها به روش دینامیک، مطابق مطالعات قبلی اندازه‌گیری شد [۱۸]. به وسیله دوربین فیلم‌برداری با وضوح بالا تصویربرداری شد. سپس تصاویر به دست آمده با استفاده از نرم‌افزار ImageJ آنالیز شده و زاویه تماس قطره آب اندازه‌گیری شد (شکل ۴).

۲-۷. آزمون طیف‌سنجی مادون قرمز (ATR-FTIR)

به منظور بررسی اثر هوازدگی بر روی ساختار شیمیایی چوب، آزمون طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (ATR-FTIR) با استفاده از دستگاه PerkinElmer Frontier (مدل دستگاه کامل آورده شود آمریکا، ماساچوست) بر روی نمونه‌های شاهد و تیمار

^۱Solar lamp

شده در شرایط قبل و بعد از هوازگی انجام شد. طیف‌ها با جمع‌آوری ۶۴ اسکن در وضوح طیفی 4 cm^{-1} در دامنه عدد موجی $4000-550 \text{ cm}^{-1}$ به‌دست آمد. ضخامت لایه‌های تهیه شده برای این آزمون ۲ میلی‌متر بود.

۲-۸. آزمون رنگ‌سنجی

این آزمون براساس سیستم CIE-Lab و با استفاده از دستگاه رنگ‌سنجی مدل NRF145 ساخت کشور چین انجام شد. پارامترهای a^* ، b^* و L^* قبل و پس از هوازگی در نواحی یکسان تعیین شده اندازه‌گیری شد. L^* نشان‌دهنده میزان روشنایی بوده و مقدار آن از صفر برای سیاه تا ۱۰۰ برای سفید متغیر است. a^* و b^* نشان‌دهنده خلوص رنگ هستند (a^* برای قرمزی، $-a^*$ برای سبز، b^* برای زرد و $-b^*$ برای آبی). شاخص تغییر رنگ (ΔE^*) نمونه‌های بعد از هوازگی نسبت به نمونه‌های قبل از هوازگی با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد.

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 + (\Delta L^*)^2} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن ΔL ، Δa و Δb به‌ترتیب تغییرات مقادیر L^* ، a^* و b^* در قبل و بعد از هوازگی است.

۲-۹. آزمون‌های فیزیکی

آزمون‌های فیزیکی مطابق استانداردهای ISO ۱۳۰۶۱-۱۳ [۱۹] و ISO ۱۳۰۶۱-۲ [۲۰] انجام شدند. دانسیته نمونه‌ها در حالت خشک اجاقی (D_{od})، درصد جذب آب و واکنشیدگی حجمی نمونه‌ها (پس از غوطه‌وری در آب مقطر به مدت ۲، ۲۴، ۴۸، ۷۲، ۹۶، ۱۲۰، ۱۴۴، ۱۶۸ ساعت) براساس رابطه‌های ۳ تا ۵ محاسبه شد.

$$D_{od} = \frac{m_0}{V_0} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$WA\% = \frac{M_t - m_0}{m_0} \times 100 \quad \text{رابطه ۴}$$

$$S\% = \frac{V_t - V_0}{V_0} \times 100 \quad \text{رابطه ۵}$$

که در آن، m_0 و V_0 به‌ترتیب وزن (کیلوگرم) و حجم (متر مکعب) در حالت خشک اجاقی، حجم (متر مکعب) در حالت خشک اجاقی و M_t و V_t به ترتیب وزن (کیلوگرم) و حجم (متر مکعب) بعد از غوطه‌وری در آب در زمان مشخص t است. همچنین کارایی ضد واکنشیدگی حجمی و ضد جذب آب طی یک هفته نسبت به نمونه‌های شاهد به‌ترتیب با استفاده از رابطه‌های ۶ و ۷ محاسبه شدند.

$$ASE = \frac{WA_2 - WA_1}{WA_1} \times 100 \quad \text{رابطه ۶}$$

$$WRE = \frac{S_2 - S_1}{S_1} \times 100 \quad \text{رابطه ۷}$$

که در آن WRE: اثر بازدارندگی جذب آب (درصد)، WA_1 : میانگین جذب آب نمونه‌های شاهد (درصد)، WA_2 : میانگین جذب آب نمونه‌های تیمار شده، ASE (درصد): اثر بازدارندگی واکنشیدگی حجمی (درصد)، S_1 : میانگین واکنشیدگی حجمی نمونه‌های شاهد (درصد) و S_2 : میانگین واکنشیدگی حجمی نمونه‌های تیمار شده می‌باشد.

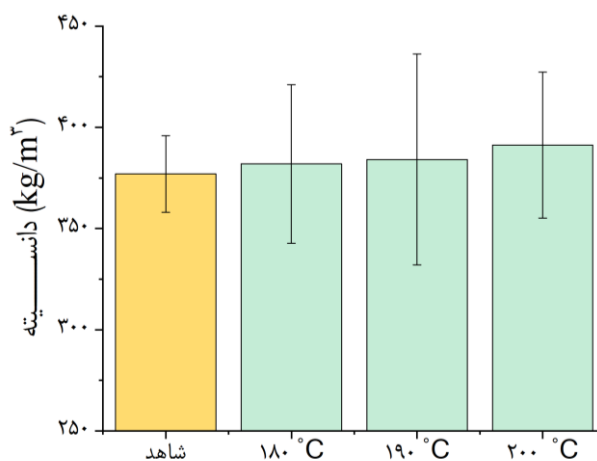
۲-۱۰. آزمون آماری

برای تجزیه و تحلیل نتایج از آزمون تجزیه واریانس یک‌طرفه (One-way ANOVA) در سطح معنی‌داری ۹۵ درصد و نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۷ استفاده شد. برای گروه‌بندی نتایج از آزمون دانکن استفاده شد. در نهایت میانگین نتایج با انحراف معیار مشخص در این تحقیق بحث و گزارش شده است.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

۳-۱. دانسیته

شکل ۴ تغییرات دانسیته نمونه‌های شاهد و تیمار شده در دماهای مختلف پس از تیمار روغن گرمایی را نشان می‌دهد. افزایش دمای تیمار روغن گرمایی باعث افزایش جزئی دانسیته چوب صنوبر شد، اگرچه این تغییرات از نظر آماری در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار نبود. تیمار حرارتی چوب در فناوری‌هایی مانند روش ترمووود فنلاند، بسته به شرایط اصلاح، غالباً سبب تجزیه حرارتی مواد استخراجی و اجزای شیمیایی اصلی چوب شده و کاهش دانسیته را به دنبال خواهد داشت [۲۱]. اما تیمار روغن گرمایی چوب بسته به میزان جذب روغن، اغلب با افزایش وزن چوب همراه است. وزن بعد از تیمار نمونه‌های چوبی (WC%) نسبت به وزن اولیه آنها در دماهای ۱۸۰، ۱۹۰ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۱۱/۷۶، ۹/۵۷ و ۷/۷۷ درصد افزایش داشت. کمترین میزان درصد WC مربوط به تیمار ۲۰۰°C بود، در حالی که بیشترین مقدار آن در تیمار ۱۸۰°C مشاهده شد. میزان جذب روغن در تیمارهای روغن گرمایی بستگی به روش فرآوری دارد. برای مثال استفاده از تانک گرم و سرد باعث افزایش میزان روغن و در نتیجه افزایش دانسیته چوب می‌شود [۲۲]. تغییرات وزن چوب‌های نوئل، کاج و صنوبر لرزان طی تیمار روغن گرمایی توسط Sidorova (۲۰۰۸) مطالعه شده است [۲۲]. در تحقیق ایشان دو روش برای تیمار روغن گرمایی مورد استفاده قرار گرفته بود: تیمار روغن گرمایی بدون سرد کردن داخل روغن و تیمار با روش تانک گرم و سرد. نتایج نشان داد که خروج بلافاصله چوب از روغن باعث جلوگیری از جذب مازاد روغن می‌شود و حتی در گونه‌های سخت اشباع مانند نوئل در دماهای فرآوری بالای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد با کاهش وزن نمونه‌ها همراه خواهد بود. اما استفاده از روش گرم و سرد کردن در روغن باعث افزایش جذب قابل توجه روغن و در نتیجه دانسیته چوب می‌شود [۲۲]. همان‌طور که در روش شناسی پژوهش آورده شد، روش تیمار روغن گرمایی مورد استفاده در این تحقیق، تخلیه فوری روغن داغ در پایان مدت زمان تیمار حرارتی بود. در واقع در این تحقیق، مقادیر WC گزارش شده، برآیندی از میزان جذب روغن و همچنین کاهش وزن بر اثر تخریب حرارتی چوب است که به دلیل جذب بالاتر روغن، مقادیر آن مثبت به دست آمده است. با توجه به مقادیر انحراف از معیار داده‌ها، افزایش مشاهده شده در دانسیته چوب معنی‌دار نبود. تغییرات مورفولوژی-آناتومی (کولپس و چین‌خوردگی دیواره‌های سلولی) دلیل دیگری است که می‌تواند روی دانسیته چوب طی فرآیند اصلاح حرارتی تأثیرگذار باشد [۲۳، ۲۴].

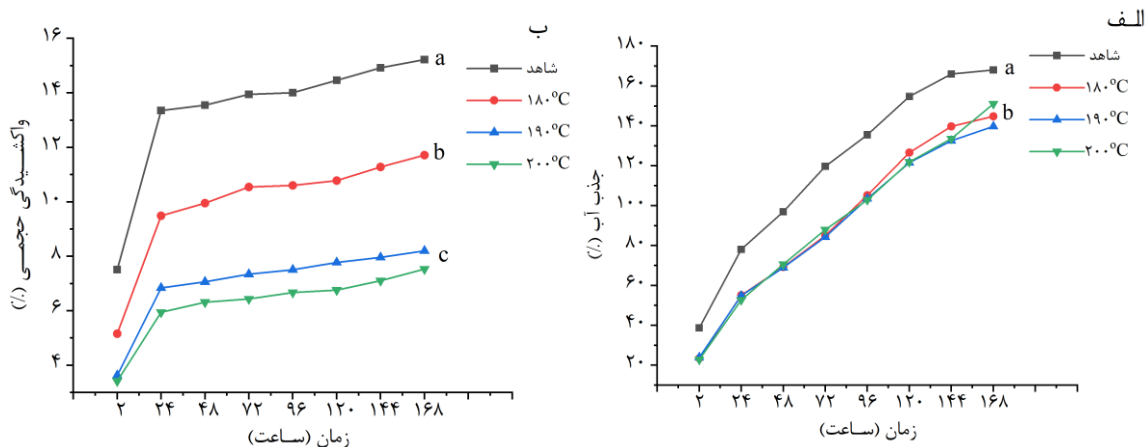


شکل ۴. اثر تیمار روغن گرمایی بر دانسیته چوب صنوبر در دماهای مختلف

۳-۲. روند تغییرات جذب آب و واکسیدگی حجمی

مقادیر جذب آب و واکسیدگی ابعاد نمونه‌های شاهد و تیمار شده پس از یک هفته غوطه‌وری در شکل ۵ نشان داده شده است. مقدار جذب آب در چوب‌های تیمار شده کمتر از نمونه شاهد بود (شکل ۵-الف). تغییر ساختار شیمیایی چوب تیمار شده نقش به‌سزایی در کاهش گروه‌های هیدروکسیل و متعاقب آن کاهش جذب آب دارد [۲۵، ۲۶]. تغییرات مورفولوژی-آناتومی (کولپس و چین‌خوردگی دیواره‌های سلولی) نیز طی تیمار حرارتی چوب اهمیت زیادی بر روی رفتارهای وابسته به آب چوب دارد [۲۳]. در چوب‌های روغن گرمایی شده به دلیل ماهیت آب‌گریزکنندگی روغن و پرشدن فضاهای خالی با آن، معمولاً جذب آب کمتری نسبت به روش‌های دیگر تیمار حرارتی اتفاق می‌افتد [۲۶] که بستگی به روش تیمار و گونه چوبی نیز دارد [۹، ۲۷]. دماهای مختلف حرارت‌دهی اثر چشم‌گیری بر روی مقادیر جذب آب مویینه نمونه‌های تیمار روغن گرمایی شده در دماهای مختلف نشان نداد. در واقع با افزایش دمای فرآوری، تفاوت چشم‌گیری بر روند جذب آب و مقدار نهایی آن مشاهده نشد. نتایج مطالعه رفتار جذب آب چوب راش تیمار حرارتی شده در روغن سویا اصلاح شده با انیدرید مالئیک نشان داد که افزایش دمای تیمار تأثیر معنی‌داری بر روی مقادیر جذب آب ندارد [۲۸]. در مطالعه رفتار جذب آب چوب‌های تیمار حرارتی شده باید توجه داشت که اگرچه تیمار حرارتی روند جذب آب را کند می‌سازد، اما در نهایت به دلیل افزایش تخلخل چوب، اثر چندان بر حداکثر مقدار آب قابل جذب به شکل مویینه ندارد [۲۳، ۲۹].

افزایش دمای تیمار حرارتی منجر به کاهش واکسیدگی حجمی چوب شد (شکل ۵-ب). نمونه‌ها در ۲۴ ساعت اول غوطه‌وری در آب، با شیبی تند، واکسید شده و پس از آن، روند افزایشی واکسیدگی نمونه‌ها با شیب ملایم‌تری ادامه یافت. نتایج مطالعه Cooper و Wang (۲۰۰۵) [۶] نشان داد که افزایش زمان و دمای تیمار روغن گرمایی باعث افزایش ثبات ابعاد چوب می‌شود. در چوب‌های تیمار شده به دلیل کاهش مقدار همی‌سلولز، بخش آمورف سلولز و مواد فرار آبدوست، جذب آب و واکسیدگی ابعاد کاهش می‌یابد [۲۸، ۳۰]. در چوب‌های تیمار حرارتی شده، تغییرات شیمیایی دیواره سلول‌های چوبی، خاصیت نپذیری چوب را کاهش داده و باعث بهبود ثبات ابعاد چوب می‌شود [۳۱، ۳۲].



شکل ۵. نتایج اندازه‌گیری اثر بازدارندگی جذب آب و کارایی ضد واکسیدگی حجمی طی ۷ روز غوطه‌وری در آب

نتایج محاسبه مقادیر اثر بازدارندگی جذب آب و کارایی ضد واکسیدگی حجمی در جدول ۱ خلاصه شده است. با افزایش دمای تیمار، مقادیر کارایی ضد واکسیدگی حجمی افزایش قابل ملاحظه‌ای داشت. افزایش مدت زمان غوطه‌وری در آب اثر کمتری بر روی مقادیر اثر بازدارندگی واکسیدگی حجمی نمونه‌های تیمار شده با بالاتر داشت. برای مثال، طی یک هفته غوطه‌وری در آب، اثر کارایی ضد واکسیدگی حجمی نمونه‌های تیمار شده با دمای ۱۸۰°C از ۳۱/۳۵ به ۲۳/۰۶ درصد رسید (۲۵ درصد کاهش)؛ در حالی که این مقدار در نمونه‌های تیمار شده با دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد از ۵۴/۵۱ به ۵۴/۵۴ درصد کاهش یافت (۷/۳ درصد کاهش). اختلاف بین مقادیر اثر بازدارندگی جذب آب مویینه در بین تیمارهای مختلف بسیار کمتر از

تفاوت‌های ملاحظه شده در خصوص اثر بازدارندگی واکشیدگی حجمی بود. از طرفی، با افزایش مدت زمان غوطه‌وری در آب به شدت از میزان اثر بازدارندگی ضد جذب آب کاسته شد.

جدول ۱. مقادیر اثر بازدارندگی واکشیدگی حجمی و اثر بازدارندگی جذب آب

مدت زما ت غوطه‌وری (ساعت)								دمای تیمار (درجه سانتی‌گراد)	
۱۶۸	۱۴۴	۱۲۰	۹۶	۷۲	۴۸	۲۴	۲		
۲۳/۰	۲۴/۴	۲۵/۵	۲۴/۳	۲۴/۴	۲۶/۴	۲۸/۹	۳۱/۴	۱۸۰	کارایی ضد واکشیدگی حجمی (درصد)
۴۶/۱	۴۶/۷	۴۶/۳	۴۶/۴	۴۷/۳	۴۷/۹	۴۸/۸	۵۱/۷	۱۹۰	
۵۰/۵	۵۲/۴	۵۳/۳	۵۲/۴	۵۳/۹	۵۳/۴	۵۵/۵	۵۴/۵	۲۰۰	
۱۳/۸	۱۵/۸	۱۸/۲	۲۲/۳	۲۸/۹	۲۸/۶	۲۹/۴	۳۹/۴	۱۸۰	اثر بازدارندگی جذب آب (درصد)
۱۶/۸	۲۰/۲	۲۱/۴	۲۳/۶	۲۹/۶	۲۸/۹	۲۹/۸	۳۸/۱	۱۹۰	
۱۰/۱	۱۹/۵۲	۲۱/۲۳	۲۴/۰۷	۲۶/۵۰	۲۷/۱۵	۳۲/۵۲	۴۱/۱	۲۰۰	

۳-۳. رنگ‌سنجی، قبل و بعد از هواز دگی

تصویر سطح نمونه‌های تیمار شده قبل و بعد از هواز دگی تسریع شده در شکل ۶ نمایش داده شده است. قبل از هواز دگی، با افزایش دمای تیمار، رنگ چوب‌ها به‌طور یکنواخت و همگن از قهوه‌ای کاراملی به قهوه‌ای تیره تغییر یافت. تغییر رنگ چوب طی تیمار حرارتی دلایل مختلفی دارد که تحت تأثیر دمای فرآیند اصلاح است. تشکیل گروه‌های کروموفور و تغییر ماهیت شیمیایی لیگنین و تشکیل ترکیبات شیمیایی رنگی حاصل از تخریب همی سلولزها و مواد استخراجی از مهمترین دلایل تیرگی رنگ طی تیمار حرارتی هستند [۷، ۳۲]. روغن‌های گیاهی به دلیل انتقال حرارت سریع، محیط حرارت‌دهی یکنواختی برای تیمار حرارتی چوب فراهم می‌سازند [۳۳]؛ بنابراین، رنگ یکنواخت‌تری نسبت به روش‌های دیگر تیمار حرارتی به دست می‌آید. به‌طور کلی با افزایش دمای فرآوری از روشنایی نمونه‌ها کم شده (کاهش L^*) و بر قرمزی (افزایش a^*) و زردی (افزایش b^*) آنها افزود شد (جدول ۲). بعد از هواز دگی، رنگ نمونه‌ها به‌طور چشمی (عینی) به رنگ خاکستری تا نقره‌ای فام تغییر یافت. رنگ نمونه‌ها به ترتیب از تیمار ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد به سمت ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، روشن‌تر و سفیدتر شد. با این حال تفاوت چشمی قابل توجهی در بین نمونه‌های مختلف مشاهده نشد. Yeldiz و همکاران (۲۰۱۳) [۳۴] در مطالعه روی چوب‌های تیمار حرارتی شده مشاهده کردند که طی هواز دگی، اغلب رنگ چوب‌های روشن به زرد یا قهوه‌ای و چوب‌های تیره به سفید متمایل می‌شوند. نتایج مشابهی نیز توسط Dubey و همکاران (۲۰۱۲) [۱۱] و Suri و همکاران (۲۰۲۳) [۳۳] به دست آمده است.



شکل ۶. شکل نمونه‌های شاهد و تیمار حرارتی شده در دماهای مختلف قبل و بعد از هواز دگی تسریع شده

بر اساس آزمون تجزیه واریانس یک طرفه، اختلاف فاکتورهای تغییرات رنگ (Δb^* و ΔL^* ، Δa^*) بین تیمارهای مختلف معنی دار بود ($P < 0.05$). پس از قرارگیری نمونه‌ها در دستگاه هواز دگی تسریع شده، L^* نمونه‌های شاهد کاهش و L^* نمونه‌های تیمار شده نسبت به قبل هواز دگی افزایش یافت. در واقع به‌طور مشخص، نمونه شاهد تیره‌تر و نمونه‌های تیمار شده، روشن‌تر شده بودند. شستشوی مواد محلول در آب از سطح چوب و واکنش‌های فتوشیمیایی و اکسایشی از دلایل این موضوع بیان شده‌اند [۳۵].

مقادیر a^* و b^* نمونه‌های تیمار نشده بعد از هواز دگی افزایش داشت که در واقع به معنای افزایش تن‌های قرمز و زرد است (Δb^* و Δa^* مثبت). این در حالی بود که در نمونه‌های تیمار شده مقادیر Δa^* و Δb^* منفی بودند که به معنای کاهش تن‌های قرمز و زرد است. در واقع بعد از هواز دگی، رنگ سطح نمونه‌های تیمار شده به سبز و آبی متمایل بود. نتایج مطالعه Nemeth و همکاران (۲۰۱۶) [۳۶] در مورد هواز دگی چوب اقایای سیاه و صنوبر تیمار شده با روغن گل آفتاب گردان در دمای ۱۶۰ و ۲۰۰ درجه سانتی-گراد به مدت ۲، ۴ و ۶ ساعت نشان داد که تغییر روشنی، قرمزی و زردی (L^* ، a^* و b^*) تحت تأثیر گونه چوبی، دما و زمان تیمار حرارتی است. این واقعیت نشان می‌دهد که تیمار روغن گرمایی نیز مانند سایر روش‌های تیمار حرارتی، صرف نظر از دمای فرآیند نمی‌تواند باعث جلوگیری از تغییر رنگ سطح نمونه‌ها طی هواز دگی شود. به‌طور کلی در چوب‌های تیمار حرارتی شده به دلیل تخریب همی سلولزها و نواحی آمورف سلولز بر مقدار لیگنین و درصد کریستالین سلولز افزوده می‌شود. طی هواز دگی، سلولز کریستالی دوباره حالت بی شکل گرفته و خیس‌پذیری چوب زیاد می‌شود. از طرف دیگر لیگنین نیز به علت تابش نور فرابنفش تخریب می‌شود [۱۳].

جدول ۲. پارامترهای مختلف رنگ سنجی چوب صنوبر تیمار شده و شاهد قبل و بعد از هواز دگی

Δb^*	Δa^*	ΔL^*	بعد از هواز دگی			قبل از هواز دگی			تیمار
			b^*	a^*	L^*	b^*	a^*	L^*	
۳/۱۹ ^a	۲/۰۸ ^a	-۸/۶۰ ^a	۱۹/۰۳	۷/۳۱	۷۳/۵۰	۱۵/۸۴	۵/۲۳	۸۲/۱۰	شاهد
(۲/۷۷)	(۲/۰۸)	(۱/۴۷)	(۲/۷۷)	(۲/۰۸)	(۲/۷۷)	(-۰/۴۸)	(-۰/۴۱)	(۱/۰۱)	
-۵/۳۸ ^b	-۴/۵۷ ^b	-۵/۴۳ ^a	۱۷/۰۲	۷/۰۶	۶۴/۰۷	۲۲/۴۰	۱۱/۶۴	۶۹/۵۴	۱۸۰°C
(۱/۹۱)	(۱/۳۹)	(۲/۰۷)	(۱/۹۱)	(۱/۲۹)	(۱/۹۱)	(-۰/۴۵)	(-۰/۶۵)	(-۰/۶۷)	
-۵/۴۷ ^b	-۵/۸۷ ^b	۳/۴۰ ^b	۱۶/۵۰	۷/۲۸	۶۲/۴۷	۲۱/۹۷	۱۳/۱۵	۵۹/۰۷	۱۹۰°C
(۱/۹۸)	(-۰/۵۶)	(۴/۴۵)	(۱/۹۸)	(-۰/۵۶)	(۱/۹۸)	(-۰/۸۰)	(-۰/۶۳)	(۴/۵۶)	
-۳/۷۰ ^b	-۵/۱۵ ^b	۳۳/۱۰ ^c	۱۳/۸۱	۵/۴۱	۶۹/۱۷	۱۷/۵۱	۱۰/۵۶	۴۶/۰۷	۲۰۰°C
(۱/۰۷)	(-۰/۷۳)	(-۰/۵۶)	(۱/۰۷)	(-۰/۷۳)	(۱/۰۷)	(-۰/۹۹)	(-۰/۵۲)	(۲/۳۳)	

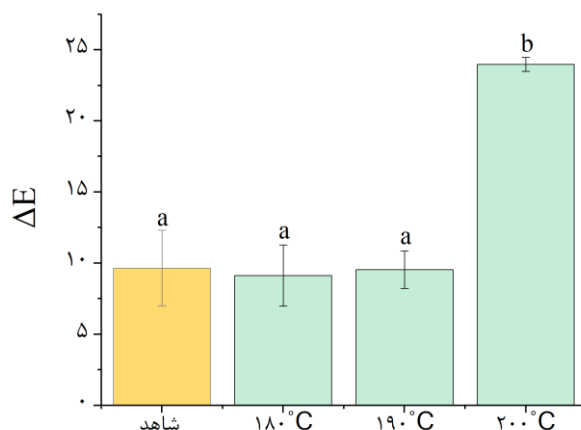
عداد داخل پرانتز مقادیر انحراف معیار و حروف لاتین نیز نتیجه گروه‌بندی آزمون دانکن است.

مطابق آزمون تجزیه واریانس یک طرفه، مقادیر تغییرات رنگ (ΔE) نمونه‌های تیمار شده در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌طور معنی‌داری بیشتر از نمونه شاهد بود (شکل ۷). نسبت به سایر مؤلفه‌ها، تغییر در شاخص L^* بیشترین تأثیر را بر روی تغییرات ΔE داشت. Tolvaj و همکاران (۲۰۱۴)، تأثیر دمای فرآوری حرارتی بر روی ثبات رنگ سطح چوب بر اثر تابش نور فرابنفش را بررسی کردند [۳۷]. نتایج مطالعه آنها نشان داد که دمای بالاتر فرآوری حرارتی چوب باعث ثبات رنگ بیشتر در طی مدت در معرض قرارگیری نمی‌شود. Godinho و همکاران (۲۰۲۱) در یک بررسی جامع به مطالعه مقاومت به هواز دگی چوب‌های تیمار حرارتی شده پرداختند [۱۳]. آنها بیان کردند که شیوه آزمون هواز دگی و مدت زمان در معرض قرارگیری اثر به‌سزایی بر روی نتایج دارد. این امر نشان می‌دهد که نمونه‌های تیمار شده در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد نمی‌تواند رنگ را در طی فرآیند هواز دگی تثبیت کند و تغییر رنگ بیشتری ایجاد شده است. این نتایج با یافته‌های Cui و Matsumura (۲۰۱۹) [۳۸] و Pelosi و همکاران (۲۰۲۰) [۳۹] بر روی مقاومت به هواز دگی چوب‌های تیمار حرارتی شده مطابقت داشت.

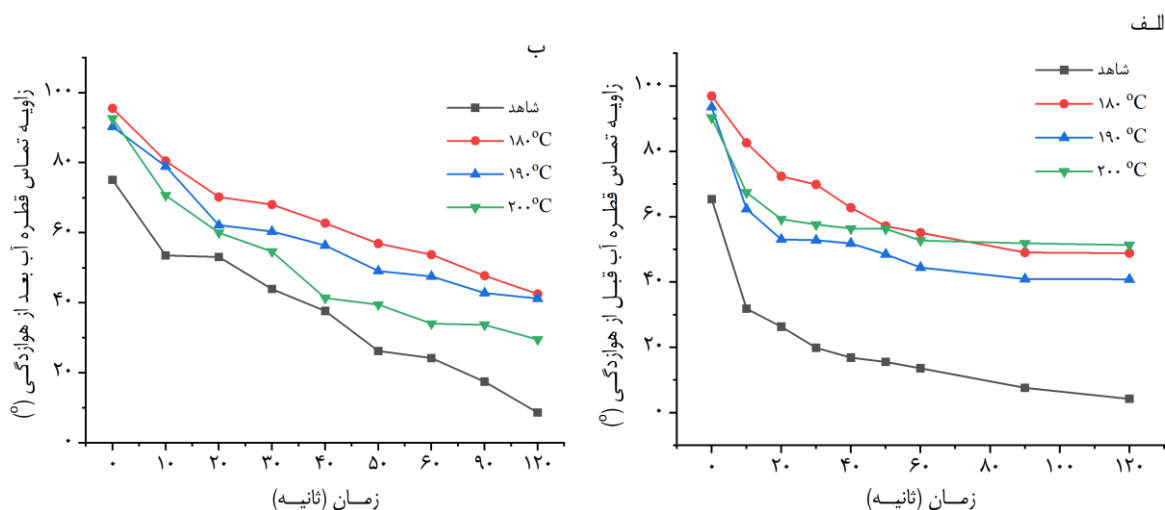
۳-۴. زاویه تماس قطره آب/نم‌پذیری

شکل ۸، نتایج زاویه تماس سطح مماسی نمونه‌های شاهد و تیمار شده صنوبر را قبل و بعد از هواز دگی به‌عنوان تابعی از زمان

نشان می‌دهد. قبل از هوازگی، زاویه تماس نمونه شاهد به‌طور قابل توجهی از نمونه‌های تیمار شده کمتر بود که نشان‌دهنده کاهش ترشوندگی در سطح نمونه‌های تیمار روغن گرمایی می‌باشد. زاویه تماس همه تیمارها در ۱۰ ثانیه اول به سرعت کاهش یافت (شکل ۸-الف). تیمار حرارتی می‌تواند باعث تخریب همی سلولز و افزایش درجه بلورینگی پلی ساکاریدهای باقی مانده و همچنین افزایش درصد مواد استخراجی حاصل از تخریب ترکیبات چوب شود که به تبع آن، ترشوندگی سطح چوب را افزایش دهد [۷، ۴۰]. علاوه بر آن، در روش‌های روغن گرمایی، جذب روغن در بافت چوب می‌تواند دلیل دیگری بر کاهش جذب رطوبت و در نتیجه افزایش زاویه تماس باشد [۳، ۳۱، ۴۱].



شکل ۷. نتایج تغییرات رنگ چوب صنوبر تیمار روغن گرمایی شده در دماهای مختلف بعد از هوازگی. حروف لاتین نتیجه گروه بندی دانکن را نشان می‌دهد.



شکل ۸. زاویه تماس نمونه‌های صنوبر تیمار روغن گرمایی شده. الف) قبل از هوازگی؛ ب) بعد از هوازگی

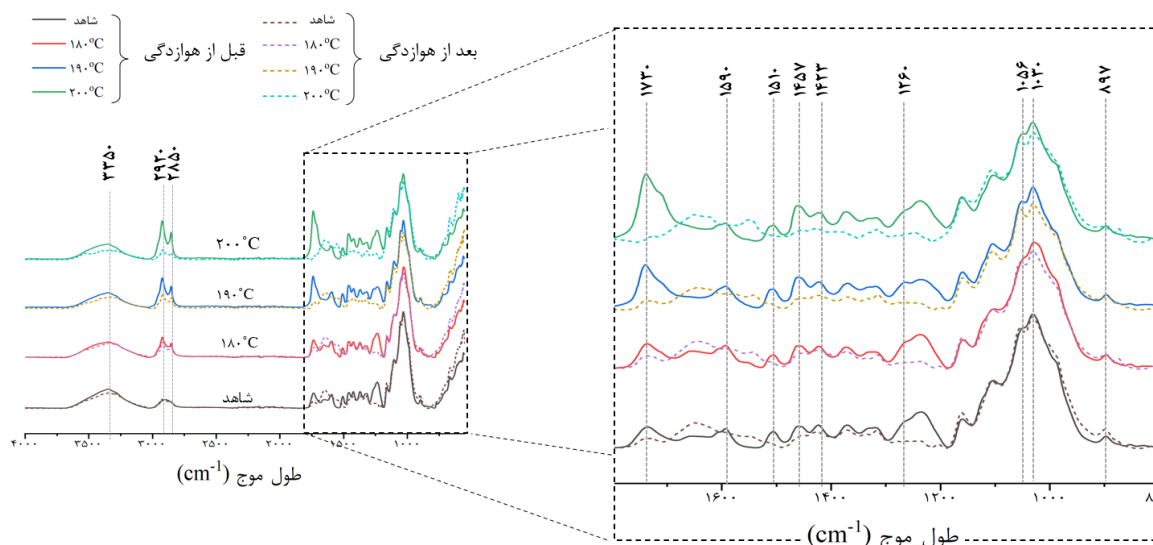
فرآیند هوازگی، نفوذ آب را در سطح نمونه‌های شاهد و تیمار شده تسریع کرد (شکل ۸-ب). زاویه تماس نمونه‌های هوازده پس از ۱۰ ثانیه اول قطره‌گذاری، به‌طور قابل توجهی کاهش یافت؛ در نتیجه باعث کاهش رفتار آب‌گریز و به تبع آن کاهش زاویه تماس و افزایش ترشوندگی سطح چوب شد. علاوه بر آن، اختلاف بین زاویه تماس نمونه‌های شاهد و تیمار شده نسبت به قبل از هوازگی، کاهش یافت. این امر نشان می‌دهد که تغییرات شیمیایی سطوح چوب، تأثیر به‌سزایی بر تغییرات ترشوندگی سطح

نمونه‌های شاهد و تیمار شده دارند. طی هوازدهگی، مواد استخراجی و لیگنین، تخریب شده و بر اثر تماس با آب شسته و از سطح چوب خارج می‌شوند [۱۳]. از طرفی، کاهش بلورینگی سلولز و در نتیجه افزایش مناطق آمورف در آن نیز می‌تواند بر افزایش ترشوندگی چوب طی هوازدهگی مؤثر باشد. همچنین آبشویی روغن از بافت‌های چوب و ترک‌های ریز ناشی از هوازدهگی، باعث ورود راحت‌تر آب به دیواره سلولی چوب تیمار حرارتی شده و افزایش ترشوندگی می‌شود [۴۱، ۴۲]. تغییرات ساختار مورفولوژیکی (زبری و تخلخل) و ماهیت شیمیایی سطح، دو عامل تعیین کننده زاویه تماس و ترشوندگی سطح محسوب می‌شوند [۴۳]. بنابراین، تغییرات شیمیایی و مورفولوژیکی (زبری) سطوح چوب‌های تیمار شده و شاهد طی فرآیند هوازدهگی، دلیل افزایش ترشوندگی است. اگرچه قبل از هوازدهگی، نمونه‌های تیمار شده در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد زاویه تماس قطره آب بالاتری داشتند، اما بعد از هوازدهگی نسبت به دماهای پایین‌تر کاهش شدیدتری در مقادیر زاویه تماس قطره آب آنها مشاهده شد.

۳-۵. طیف‌سنجی مادون قرمز

شکل ۹ طیف‌سنجی مادون قرمز (ATR-FTIR) نمونه‌های شاهد و تیمار شده را قبل و بعد از هوازدهگی در ناحیه طیفی cm^{-1} ۴۰۰۰ تا cm^{-1} ۵۵۰ نشان می‌دهد. پیک در ناحیه cm^{-1} ۳۳۵۰ نشان‌دهنده ارتعاش کششی گروه‌های OH آزاد چوب است [۴۴]. شدت این پیک با افزایش دمای تیمار روغن گرمایی به علت تخریب همی‌سلولزها کاهش یافت. شدت پیک‌های cm^{-1} ۲۹۲۰ و cm^{-1} ۲۸۵۰ ناشی از ارتعاش متقارن و نامتقارن پیوندهای C-H در گروه‌های متیل و متیلن ترکیبات چوب [۴۵، ۴۶، ۴۷، ۴۸، ۴۹] بر اثر تیمار روغن گرمایی، شدت یافت [۴۹، ۱۸]. پیک‌های cm^{-1} ۱۷۴۰-۱۷۳۰ نشان‌دهنده ارتعاش C=O گروه‌های کربونیل در واحدهای استیل و اسید کربوکسیلیک در همی‌سلولزها و احتمالاً لیگنین است [۴۶، ۵۰، ۵۱، ۵۲] که در اثر تیمار حرارتی چوب برای نمونه‌های تیمار شده افزایش یافت. در مطالعه Lim و همکاران (۲۰۱۸)، افزایش شدت این پیک را به واحدهای استری در تری‌گلیسریدهای روغن گیاهی نسبت داده‌اند [۵۳]. در تحقیق دیگری نیز افزایش شدت این پیک با میزان جذب روغن در چوب، طی اصلاح حرارتی مرتبط بوده است [۱۸]. شدت جذب پیک‌های cm^{-1} ۱۶۰۰ و ۱۵۱۰ که مرتبط با گروه‌های آروماتیک لیگنین (C=C) است، در اثر تیمار روغن گرمایی افزایش یافت [۱۸]. پیک cm^{-1} ۱۲۶۱ نیز ارتعاش حلقه‌های گواپاسیل لیگنین را نشان می‌دهد [۴۶، ۵۴]. شدت هر سه پیک طی تیمار روغن گرمایی افزایش یافت. شدت پیک cm^{-1} ۱۰۴۰-۱۰۳۰ که مربوط به ارتعاش کششی پیوند C-O در ساختار پلی‌ساکاریدها است، طی تیمار روغن گرمایی کاهش یافت [۴۱، ۴۶، ۵۵، ۵۶، ۵۷]. Mburu و همکاران (۲۰۰۷) بیان کردند که کاهش شدت این پیک نشان‌دهنده تخریب همی‌سلولز طی تیمار حرارتی است [۵۷].

بعد از هوازدهگی، شدت پیک cm^{-1} ۳۳۵۰ (ارتعاش کششی گروه‌های OH) کاهش یافت. در پیک cm^{-1} ۲۹۲۰ (پیوندهای C-H در ساختار پلی‌ساکاریدها) برای نمونه‌های شاهد و نمونه تیمار شده در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد مقداری افزایش مشاهده شد، در حالی که شدت این پیک (OH) برای تیمارهای ۱۸۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد تغییر چندانی نداشت. شدت پیک در محدوده cm^{-1} ۱۷۴۰-۱۷۳۰ متعلق به گروه‌های کربونیل در همه نمونه‌ها کاهش یافت. بیش‌ترین تغییرات در پیک‌های مربوط به لیگنین مشاهده شد. پیک‌های محدوده cm^{-1} ۱۵۱۰ و cm^{-1} ۱۶۰۰-۱۵۹۰ مربوط به ساختارهای آروماتیک لیگنین (C=C) طی هوازدهگی کاهش یافتند [۴۱]. کاهش در پیک cm^{-1} ۱۶۰۰-۱۵۹۰ مربوط به پیوندهای C-H به دلیل حذف برخی گروه‌های متوکسی از حلقه‌های گواپاسیل چوب نسبت داده شده است [۳۴]. کاهش پیک‌های لیگنین طی هوازدهگی مربوط به آبشویی لیگنین اکسید شده از سطح چوب است [۵۸، ۵۹، ۶۰]. پیک‌های cm^{-1} ۱۵۰۶ و cm^{-1} ۱۲۶۰ نیز مربوط به گروه‌های C=C در ساختارهای حلقوی لیگنین هست که طی هوازدهگی در همه نمونه‌ها به‌ویژه نمونه شاهد روند کاهشی نشان دادند. این تغییرات نشان‌دهنده این است که لیگنین در طی هوازدهگی با شدت بیشتری نسبت به پلی‌ساکاریدها تخریب می‌شود [۴۱، ۴۲]. به‌طور کلی، نتایج حاصل از ATR-FTIR نشان داد که تیمار روغن گرمایی در برابر تخریب و آبشویی پلیمرهای چوب در اثر هوازدهگی چندان مؤثر نیست.



شکل ۹. نمودار ATR-FTIR نمونه‌های شاهد و تیمار شده صنوبر، قبل و بعد از هوازدگی

۴. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مطالعه، تأثیر هوازدگی تسریع شده بر ویژگی‌های سطحی، خواص فیزیکی و ترکیبات شیمیایی نمونه‌های صنوبر شاهد و تیمار روغن گرمایی شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد تیمار روغن گرمایی، پایداری ابعادی را افزایش داده و می‌تواند روشی مؤثر برای کنترل واکنشیدگی حجمی چوب باشد. طی تیمار روغن گرمایی با افزایش دمای فرآوری، رنگ چوب از قهوه‌ای روشن تا قهوه‌ای تیره تغییر کرد. بعد از هوازدگی، چوب‌های تیمار شده، پایداری رنگ کمتری نشان دادند و در واقع بیشترین تغییرات رنگ در نمونه‌های تیمار شده با دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد. پس از ۱۰۰۰ ساعت هوازدگی تسریع شده، رنگ سطح همه نمونه‌ها به خاکستری و نقره‌ای فام تغییر یافت. طیف‌سنجی ATR-FTIR نشان داد که هوازدگی باعث تخریب و آبشویی مواد به‌ویژه لیگنین از سطح نمونه‌ها می‌شود و تیمار روغن گرمایی چوب تأثیر چندانی روی آن ندارد. در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت که اگرچه تیمار حرارتی باعث افزایش ثبات ابعاد چوب می‌شود اما برای محافظت از سطح چوب در کاربردهای فضای باز باید از پوشش‌های محافظتی ضد هوازدگی استفاده کرد.

تشریح و قدردانی

این مطالعه با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه تهران به شماره گرنت ۸۳۳۵۳۱۲ انجام شده است. همچنین بخش‌هایی از این تحقیق با حمایت و همراهی شرکت دانش‌بنیان حفاظت‌گران چوب پارس (شناسه ملی: ۱۴۰۱۰۳۸۸۹۳۲) صورت گرفته است.

۵. منابع

- [1] Ke, Q., Zhang, F., & Zhang, Y. (2016). Optimization of L-shaped Corner Dowel Joint in Modified Poplar using Finite Element Analysis with Taguchi Method. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 44(2), 204-217.
- [2] Chu, D., Xue, L., Zhang, Y., Kang, L., & Mu, J. (2016). Surface characteristics of poplar wood with high-temperature heat treatment: Wettability and surface brittleness. *BioResources*, 11(3), 6948-6967.
- [3] Hill, C.A.S. (2006). *Wood Modification: Chemical, Thermal, and Other Processes*, Wiley, Chichester, England. 264 p.

- [4] Awoyemi, L., Cooper, P.A., & Ung, T.Y. (2009). In-treatment cooling during thermal modification of wood in soy oil medium: soy oil uptake, wettability, water uptake and swelling properties. *European Journal of Wood and Wood Products*, 67(4), 465-470.
- [5] Suri, I. F., Purusatama, B. D., Lee, S., Kim, N., Hidayat, W., Ma'ruf, S.D., & Febrianto, F. (2021). Characteristic features of the oil-heat treated woods from tropical fast growing wood species. *Wood Research*, 66(3), 365-378.
- [6] Wang, J.Y., & Cooper, P.A. (2005). Effect of oil type, temperature and time on moisture properties of hot oil-treated wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 63(6), 417-422.
- [7] Esteves, B. (2009). Wood modification by heat treatment: A review. *BioResources*, 4(1), 470-404.
- [8] Acosta, R.A., Arango, J.A.M., & Da Silva, E.J. (2021). Technologies Applied to Wood Heat Treatments, a Review. *Scientia et Technica*, 26(2), 129-136.
- [9] Lee, S.H., Ashaari, Z., Lum, W.C., Halip, J.A., Ang, A.F., Tan, L.P., Chin, K.L., & Tahir, P.M. (2018). Thermal treatment of wood using vegetable oils: A review. *Construction and Building Materials*, 181, 408-419.
- [10] Rapp, A.O., & Sailer, M. (2001). Oil heat treatment of wood in Germany-State of the art. Review on heat treatments of wood. In Proceedings of the Special Seminar, 9th Feb., Antibes, France, Forestry and Forestry Products, France. *COST Action E*, 22, 43-60.
- [11] Dubey, M.K., Pang, S., & Walker, J. (2012). Oil uptake by wood during heat-treatment and post-treatment cooling, and effects on wood dimensional stability. *European Journal of Wood and Wood Products*, 70(1), 183-190.
- [12] Bal, B. C. (2015). Physical properties of beech wood thermally modified in hot oil and in hot air at various temperatures. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 17(4), 789-798.
- [13] Godinho, D., Araújo, S.D.O., Quilhó, T., Diamantino, T., & Gominho, J. (2021). Thermally modified wood exposed to different weathering conditions: A review. *Forests*, 12(10), 1400.
- [14] Var, A.A., Yalçın, M., Yalçın, Ö.Ü., & Demir, M. (2021). Effects of hot-cold oil treatment on biological resistance and physical properties of Brutia pine sapwood. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 23(42), 1-12.
- [15] Bak, M. and Nemeth, M., 2012. (2012). Modification of wood by oil heat treatment. In International Scientific Conference March, 52(2), 63-70.
- [16] BS EN 927-6. (2006). Paints and varnishes. Coating materials and coating systems for exterior wood Exposure of wood coatings to artificial weathering using fluorescent UV lamps and water.
- [17] Roux, M.L., & Podgorski, L. (2000). The advantages of having in the future a European accelerated weathering test for wood finishes. *Surface Coatings International*, 83(8), 399-403.
- [18] Mastouri, A., Efhamisisi, 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.
- [19] ISO 13061-13. (2016). Physical and mechanical properties of wood — Test methods for small clear wood specimens — Part 13: Determination of radial and tangential shrinkage
- [20] ISO 13061-2. (2013). Physical and mechanical properties of wood — Test methods for small clear wood specimens — Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests
- [21] Pockrandt, M., Jebrane, M., Cuccui, I., Allegretti, O., Uetimane Jr, E., & Terziev, N. (2018). Industrial Thermowood® and Termovuoto thermal modification of two hardwoods from Mozambique. *Holzforschung*, 72(8), 701-709.
- [22] Sidorova, K. (2008). Oil Heat Treatment of Wood. In Proceedings of the 7th Meeting of the Nordic-Baltic Network in Wood Material Science and Engineering (WSE), 27–28 October 2011, Oslo, Norway.
- [23] Mohebbi, B., Kevily, H., & Kazemi-Najafi, S. (2014). Oleothermal modification of fir wood with a combination of soybean oil and maleic anhydride and its effects on physico-mechanical properties of treated wood. *Wood Science and Technology*, 48(4), 797-809.

- [24] Abde, M. R., Mootab Saei, A., Mohebbi, B., & Kazemi-Najafi, S. (2015). Influence of Temperature and Holding Time in Oil Heat Treatment on Physical and Mechanical Properties of Fir Wood (*Abies Sp.*). *Forest and Wood Products*, 68(2), 303-315.
- [25] Esteves, B., Graca, J., & Pereira, H. (2008). Extractive composition and summative chemical analysis of thermally treated eucalypt wood. *Holzforchung*, 62(3), 344-351.
- [26] Abedini, R., Gorji. M., (2020). Effect of different oil heat treatment conditions on chemical structure and physical properties of wingnut (*Pterocarya fraxinifolia*) wood. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 11(2), 199-209.
- [27] Suri, I.F., Purusatama, B.D., Kim, J.H., Yang, G.U., Prasetya, D., Kwon, G.J., Hidayat, W., Lee, S. H., Febrianto, F., Kim, N. H. (2022). Comparison of physical and mechanical properties of *Paulownia tomentosa* and *Pinus koraiensis* wood heat-treated in oil and air. *European Journal of Wood and Wood Products*, 80(6), 1389-1399.
- [28] Asadi Khoramabadi, L., Khazaeian, A., Masteri Farahani, M.R., & Shakeri, A. (2014). Effect of Heat Treatment with Modified Soybean Oil on Mechanical Properties of Beech. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 29(2), 208-219.
- [29] Scheiding, W., Direske, M., & Zauer, M. (2016). Water absorption of untreated and thermally modified sapwood and heartwood of *Pinus sylvestris* L. *European Journal of Wood and Wood Products*, 72(4), 585-589.
- [30] Jämsä, S., & Viitaniemi, P. (2001). Heat treatment of wood—Better durability without chemicals. In Proceedings of special seminar held in Antibes, France, pp. 1-66.
- [31] Bazyar, B. (2012). Decay resistance and physical properties of oil heat treated aspen wood. *BioResources*, 7(1), 696-705.
- [32] Kamdem D., & Pizzi, A. (2002). Jermannaud, Durability of heat-treated wood. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 60(1), 1-6.
- [33] Suri, I. F., Purusatama, B.D., Kim, J. H., Hidayat, W., Iswanto, A.H., Park, S.Y., Lee, S., Kim, N.H. (2023). Artificial Weathering Effects on the Physical and Chemical Properties of *Paulownia tomentosa* and *Pinus koraiensis* Woods Heat-Treated in Oil and Air. *Forests*, 14(8), 1546.
- [34] Yildiz, S., Tomak, E. D., Yildiz, U. C., & Ustaomer, D. (2013). Effect of artificial weathering on the properties of heat treated wood. *Polymer Degradation and Stability*, 98(8), 1419-1427.
- [35] Yildiz, S., Yildiz, U.C., & Tomak, E.D. (2011). The effects of natural weathering on the properties of heat-treated alder wood. *BioResources*, 6(3).
- [36] Nemeth, R., Tolvaj, L., Bak, M., & Alpar, T. (2016). Colour stability of oil-heat treated black locust and poplar wood during short-term UV radiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 329, 287-292.
- [37] Tolvaj, L., Nemeth, R., Pasztory, Z., Bejo, L., & Takats, P. (2014). Colour stability of thermally modified wood during short-term photodegradation. *BioResources*, 9(4), 6644-6651.
- [38] Cui, X., & Matsumura, J. (2019). Wood surface changes of heat-treated *Cunninghamia lanceolata* following natural weathering. *Forests*, 10(9), 791.
- [39] Pelosi, C., Agresti, G., Lanteri, L., Picchio, R., Gennari, E., & Lo Monaco, A. (2020). Artificial weathering effect on surface of heat-treated wood of Ayous (*Triplochiton scleroxylon* K. Shum). *Environmental Sciences Proceedings*, 3(1), 15.
- [40] Kocaefe, D., Poncsak, S., Dor, G. V., & Younsi, R. (2008). Effect of heat treatment on the wettability of white ash and soft maple by water. *Holz als roh-und werkstoff*, 66(5), 355-361
- [41] Huang, X., Kocaefe, D., Kocaefe, Y., Boluk, Y., & Pichette, A. (2012). Changes in wettability of heat-treated wood due to artificial weathering. *Wood Science and Technology*, 46(6), 1215-1223.
- [42] Jirouš-Rajković, V., & Miklečić, J. (2017). Weathering resistance of modified wood—a review. *Godišnjak Akademije tehničkih znanosti Hrvatske*, 1, 223-246.

- [43] Mastouri, A., Efhamisizi, D., Tarmian, A., Boukherroub, R., Lexa, M., Karami, E., Panek, M., and Frigione, M. (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.
- [44] Okon, K. E., Lin, F., Chen, Y., & Huang, B. (2017). Effect of silicone oil heat treatment on the chemical composition, cellulose crystalline structure and contact angle of Chinese parasol wood. *Carbohydrate Polymers*, 164, 179-185
- [45] Poletto, M., Zattera, A. J., & Santana, R.M. (2012). Structural differences between wood species: Evidence from chemical composition, FTIR spectroscopy, and thermogravimetric analysis. *Journal of Applied Polymer Science*, 126(S1), E337-E344.
- [46] Yue, K., Qian, J., Wu, P., Jiao, X., Lu, D., & Song, X. (2023). Experimental analysis of thermally-treated Chinese poplar wood with focus on structural application. *Industrial Crops and Products*, 197, 116612.
- [47] He, L., Zhang, T., Zhao, X., Zhao, Y., Xu, K., He, Z., & Yi, S. (2023). Synergistic effect of tung oil and heat treatment on surface characteristics and dimensional stability of wood. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 665, 131233.
- [48] Esteves, B., Marques, A.V., Domingos, I., Pereira, H. (2013). Chemical changes of heat treated pine and eucalypt wood monitored by FTIR. *Maderas. Cienc y tecnología* 15(2), 245-258.
- [49] Hao, X., Wang, Q., Wang, Y., Han, X., Yuan, C. L., Cao, Y., Lou, Z., & Li, Y. (2021). The effect of oil heat treatment on biological, mechanical and physical properties of bamboo. *Journal of Wood Science*, 67(1), 1-14.
- [50] Pandey, K. K. (1999). A study of chemical structure of soft and hardwood and wood polymers by FTIR spectroscopy. *Journal of Applied Polymer Science*, 71(12), 1969-1975.
- [51] Tarmian, A., & Mastouri, A. (2018). Changes in moisture exclusion efficiency and crystallinity of thermally modified wood with aging. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 12(1), 92-97.
- [52] Colom, X., Carrillo, F., Nogués, F., & Garriga, P. (2003). Structural analysis of photodegraded wood by means of FTIR spectroscopy. *Polymer Degradation and Stability*, 80(3), 543-549.
- [53] Lim, S. Y., Abdul Mutalib, M. S., Khaza'ai, H., & Chang, S.K. (2018). Detection of fresh palm oil adulteration with recycled cooking oil using fatty acid composition and FTIR spectral analysis. *International Journal of Food Properties*, 21(1), 2428-2451.
- [54] Temiz, A., Terziev, N., Eikenes, M., & Hafren, J. (2007). Effect of accelerated weathering on surface chemistry of modified wood. *Applied Surface Science*, 253(12), 5355-5362.
- [55] Xing, D., Wang, S., & Li, J. (2015). Effect of artificial weathering on the properties of industrial-scale thermally modified wood. *BioResources*, 10(4), 8238-8252.
- [56] Bessala, L. F. B., Gao, J., He, Z., Wang, Z., & Yi, S. (2023). Effects of heat treatment on color, dimensional stability, hygroscopicity and chemical structure of Afrormosia and Newtonia wood: A comparative study of air and palm oil medium. *Polymers*, 15(3), 774.
- [57] Mburu, F., Dumarcay, S., Huber, F., Petrisans, M., & Gerardin, P. (2007). Evaluation of thermally modified Grevilliarobusta heartwood as an alternative to shortage of wood resource in Kenya: Characterisation of physicochemical properties and improvement of bio-resistance. *Bioresource Technology*, 98(18), 3478-3486.
- [58] Anderson, E. L., Pawlak, Z., Owen, N. L., & Feist, W. C. (1991). Infrared studies of wood weathering. Part I: Softwoods. *Applied Spectroscopy*, 45(4), 641-647.
- [59] Mastouri, A., Azadfallah, M., Rezaei, F., Tarmian, A., Efhamisizi, D., Mahmoudkia, M., & Corcione, C. E. (2023). Kinetic studies on photo-degradation of thermally-treated spruce wood during natural weathering: Surface performance, lignin and cellulose crystallinity. *Construction and Building Materials*, 392, 131923.
- [60] Tomak, E.D., Ustaomer, D., Ermeydan, M.A., & Yildiz, S. (2018). An investigation of surface properties of thermally modified wood during natural weathering for 48 months. *Measurement*, 127, 187-197.