Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Wood and Forest Science and Technology

Print ISSN: 2322-2077
Online ISSN: 2322-2786

Comparison of thermal modification method with air and oil on physical and mechanical properties of Paulownia wood

Mozhdeh Mashkour[*1], Davood Rasouli[2]

1. Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Paper Science and Engineering, Faculty of Wood and Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: m.mashkour@gau.ac.ir
2. Assistant Prof., Dept. of Wood Engineering and Technology, Faculty of Wood and Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: rasouli@gau.ac.ir

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 07.15.2023
Revised: 08.19.2023
Accepted: 08.23.2023

Keywords:
Paulownia fortune wood,
Physical and mechanical properties,
Rapeseed oil,
Thermal modification,
Thermowood

ABSTRACT

Background and Objectives: In response to the scarcity of forest resources and the growing demand for wood and its products, the cultivation of fast-growing species serves as a means to ensure a steady supply of raw wood material. One such species is *Paulownia fortune*, which possesses unique characteristics. Given the significance of maximizing the utilization of wood in various applications, these valuable materials are now subject to various modifications. Among these, thermal modification emerges as an efficient and environmentally friendly method, offering a viable approach to enhancing the properties of fast-growing wood species. Therefore, this study aimed to investigate the impact of thermal treatment using air and oil on selected physical and mechanical properties of Paulownia wood.

Materials and Methods: The wood utilized in this study comprised of three trunks sourced from *Paulownia fortune* that obtained from the Shasat Kalate forest of Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. Following conversion into boards, the wood was air-dried. Subsequently, samples with straight fibers and impeccable appearance were prepared. Two thermal modification methods were employed to modify the samples: air-based thermal modification using the Thermo-D process (at 212 ± 3 ◦C for 2 hr), and thermal modification using rapeseed oil with identical temperature conditions as the air-based method. The samples were then subjected to colorimetric testing, as well as tests evaluating bending strength, hardness, impact resistance, water absorption, and thickness shrinkage.

Results: The results demonstrated that both methods of heat treatment had a notable impact on the physical and mechanical properties. Overall, heat treatment using both methods led to a reduction in density, water absorption, elongation, brightness index, impact resistance, hardness, modulus of rupture (MOR), and modulus of elasticity (MOE). However, when comparing the two methods, heat treatment in oil exhibited a comparatively lesser detrimental effect on the loss of MOR, MOE, and color changes in comparison to heat treatment in air.

Conclusion: Overall, *Paulownia fortune* wood treated with oil showed comparatively better physical and mechanical properties when compared to the wood treated with air. Consequently, heat treatment in oil proves to be

a more effective method for enhancing the physical and mechanical properties of *Paulownia fortune* wood in comparison to heat treatment in air.

Cite this article: Mashkour, Mozhdeh, Rasouli, Davood. 2023. Comparison of thermal modification method with air and oil on physical and mechanical properties of Paulownia wood. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 30 (3), 115-131.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/JWFST.2023.21566.2025
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل

شاپا چاپی: ۲۳۲۲-۲۰۷۷
شاپا آنلاین: ۲۳۲۲-۲۷۸۶

مقایسه روش اصلاح حرارتی با هوا و روغن بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چوب پالونیا

مژده مشکور*[۱]، داود رسولی[۲]

۱. نویسنده مسئول، استادیار گروه علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: m.mashkour@gau.ac.ir

۲. استادیار گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: rasouli@gau.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۴
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۰۱

واژه‌های کلیدی:
اصلاح حرارتی در روغن،
اصلاح حرارتی در هوا،
چوب پالونیا،
خواص فیزیکی و مکانیکی

چکیده

سابقه و هدف: با توجه به کمبود منابع جنگلی و افزایش تقاضا برای چوب و فرآورده‌های آن، یکی از راه‌های تأمین ماده اولیه چوبی، کاشت گونه‌های سریع‌الرشد می‌باشد. یکی از این گونه‌های کشت‌شده در کشور ما، گونه پالونیا فورتونی (*Paulownia fortune*) بوده که دارای ویژگی‌های منحصر به فردی می‌باشد. با توجه به اهمیت استفاده بهینه از چوب‌ها در کاربردهای مختلف، امروزه این مواد باارزش را با روش‌های مختلفی اصلاح می‌کنند. اصلاح حرارتی به‌عنوان روش کارآمد و دوستدار محیط‌زیست، گزینه مناسبی برای بهبود ویژگی‌های گونه‌های چوبی سریع‌الرشد می‌باشد. بنابراین در این مطالعه تأثیر روش اصلاح حرارتی در هوا و روغن بر برخی از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چوب پالونیا مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها: چوب مورد استفاده در این پژوهش سه اصله درخت پالونیا فورتونی از جنگل شصت‌کلاته دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان تهیه شد. گرده‌بینه‌های پالونیا پس از تبدیل به تخته در هوای آزاد خشک شدند. سپس نمونه‌های چوبی با الیاف مستقیم و بی‌عیب از نظر ظاهری از آن‌ها تهیه و نمونه‌ها با دو روش اصلاح حرارتی در هوا و روغن اصلاح گردیدند. اصلاح حرارتی در هوا مطابق روش ترموود نوع D و اصلاح حرارتی با روغن کلزا نیز با شرایط دمایی مشابه روش اصلاح حرارتی در هوا انجام شد؛ و درنهایت، آزمون‌های رنگ‌سنجی، مقاومت خمشی، سختی، ضربه، جذب آب و واکشیدگی ضخامت بر روی نمونه‌ها انجام شد.

یافته‌ها: نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که تیمار حرارتی با هر دو روش بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها تأثیر معنی‌داری داشته به‌طوری‌که این تیمارها موجب کاهش دانسیته، جذب

آب و واکشیدگی، شاخص روشنایی، مقاومت به ضربه، سختی، مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته نمونه‌ها گردید. از سوی دیگر، تیمار حرارتی در روغن تأثیر منفی کم‌تری در کاهش مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته و تغییرات رنگی در مقایسه با تیمار حرارتی در هوا داشته است.

نتیجه‌گیری: به‌طورکلی می‌توان گفت که تیمار حرارتی در روغن در مقایسه با تیمار حرارتی در هوا، روش مؤثرتر و مناسب‌تری برای اصلاح ساختار چوب پالونیا می‌باشد.

استناد: مشکور، مژده، رسولی، داود (۱۴۰۲). مقایسه روش اصلاح حرارتی با هوا و روغن بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چوب پالونیا. *نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل*، ۳۰ (۳)، ۱۳۱-۱۱۵.

DOI: 10.22069/JWFST.2023.21566.2025

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

© نویسندگان.

مقدمه

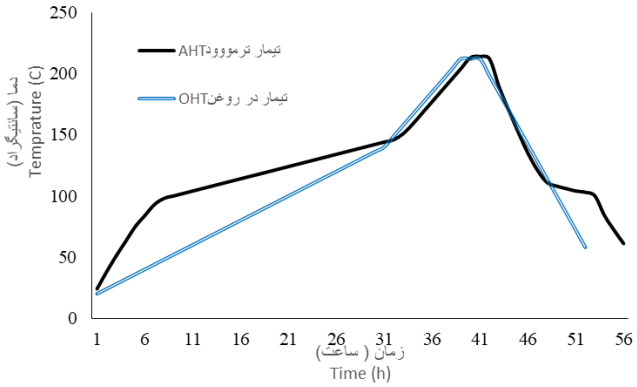
در سال‌های اخیر مصرف چوب به علت افزایش جمعیت جهان و به دنبال آن افزایش تقاضای این ماده ارزشمند و فرآورده‌های آن افزایش یافته که کشور ما نیز از این امر مستثنی نبوده است. با توجه به محدودیت منابع جنگلی کشور، بخش زیادی از چوب مصرفی از طریق واردات تأمین می‌شود (۱). تلاش‌هایی برای کاهش وابستگی واردات چوب صورت گرفته که از آن جمله می‌توان به کاشت گونه‌های سریع‌الرشد اشاره کرد. از جمله گونه‌های سریع‌الرشد کشت‌شده در کشور به‌ویژه در استان‌های شمالی، گونه پالونیا فورتونی می‌باشد. چوب پالونیا به‌دلیل دارا بودن ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی مناسب و هم‌چنین دوام نسبی بالا در برابر پوسیدگی و حشرات، برای ساخت مبلمان، تخته‌خرده‌چوب، تخته فیبر و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد (۲، ۳). با توجه به اهمیت استفاده بهینه از چوب‌آلات در کاربردهای مختلف و افزایش طول عمر مفید محصولات تولیدشده، روش‌های مختلفی جهت اصلاح ساختار آن‌ها مانند اصلاح شیمیایی، مکانیکی، آنزیمی و گرمایی ارائه شده است (٤). در بین این روش‌ها، اصلاح حرارتی روشی کارآمد، غیرسمی و دوستدار محیط‌زیست بوده که می‌تواند برای بهبود خواص گونه‌های چوبی سریع‌الرشد مانند اکالیپتوس، پالونیا و ... مورد استفاده قرار گیرد (۵). در روش اصلاح حرارتی به کمک گرما، ساختار شیمیایی چوب تا رسیدن به خصوصیات مطلوب تغییر می‌یابد (٦، ۷). تغییرات شیمیایی رخ داده در چوب در دماهای بالا همراه با تغییرات مطلوب در خصوصیات فیزیکی مانند کاهش همکشیدگی و واکشیدگی، افزایش مقاومت در برابر هوازدگی، تیره‌تر شدن رنگ جهت کاربردهای دکوراتیو، بهبود خصوصیات عایق حرارتی، مقاومت بهتر در برابر پوسیدگی و ثبات نوری بهتر می‌باشد (۸، ۹). مطابق گزارش کاسیف و همکاران (۲۰۰۷) چوب تیمار حرارتی شده دارای رطوبت تعادل، نقطه اشباع الیاف، همکشیدگی و واکشیدگی کم‌تری می‌باشد که عمدتاً ناشی از کاهش میزان همی‌سلولزها در اثر تیمار حرارتی می‌باشد (۸). میزان دما و مدت زمان تیمار از مهم‌ترین عوامل فرآیند تیمار حرارتی بوده به‌طوری‌که تمامی تیمارهای حرارتی چوب در دماهای بالا و در محدوده ۲٦۰-۱۵۰ درجه سانتی‌گراد با مدت زمان مشخصی انجام می‌شوند. نحوه اعمال گرما و محیط پیرامونی چوب (آب، بخار آب، نیتروژن، هوای خشک یا روغن‌های گیاهی) منجر به ایجاد روش‌های مختلف جهت اصلاح حرارتی چوب گردیده است (۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳). تیمار حرارتی در هوا، محبوب‌ترین و شناخته‌شده‌ترین روش برای اصلاح حرارتی چوب می‌باشد (١٤). دیاز و همکاران (۲۰۱۹) بهبود قابل‌توجهی در پایداری ابعادی چوب کاج رادیاتا بعد از تیمار حرارتی در هوا را گزارش نمودند (۱۵)؛ اما این روش به دلیل تأثیری منفی که بر ساختار سلولز و لیگنین دارد باعث کاهش مقاومت‌های مکانیکی مانند مقاومت خمشی و مقاومت به ضربه می‌گردد. اخیراً تیمار حرارتی در روغن به‌دلیل اثرات ترکیبی روغن و گرما به روشی متداول برای بهبود خواص چوب تبدیل شده است (١٦، ۱۷). در طی این عملیات حرارتی، روغن مانع از دسترسی اکسیژن به چوب شده و به این ترتیب از فرآیندهای اکسیداسیون که باعث کاهش استحکام مکانیکی چوب‌آلات مربوطه می‌گردد، جلوگیری می‌نماید (۱۸). از سوی دیگر، توانایی این فرآیند در انتقال گرمای کارآمدتر و یکنواخت به چوب، یکی از عوامل اصلی دیگر استفاده از این روش می‌باشد (۱۹، ۲۰). لی و همکاران (۲۰۱۸) اعلام نمودند که چوب تیمار شده حرارتی در روغن در مقایسه با چوب تیمار شده در هوای گرم حاوی نیتروژن، دارای

پایداری ابعادی بالاتری می‌باشد. اوکن و همکاران (۲۰۱۸) افزایش دانسیته و کاهش همکشیدگی در چوب *Cunninghamia lanceolata* را پس از تیمار حرارتی در روغن گزارش نمودند (۲۱). چنگ و همکاران (۲۰۱٤) افزایش استحکام فشاری موازی با الیاف چوب صنوبر تیمار حرارتی شده در روغن را مشاهده کردند (۲۲). همان‌طور که در بالا ذکر شد، روش تیمار حرارتی تأثیر معنی‌داری در خصوصیات فیزیکی و مکانیکی چوب اصلاح‌شده خواهد داشت. ازآن‌جایی‌که چوب پالونیا جزء گونه‌هایی با دانسیته کم می‌باشد تیمار حرارتی می‌تواند با تأثیر منفی بر دانسیته و خواص مکانیکی آن، کاربردهای آن را محدود سازد. با انتخاب روش تیمار حرارتی مناسب می‌توان ساختار این چوب را با مشکلات کم‌تری اصلاح نمود. به همین منظور مطالعه حاضر به بررسی خصوصیات چوب پالونیای تیمار حرارتی شده در روغن و هوا خواهد پرداخت.

مواد و روش‌ها

مواد: چوب مورد استفاده در این پژوهش سه اصله درخت پالونیا (*Paulownia fortunei*) با قطر حدود ٦۰ سانتی‌متر بود که از جنگل شصت‌کلاته دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان تهیه شد. چوب‌های مذکور پس از تبدیل به تخته در هوای آزاد خشک شدند. سپس نمونه‌های چوبی با الیاف مستقیم و بی‌عیب از آن‌ها تهیه شد. ضخامت و عرض نمونه‌های چوبی به ترتیب ٤ و ۱۵ سانتی‌متر بود. نمونه‌ها با دو روش اصلاح حرارتی در هوا و روغن تیمار شدند. در این پژوهش روغن کلزا خام (کارخانه سویا بین گلستان) با پایداری اکسیداتیو بالا و نقطه فراریت حدود ۲٤۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شد.

تیمار حرارتی: اصلاح حرارتی در هوا مطابق روش ترموود نوع D (دمای ۲۱۲ درجه سانتی‌گراد و در مدت زمان ۲ ساعت) (۲۳) در کارخانه مازند چوب آریا انجام شد. در روش اصلاح حرارتی با روغن از روغن کلزا برای تیمار نمونه‌های چوبی استفاده شد که برای انجام مقایسه بهتر، شرایط دمایی آن مطابق با روش اصلاح حرارتی در هوا انتخاب شد. نمودار فرآیند اصلاح حرارتی انجام‌شده در هوا و روغن در شکل ۱ مشاهده می‌شود. در این پژوهش برای ممانعت از تأثیر نفوذ و جذب روغن در ویژگی‌های مورد بررسی، ابتدا سطوح خارجی نمونه‌های اصلاح‌شده در روغن به ضخامت ۱ سانتی‌متر حذف و از الباقی برای تهیه نمونه‌های آزمونی استفاده گردید.



شکل ۱- نمودار اصلاح حرارتی چوب پالونیا با دو روش تیمار حرارتی در هوا و روغن در پژوهش حاضر.

Figure 1. Diagram of thermal modification of Paulownia wood with air and oil heat treatment in this research.

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی

ویژگی‌های فیزیکی: برای اندازه‌گیری دانسیته، جذب آب و واکشیدگی از هر تیمار تعداد ۱۰ نمونه تهیه شد. ابعاد نمونه‌ها ۲×۲×۳ (مماسی * شعاعی* طولی) سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. ابتدا نمونه‌ها در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲٤ ساعت در آون خشک شدند، سپس ابعاد مماسی، شعاعی و طولی آن‌ها اندازه‌گیری شد. جهت توزین نمونه‌ها از ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱ گرم و برای اندازه‌گیری ابعاد از کولیس با دقت ۰/۰۲ میلی‌متر استفاده شد. نمونه‌ها در بشر حاوی آب مقطر قرار داده شده و سپس ابعاد و وزن آن بعد از ۲ ساعت و ۲٤ ساعت اندازه‌گیری شده است. مقدار جذب آب و واکشیدگی حجمی نمونه‌ها از رابطه‌های زیر محاسبه شد:

$$Swelling(\%) = \frac{V_{tu}-V_0}{V_0} \times 100 \qquad (۱)$$

که در آن، $Swelling(\%)$ درصد واکشیدگی حجمی، V_{tu} حجم نمونه‌ها بعد از غوطه‌وری، V_0 حجم اولیه.

$$Water\ uptake\ (\%) = \frac{W_t-W_d}{W_d} \times 100 \qquad (۲)$$

که در آن، $Water\ uptake\ (\%)$ درصد جذب آب بعد از غوطه‌وری، W_t وزن نمونه‌ها بعد از غوطه‌وری، W_d وزن نمونه‌ها قبل از غوطه‌وری.

خصوصیات رنگی سطح نمونه‌ها براساس استاندارد ASTM D2244 به‌وسیله دستگاه TES A135 براساس سیستم CIE-lab، مورد ارزیابی قرار گرفت. در این سیستم، L نشان‌دهنده میزان روشنایی است و مقدار آن از صفر برای سیاه و تا صد برای سفید متغیر است. a و b نشان‌دهنده خلوص رنگ است. (a+ برای قرمز ٦۰+، a- برای سبز ٦۰-، b+ برای زرد ٦۰+، b- برای آبی ٦۰-).

ویژگی‌های مکانیکی: مقاومت‌های مکانیکی اندازه‌گیری شده شامل مقاومت خمشی، سختی، ضربه (ISO 13061-10)، برای بررسی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی استفاده شد. برای تعیین مقاومت خمشی نمونه‌هایی به ابعاد ٤۱۰×۲۵×۲۵ میلی‌متر تهیه گردید. این آزمون با استفاده از دستگاه SCHENCK-TREBEL و مطابق استاندارد ISO 3133-1975 انجام شد. برای تعیین مقاومت به ضربه نمونه‌های به ابعاد ۳۰۰×۲۵×۲۵ میلی‌متر آماده و در نتیجه اعمال ضربه به‌وسیله یک آونگ چکشی مورد آزمون قرار گرفتند. سختی نمونه‌های چوب با ابعاد ۵۰×۵۰×۱۵۰ میلی‌متر (L*T*R) مطابق استاندارد ASTM D 143-52 اندازه‌گیری شد برای این منظور نیروی لازم برای فرونشاندن کره‌ای به قطر ۱۱/۵ میلی‌متر به‌اندازه شعاع آن به‌عنوان سختی نمونه‌ها لحاظ می‌گردد.

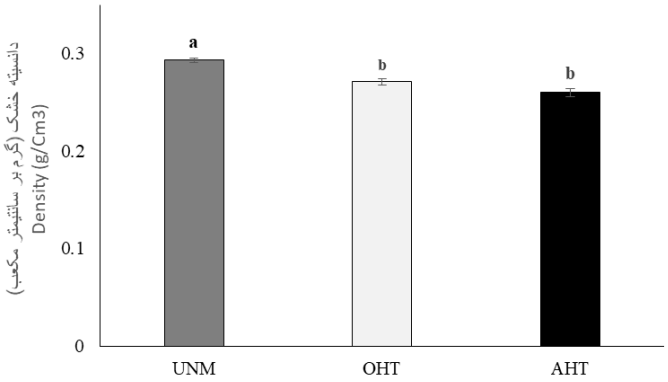
تجزیه‌وتحلیل داده‌های فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها با استفاده از تجزیه واریانس یک‌طرفه در قالب طرح کاملاً تصادفی و مقایسات میانگین از طریق آزمون دانکن (در سطح ۵ درصد (P<۰/۰۵) به کمک نرم‌افزار SPSS نسخه ۲٦ انجام شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی

دانسیته: نتایج تأثیر تیمار حرارتی در هوا و روغن بر دانسیته چوب پالونیا در شکل ۲ و نتایج به‌دست‌آمده از آزمون تجزیه واریانس دانسیته چوب پالونیا تیمار نشده و تیمار شده حرارتی در جدول ۱ نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که بین چوب‌های تیمار نشده و تیمارشده حرارتی در سطح اطمینان ۹۵٪ اختلاف معنی‌داری وجود دارد. بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر دانسیته به ترتیب متعلق به چوب تیمار نشده و چوب تیمار شده حرارتی با هوا (ترموود) می‌باشد (شکل ۲). هم‌چنین با توجه به نتایج، دانسیته چوب

تیمار شده در روغن نسبت به چوب تیمار شده در هوا بیش‌تر می‌باشد. کاهش دانسیته بعد از تیمار حرارتی در هوا و روغن می‌تواند به دلیل تخریب همی‌سلولزها و ترکیبات فرار و واکنش‌های دپلیمریزه شدن پلیمرهای چوب باشد (۲۳، ۲٤). اوکن و همکاران (۲۰۱۸) شرح دادند که کاهش دانسیته در طی تیمار حرارتی با روغن به‌واسطه پیرولیز و تخریب پلیمرهای دیواره سلولی در طی تیمار حرارتی می‌باشد (۲۱).



شکل ۲- تأثیر تیمار حرارتی در هوا و روغن بر دانسیته چوب پالونیا (UNM: چوب تیمار نشده، OHT: چوب تیمار شده حرارتی با روغن، AHT: چوب تیمار شده حرارتی با هوا).

Figure 2. The effect of heat treatment in air and oil on the density of Paulownia wood (UNM: untreated wood, OHT: wood heat treated with oil, AHT: wood heat treated with air).

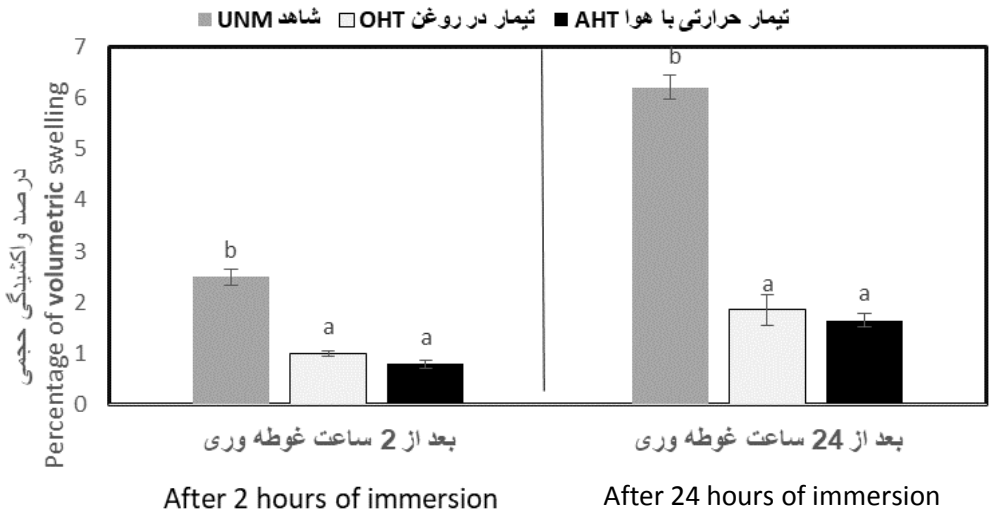
جدول ۱- آنالیز واریانس اثر تیمار حرارتی چوب پالونیا در هوا و روغن بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آن.

Table 1. Analysis of variance of Paulownia wood heat treatment in air and oil on its physical and mechanical properties.

متغیر مستقل Independent variable		درجه آزادی Degree of freedom	مجموع مربعات Sum of squares	میانگین مربعات Mean of squares	مقدار F F value	سطح معنی‌داری P value
دانسیته Density		2	0.002	0.001	89.670	0.000
واکشیدگی حجمی بعد از ۲ ساعت Volumetric swelling after 2h		2	5.645	2.822	234.548	0.000
واکشیدگی حجمی بعد از ۲ ساعت Volumetric swelling after 24h		2	39.839	19.920	364.458	0.000
تغییرات رنگی Color changes	شاخص L L index	2	1906.408	953.204	492.577	0.000
	شاخص a a index	2	6.179	3.090	45.244	0.000
	شاخص b b index	2	58.505	29.253	102.277	0.000
مقاومت به ضربه Impact resistance		2	42.106	21.053	21.908	0.002
سختی Hardness		2	1289.327	161.166	198.386	0.000
مدول خمش MOR		2	243.253	121.627	99.727	0.000
مدول الاستیسیته MOE		2	787232.000	393616.000	92.572	0.000

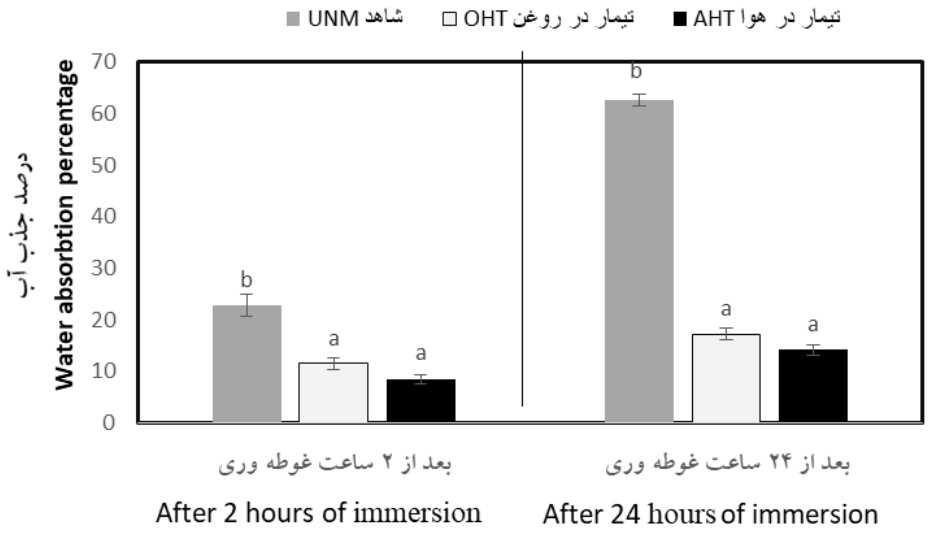
واکشیدگی حجمی و جذب آب: نتایج غوطه‌وری نمونه‌های تیمار شده حرارتی در هوا و روغن بعد از ۲ ساعت و ۲٤ ساعت (شکل ۳) نشان داد که هم در ۲٤ ساعت و هم دو ساعت غوطه‌وری نمونه‌ها، نمونه‌های تیمارشده حرارتی نسبت به نمونه تیمارنشده به‌طور معنی‌داری واکشیدگی حجمی کم‌تری داشتند؛ به‌طوری‌که بعد از ۲٤ ساعت میزان واکشیدگی حجمی نمونه‌های تیمارشده در هوا در مقایسه با نمونه تیمار نشده به میزان تقریباً ۷۳٪ کاهش یافت. هم‌چنین بین واکشیدگی حجمی نمونه‌های تیمار شده حرارتی در هوا و روغن در سطح اطمینان ۹۵٪ اختلاف معنی‌داری وجود نداشت.

با توجه به نتایج، در هر دو زمان ۲ و ۲٤ ساعت غوطه‌وری نمونه‌ها در آب، جذب آب نمونه‌های تیمار شده حرارتی در هوا و روغن در مقایسه با نمونه‌های تیمار نشده به‌طور معنی‌داری کم‌تر می‌باشد (شکل ٤). پس از ۲٤ ساعت غوطه‌وری نمونه‌ها در آب، جذب آب نمونه‌های تیمار شده با روغن و تیمار شده با هوا به‌ترتیب به میزان ۷۲/۵٪ و ۷۷/۵٪ کاهش یافت. هم‌چنین هر چند جذب آب نمونه تیمارشده با روغن بیش‌تر می‌باشد، اما بین نتایج جذب آب نمونه‌های تیمار شده حرارتی با هر دو روش اختلاف معنی‌داری وجود نداشت.



شکل ۳- تأثیر تیمار حرارتی در هوا و روغن بر واکشیدگی حجمی چوب پالونیا بعد از ۲ و ۲٤ ساعت غوطه‌وری در آب.

Figure 3. The effect of heat treatment in air and oil on the volumetric shrinkage of Paulownia wood after 2 and 24 hours of immersion in water.



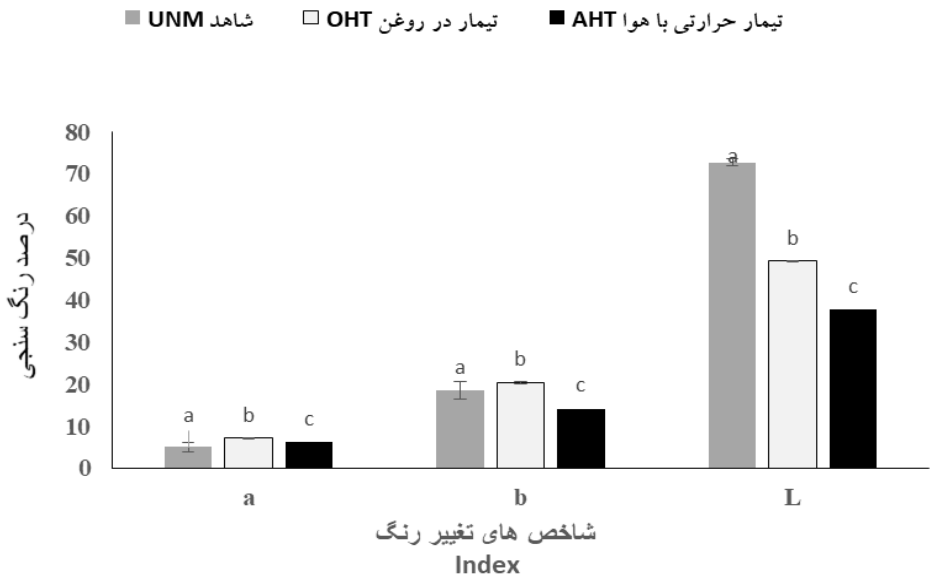
شکل ٤- تأثیر تیمار حرارتی در هوا و روغن بر درصد جذب آب چوب پالونیا بعد از ۲ و ۲٤ ساعت غوطه‌وری در آب.

Figure 4. The effect of heat treatment in air and oil on the percentage of water absorption of Paulownia wood after 2 and 24 hours of immersion in water.

اصلاح حرارتی چوب سبب کاهش جذب آب و هم‌چنین کاهش واکشیدگی چوب می‌شود. این نتایج با نتایج محبی و همکاران (۲۰۱٤) و سوری و همکاران (۲۰۲۲) همخوانی دارد (۱۳، ۲٦). جذب آب چوب تا حد زیادی به دسترس‌پذیری گروه‌های هیدروکسیل پلیمرهای سلولز، همی‌سلولز و لیگنین دیواره سلولی بستگی دارد. در فرآیند تیمار حرارتی برخی از ترکیبات شیمیایی چوب مانند همی‌سلولزها تخریب می‌شوند؛ این امر سبب کاهش جذب آب و کاهش واکشیدگی چوب خواهد شد (۲۷). در شرایط معمولی وقتی چوب در معرض شرایط محیطی مرطوب قرار می‌گیرد مولکول‌های آب بین پلیمرهای چوب نفوذ می‌کنند و باعث واکشیدگی آن می‌شوند؛ درحالی‌که در اثر تیمار حرارتی، دیواره‌های سلولی چوب دچار تغییرات شده و تعداد گروه‌های هیدروکسیل آزاد و به دنبال آن جذب آب و واکشیدگی چوب کاهش می‌یابد. علاوه بر این، نرم شدن لیگنین طی تیمار حرارتی و به دنبال آن مسدود شدن منافذ دیواره سلولی تحت‌تأثیر لیگنین سبب می‌شود آب وارد شده به ساختار چوب کاهش پیدا کرده و به دنبال آن واکشیدگی کاهش یابد (۲۸، ۲۹).

بررسی شاخص‌های تغییر رنگ L، a، b: نتایج مربوط به شاخص‌های L، a، b نمونه‌های تیمارشده حرارتی با هوا و روغن و شاهد در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که بین نمونه‌های تیمارشده حرارتی با هر دو روش و نمونه شاهد اختلاف معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵٪ وجود دارد (جدول ۲). بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر در شاخص L، به ترتیب مربوط به پالونیا شاهد با ۷۲/۷٦ درصد و پالونیا تیمارشده با هوا (ترمووود) با ۳۷/۷۷ درصد می‌باشد. در شاخص a بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر مربوط به پالونیا تیمار شده در روغن ۷/۱۲ درصد و پالونیا شاهد ۵/۱۲ درصد و در ارتباط با شاخص b، بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر به‌ترتیب مربوط به پالونیا تیمار شده در روغن ۲۰/۳ درصد و پالونیا تیمار شده در هوا ۱٤/۲ درصد می‌باشد. با

توجه به نتایج، در اثر تیمار حرارتی چوب پالونیا دچار تغییر رنگ شده و هم‌چنین میزان روشنایی آن کاهش پیدا کرده است. هم‌چنین چوب تیمار شده با هوا در مقایسه با چوب تیمارشده در روغن رنگ تیره‌تری دارد. در حقیقت تیمار حرارتی همیشه منجر به تیرگی رنگ چوب می‌شود؛ ترکیبات رنگی حاصل از تخریب همی‌سلولزها و مواد استخراجی و هم‌چنین تشکیل محصولات اکسایشی مانند کینون‌ها به‌عنوان دلایل تیره شدن رنگ چوب بیان شده است (۳۰، ۳۱، ۳۲، ۳۳).

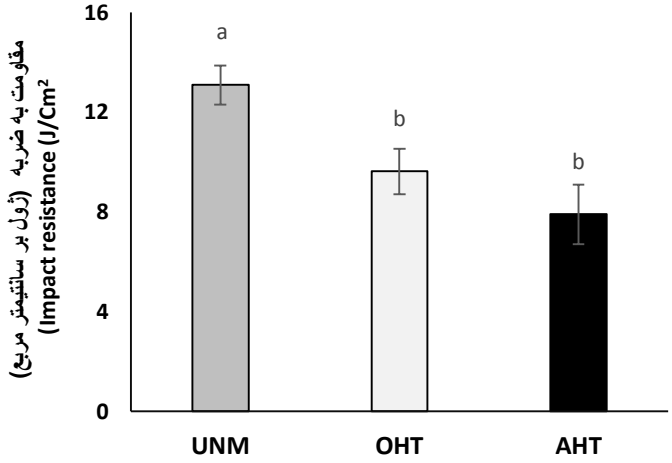


شکل ۵- تأثیر تیمار حرارتی چوب پالونیا در هوا و روغن بر شاخص‌های L، a و b.

Figure 5. The effect of heat treatment of Paulownia wood in air and oil on indexes of L,a,b.

ویژگی‌های مکانیکی

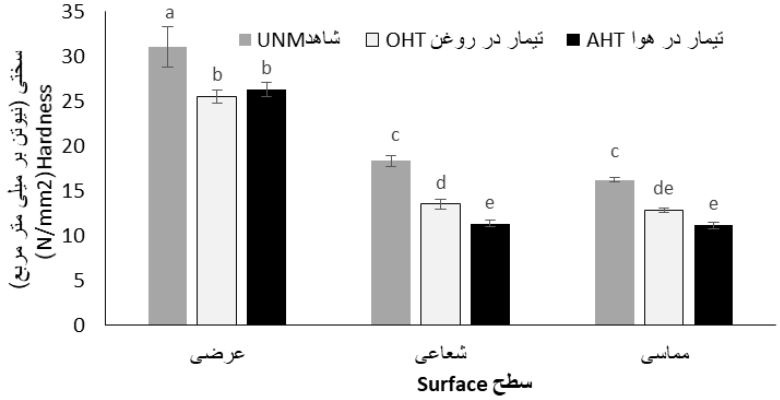
مقاومت به ضربه: با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌شود که بین مقاومت به ضربه چوب‌های تیمار شده حرارتی و تیمار نشده اختلاف معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵٪ وجود دارد. هم‌چنین با توجه به شکل ٦، بیش‌ترین و کم‌ترین مقاومت به ضربه به ترتیب مربوط به نمونه شاهد ۱۳/۰۹ ژول بر سانتی‌مترمربع و نمونه تیمار شده در هوا ۷/۹۱ ژول بر سانتی‌مترمربع می‌باشد. هم‌چنین بین نمونه‌های تیمارشده حرارتی در هوا و روغن اختلاف معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵٪ وجود ندارد. به‌طورکلی، هر دو تیمار حرارتی موجب کاهش مقاومت به ضربه شده است. این نتایج با نتایج گزارش شده توسط پژوهش‌گران همخوانی دارد (۲٦، ۳٤).



شکل ٦- تأثیر تیمار حرارتی در هوا و روغن بر مقاومت به ضربه چوب پالونیا (UNM: چوب تیمار نشده، OHT: چوب تیمار شده حرارتی در روغن، AHT: چوب تیمار شده حرارتی در هوا).

Figure 6. The effect of heat treatment in air and oil on the impact resistance of Paulownia wood (UNM: untreated wood, OHT: heat treated wood in oil, AHT: heat treated wood in air).

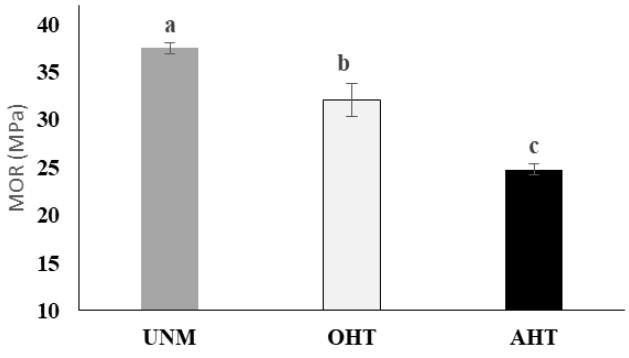
مقاومت به سختی: با توجه به نتایج (شکل ۷) مشاهده می‌شود که بین سختی نمونه‌های تیمار شده حرارتی با هر دو روش و نمونه شاهد اختلاف معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵٪ وجود دارد (جدول ۲). هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد که تیمار حرارتی موجب کاهش سختی در هر سه جهت طولی، شعاعی و مماسی می‌شود، به‌گونه‌ای که بیش‌ترین سختی مربوط به مقطع عرضی نمونه شاهد و کمترین سختی مربوط به مقطع شعاعی و مماسی نمونه تیمارشده در هوا بود. هم‌چنین در مقطع عرضی، بیش‌ترین سختی مربوط به نمونه شاهد بود و بین سختی نمونه‌های تیمار شده با هر دو روش در مقطع عرضی اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. در مقاطع شعاعی و مماسی بیش‌ترین سختی مربوط به نمونه شاهد و کم‌ترین مربوط به نمونه تیمارشده در هوا بود. کاهش سختی نمونه‌های تیمار شده در هوا احتمالاً به سبب واکنش اکسیداسیون و تخریب همی‌سلولزهای چوب می‌باشد (۳۵). تیمار حرارتی سبب نزدیک شدن سطح دما به حد دمای انتقال شیشه‌ای و نرم شدن پلیمرهای چوب و الاستیک یا پلاستیکی شدن این ماده شده و از سفتی و سختی آن در هر سه جهت طولی، مماسی و شعاعی می‌کاهد (۲۸، ۳٦). افزایش سختی نمونه‌های تیمار شده در روغن در مقایسه با نمونه‌های تیمار شده در هوا، به سبب مقدار کم‌تر آب آغشتگی و افزایش سلولز کریستالی و ایجاد پیوند عرضی پلیمر لیگنین در چوب تیمار شده در روغن می‌باشد (۳٦).



شکل ۷- تأثیر تیمار حرارتی در هوا و روغن بر سختی چوب پالونیا.

Figure 7. The effect of heat treatment in air and oil on the hardness of Paulownia wood.

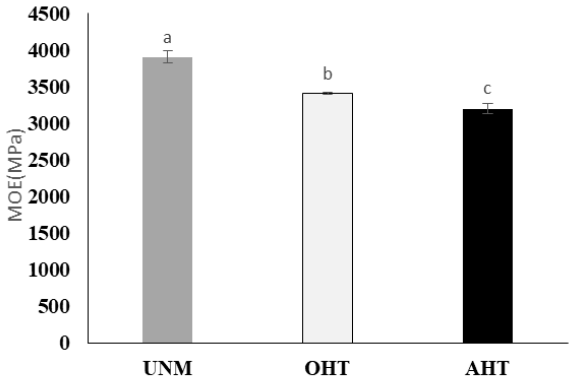
مدول گسیختگی (MOR): با توجه به شکل ۸ و جدول ۲، بین مدول گسیختگی نمونه‌های تیمار شده حرارتی و شاهد اختلاف معنی‌داری به لحاظ آماری در سطح ۹۵٪ وجود دارد. تیمار حرارتی موجب کاهش مدول گسیختگی شده به‌طوری‌که بیش‌ترین مدول گسیختگی (۳۷/۵ مگاپاسکال) مربوط به نمونه شاهد و کم‌ترین آن به نمونه تیمارشده حرارتی در هوا (۲٤/۸ مگاپاسکال) مربوط می‌باشد. تیمار حرارتی موجب تخریب هیدروکربن‌های چوب شده و این امر کاهش مدول گسیختگی چوب را موجب می‌شود (۱٦). هم‌چنین ارتباط زیادی با کم شدن همی‌سلولزها دارد (۱۷). با توجه به نتایج به‌دست آمده (شکل ۲) چوب تیمارشده حرارتی در هوا در مقایسه با تیمارشده در روغن دانسیته کم‌تری داشته است که نشان‌دهنده تخریب بیش‌تر کربوهیدرات‌ها در طی تیمار حرارتی با هوا می‌باشد. این امر موجب کاهش مدول گسیختگی چوب تیمار شده حرارتی در هوا در مقایسه با روغن شد. روغن داغ موجب انتقال حرارتی سریع و یکسان در چوب شده و این شرایط را در کل عناصر چوب به‌صورت یکسان فراهم می‌کند؛ هم‌چنین با ایجاد مانع بین چوب و اکسیژن محیط، از اکسایش چوب جلوگیری می‌نماید (۳۷).



شکل ۸- تأثیر تیمار حرارتی در هوا و روغن بر مدول گسیختگی چوب پالونیا (UNM: چوب تیمار نشده، OHT: چوب تیمار شده حرارتی در روغن، AHT: چوب تیمار شده حرارتی در هوا).

Figure 8. The effect of heat treatment in air and oil on the modulus of rupture of Paulownia wood (UNM: untreated wood, OHT: heat treated wood in oil, AHT: heat treated wood in air).

مدول الاستیسیته (MOE): مطابق نتایج به‌دست‌آمده تیمار حرارتی با هر دو روش موجب کاهش معنی‌دار مدول الاستیسیته شده است (شکل ۹). بیش‌ترین و کم‌ترین مدول الاستیسته به‌ترتیب مربوط به نمونه شاهد و نمونه تیمارشده در هوا می‌باشد. کاهش مقاومت خمشی در اثر تیمار حرارتی به دلیل ترد و شکننده شدن لیگنین و کاهش طول زنجیره‌های سلولزی در اثر حرارت می‌باشد. هم‌چنین افزایش دما و زمان تیمار حرارتی سبب جدا شدن لیگنین و همی‌سلولزها از دیواره سلولی و منجر به تخریب همی‌سلولزها و سلولزهای آمورف می‌شود که این عوامل سبب کاهش مقاومت خمشی چوب اصلاح‌شده حرارتی می‌گردد (۱۷، ۳۸).



شکل ۹- تأثیر تیمار حرارتی در هوا و روغن بر مدول الاستیسیته چوب پالونیا (UNM: چوب تیمار نشده، OHT: چوب تیمار شده حرارتی در روغن، AHT: چوب تیمار شده حرارتی در هوا).

Figure 9. The effect of heat treatment in air and oil on the modulus of elasticity of Paulownia wood (UNM: untreated wood, OHT: heat treated wood in oil, AHT: heat treated wood in air).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چوب پالونیا اصلاح حرارتی شده در هوا و روغن بررسی و مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که تیمار حرارتی با هر دو روش به‌طور معنی‌داری بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی تأثیر داشته به‌طوری‌که شاهد کاهش جذب آب، واکشیدگی، شاخص روشنایی، دانسیته، مقاومت به ضربه، سختی، مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته بودیم. هم‌چنین لازم به ذکر است که تیمار حرارتی در روغن تأثیر منفی کم‌تری در کاهش مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته و تغییرات رنگی در مقایسه با تیمار حرارتی در هوا داشته است. به‌طورکلی چوب پالونیا تیمار شده در روغن در مقایسه با هوا خواص فیزیکی و مکانیکی نسبتاً بهتری از خود نشان داد بنابراین این روش گزینه مناسب‌تری برای اصلاح حرارتی چوب پالونیا می‌باشد.

منابع

1. Import and export statistics of all types of raw wood, compressed wood, furniture, pulp and paper in 1401. (1402). Iranian Wood Industry Employers' Association. Number 14125. **https:// www.iranwoodind.com/ main_fa.asp? status= statistics** [In Persian]
2. Esteves, B., Ferreira. H., Viana, H., Ferreira, J., Domingos, I., Cruz-Lopes, L., Dennis, J., & Lina, N. (2021). Termite resistance, chemical and mechanical characterization of Paulownia tomentosa wood before and after heat treatment. *Forests*. 12 (8), 1114.
3. Rasouli, D., Bahmani, M., & Humar, M. (2017). Impregnability of Paulownia and Populus wood with copper based preservatives. *Drvna industrija*, 68 (3), 211-218.
4. Hill, C. A. S. (2006). Wood modification: chemical, thermal and other processes. John Wiley & Sons, Chichester. UK.
5. Karbalaei, H., Tarmian, A., Rasouli, D., & Pourmahdian, S. (2022). Effects of UV-curing epoxy acrylate and urethane acrylate coatings incorporated with ZnO nanoparticles on weathering resistance of thermally modified timber. *Wood Material Science & Engineering*, 17 (6), 868-877.
6. Rep, G., & Pohleven, F. (2001). Wood modification-a promising method for wood preservation. *Drvna industrija*. 52 (2), 71-76.
7. Yildiz, S., Yildiz, U., Colakolu, G., Derya, E., & Temyz Ali, G. (2003). The effects of heat treatment on the specific gravity of Beech and Spruce wood. IRG 34th Annual.
8. Kocaefe, D., Chaudry, B., Ponscak, S., Bouazara, M., & Pichette, A. (2007). Thermogravimetric study of high temperature treatment of Aspen: effect of treatment parameters on weight loss and mechanical properties. *J. of Material Sciences*. 42 (3), 854-866.
9. Despot, R., Hasan, M., Jug, M., & Sefc, B. (2008). Biological durability of wood modified by citric acid. DRVNA INDUSTRIJA. 59 (2), 55-59.
10. Militz, H., & Altgen, M. (2014) Processes and properties of thermally modified wood manufactured in Europe. In T. P. Schultz, B. Goodell and D. D. Nicholas (eds.) Deterioration and Protection of Sustainable Biomaterials. ACS Symposium Series 1158 (Oxford University Press), Pp. 269-285.
11. Dubey, M. K., Pang, S., & Walker, J. (2012). Changes in chemistry, color, dimensional stability and fungal resistance of Pinus radiata D. Don Wood with Oil Heat-Treatment Holzforschung. 66 (1), 49-57.
12. Surini, T., Charrier, F., Malvestio, J., Charrier, B., Moubarik, A., Castera, P., & Grelier, S. (2012). Physical properties and termite durability of maritime pine Pinus pinaster Ait., heat-treated under vacuum pressure. *Wood Science Technology*. 46 (1), 487-501.
13. Suri, I. F., Purusatama, B. D., Kim, J. H., Yang, G. U., Prasetia, 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 J. of Wood and Wood Products*. 80, 1389-1399.
14. Hidayat, W., Jang, J. H., Park, S. H., Qi, Y., Febrianto, F., Lee, S. H., & Kim, N. H. (2015). Effect of temperature and clamping during heat treatment on physical and mechanical properties of Okan (Cylicodiscus gabunensis [Taub.] Harms) wood. *BioResources*. 10 (4), 6961-6974.
15. Herrera-Diaz, R., Sepulveda-Villaroel, V., Torres-Mella, J., Salvo-Sepulveda, L., Llano-Ponte, R., Salinas-Lira, C., Peredo, M. A., & Ananias, R. A. (2019). Infuence of the wood quality and treatment temperature on the physical and mechanical properties of thermally modifed radiata pine. *European J. of Wood and Wood Products*. 77 (4), 661-671.
16. Kol, H. S. (2010). Characteristics of heat-treated Turkish pine and fir wood after ThermoWood processing. *J. of Environmental Biology*. 31: 6. 1007-1011.

17. Ayrilmis, N., Jarusombuti, S., Fueangvivat, V., & Bauchongkol, P. (2011). Effect of thermal-treatment of wood fibres on properties of flat-pressed wood plastic composites. *Polymer Degradation and Stability*. 96 (5), 818-822.
18. Dubey, M. K., Pang, S., & Walker, J. (2011). Efect of oil heating age on color and dimensional stability of heat treated Pinus radiata. *European J. of Wood and Wood Products*. 69 (2), 255-265.
19. Umar, I., Zaidon, A., Lee, S.H., & Halis, R. (2016). Oil-heat treatment of rubberwood for optimum changes in chemical constituents and decay resistance. *J. of Topical Forest Science*. 28 (1), 88-96.
20. Rapp, A. O., & Sailer, M. (2001). Oil heat treatment of wood in Germany-state of the art. Holz Roh Werkstoff. Germany. Hamburg.
21. Okon, K. E., Lin, F., Lin, X., Chen, C., Chen, Y., & Huang, B. (2018). Modifcation of Chinese fr (*Cunninghamia lanceolata* L.) wood by silicone oil heat treatment with micro-wave pretreatment. *European J. of Wood and Wood Products*. 76, 221-228.
22. Cheng, D., Chen, L., Jiang, S., & Zhang, Q. (2014). Oil uptake percentage in oil-heat-treated wood, its determination by soxhlet extraction, and its effects on wood compression strength parallel to grain. *BioResources*. 9 (1), 120-131.
23. Torniainen, P., Popescu, C. M., Jones, D., Scharf, A., & Sandberg, D. (2021). Correlation of Studies between Colour, Structure and Mechanical Properties of Commercially Produced ThermoWood® Treated Norway Spruce and Scots Pine. *Forests*. 12, 1165. **https://doi.org/ 10. 3390/f12091165.**
24. Xue-Hua, W., Ben-hua, F., & Jun-liang, L. (2014). Effect of vacuum heat treatment temperature on physical and mechanical properties of Eucalyptus pellita wood. *Wood and Fiber Science*. 2014, 368-3675.
25. Guller, B. (2012). Effects of heat treatment on density, dimensional stability and color of Pinus nigra wood. *African J. of biotechnology*. 11 (9), 2204-2209.
26. Mohebby, 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, 797-809.
27. Frederique Bidzanga Bessala, L., 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, 774. **https://doi.org/ 10.3390/polym15030774.**
28. Korkut, D. S., Korkut, S., Bekar, I., Budakçi, M., Dilik, T., & Çakicier, N. (2008). The effects of heat treatment on the physical properties and surface roughness of Turkish hazel (*Corylus colurna* L.) wood. *International J. of Molecular Sciences*. 9 (9), 1772-1783.
29. Korkut, S., Akgül, M., & Dündar, T. (2008). The effects of heat treatment on some technological properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood. *Bioresource Technology*. 99 (6), 1861-1868.
30. Sundqvist, B., & Morén, T. (2002). The influence of wood polymers and extractives on wood colour induced by hydrothermal treatment. *European J. of Wood and Wood Products*. 60 (5), 375-6.
31. Sundqvist, B. (2004). Colour changes and acid formation in wood during heating: Luleå tekniska universitet;
32. Tjeerdsma, B., Boonstra, M., Pizzi, A., Tekely, P., & Militz, H. (1998). Characterisation of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement. *Holz als Roh-und Werkstoff*. 56 (3), 149-153.
33. Bekhta, P., & Niemz, P. (2003). Effect of high temperature on the change in color, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood. *Holzforschung*. 57 (5), 539-546.
34. Vidholdová, Z., Slabejová, G., & Šmidriaková, M. (2021). Quality of oiland wax-based surface finishes on thermally modified oak wood. *Coatings*. 11 (2), 143.

35.Bakar, B. F. A., Hiziroglu, S., & Tahir, P. M. (2013). Properties of some thermally modified wood species. Materials & Design. 43, 348-355.
36.Navi, P., & Sandberg, D. (2012). Thermo- hydro- mechanical wood processing: Crc Press. 357p.
37.Rapp, A.O., & Sailer, M. (2001). Oil heat treatment of wood in Germany-state of the art. Holz Roh Werkstoff. Germany. Hamburg.
38.Mohebby, B., Sharifnia-Dizboni, & H., Kazemi-Najafi, S. (2009). Combined hydro-thermo-mechanical modification (CHTM) as an innovation in mechanical wood modification. Proceeding of 4th European Conference on Wood Modification (ECWM4), Stockholm, Sweden.