Research Article

Iranian Journal of Wood and Paper Science Research
Vol. 39, No. 3, Page 236-252 (2024) DOI: 10.22092/ijwpr.2024.366260.1776

Effect of thermo-oil process on biological, physical and mechanical performance of produced thermo wood

Hamid Reza Zarey[1], Reza Hajihassani[2*], Seyedeh Masoomeh Zamani[3] and Kamyar Salehi[4]

1- M.Sc. Graduate, Mechatronics, Azad Islamic University, Central Branch, Tehran, Iran
2*- Corresponding author, Associate Prof., Wood and Forest Products Science Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO) P.O. Box 13185-116, Tehran, Iran, Email: Reza.hajihassani@gmail.com
3-Assistant Prof., Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran
4-Assistant Prof., Wood and Forest Products Science Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Received: July 2024 Revised: August 2024 Accepted: August 2024

Abstract

Background and Objectives: Wood has some limitations in properties and applications due to its natural nature, which need to be modified. Wood modification is usually done with different aims and methods. One of the wood modification methods is thermal treatments in order to improvement of dimensional stability and biological resistance. But, it is surely affected on physical and mechanical properties of wood. Wood thermal modification in presence of oxygen causes the oxidation of its chemical structure which leads to detrimental effects on physical and mechanical properties. Therefore, elimination of oxygen in thermal modification can reduce its destructive effects. In current study, the effect of thermo-oil process on the function of white rot fungus has been investigated. Moreover, the effect of this process on engineering properties of birch and pine wood species was evaluated.

Methodology: In this study, two wood species of birch (*Betula sp.*) and pine (*Pinus sp.*) wood were cut into the desired lumbers. Heat treatment of the prepared lumbers was carried out in a cylinder which is equipped with pressure and vacuum system. Also, industrial recycled oil was used for heat treatment of the lumbers. The temperature and time of treatment were selected as 195 °C and 5 hours, respectively. At the end of the process, the used oil was drained into the oil storage tank and the lumbers were removed from the cylinder after applying vacuum. In order to investigation of biological resistance as well as physical and mechanical properties (water absorption and swelling, density, mass loss, bending strength, compression strength parallel to the grain and impact strength) test specimens were prepared from the treated and control lumbers based on the standard. The SPSS software was used for statistical analysis. The results were statistically analyzed based on a One-Way ANOVA method.

Results: Results revealed that thermo-oil treatment can reduce the functionality of white rot fungus and also its efficiency on physical and mechanical properties of both wood species.

Moreover, the results showed that this process improved the physical properties and reduced the mechanical properties, except compression strength parallel to the grain.

Conclusion: Thermo-oil treatment at high temperature causes structural changes of wood and affects its physical and mechanical properties. Also, the structural changes caused by heat treatment can be an effective and inhibiting factor to functionality of white rot fungus on physical and mechanical properties of wood.

Keywords: Thermo-wood, thermo-oil, physical and mechanical properties, fungus.

تأثیر فرایند روغن- گرمایی بر عملکرد بیولوژیکی، فیزیکی و مکانیکی گرماچوب تولید شده

حمیدرضا زارعی [۱]، رضا حاجی‌حسنی [۲*]، سیده معصومه زمانی [۳] و کامیار صالحی [۴]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد رشته مکاترونیک، دانشگاه آزاد اسلامی تهران، واحد مرکزی، تهران، ایران

۲*- نویسنده مسئول، دانشیار، بخش تحقیقات علوم چوب و فراورده‌های آن، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران، پست‌الکترونیک: Reza.hajihassani@gmail.com

۳-استادیار، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

۴- استادیار، بخش تحقیقات علوم چوب و فراورده‌های آن، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: تیر ۱۴۰۳ تاریخ اصلاح نهایی: مرداد ۱۴۰۳ تاریخ پذیرش: شهریور ۱۴۰۳

چکیده

سابقه و هدف: چوب با توجه به ماهیت طبیعی آن، دارای محدودیت‌هایی در خواص و کاربرد است که برای رفع آنها، نیاز به اصلاح دارد. اصلاح چوب معمولاً با اهداف مختلف و روش‌های متعددی انجام می‌شود. یکی از روش‌های اصلاح چوب، استفاده از تیمارهای حرارتی به‌منظور بهبود ثبات ابعادی و افزایش دوام بیولوژیکی چوب است؛ اما آنچه مسلم است آن است که اصلاح حرارتی چوب بر سایر خواص فیزیکی و مکانیکی چوب نیز تأثیرگذار است. اصلاح حرارتی چوب در حضور اکسیژن سبب اکسیداسیون ساختار شیمیایی چوب شده و منجر به کاهش خواص فیزیکی و مکانیکی چوب می‌گردد. ازاین‌رو حذف اکسیژن در طول فرایند تیمار حرارتی می‌تواند سبب کاهش اثرهای تخریبی این تیمار گردد. در این بررسی با به‌کارگیری فرایند روغن- گرمایی (Thermo-oil) و حذف اکسیژن در طول فرایند، به ارزیابی تأثیر این تیمار بر عملکرد قارچ عامل پوسیدگی سفید (*Trametes versicolor*) پرداخته شده است. همچنین تأثیر تیمار حرارتی (فرایند روغن- گرمایی) در محیط فاقد اکسیژن بر خواص مهندسی گونه‌های چوبی غان و کاج ارزیابی شد.

مواد و روش‌ها: در این بررسی نمونه‌های مورد نظر از دو گونه چوبی غان (*Betula SP.*) و کاج (*Pinus SP.*) تهیه شدند. تیمار گرمایی نمونه‌های مورد نظر با استفاده از فرایند روغن- گرمایی، در یک سیلندر مجهز به سیستم فشار و خلأ انجام شد. همچنین از روغن بازیافت شده صنعتی برای تیمار گرمایی نمونه‌ها استفاده گردید. دما و زمان مورد استفاده در این تیمار به ترتیب ۱۹۵ درجه سانتی‌گراد و ۵ ساعت در نظر گرفته شد. در پایان فرایند تیمار، روغن مورد استفاده از سیلندر اصلی به داخل مخزن روغن تخلیه شده و پس از اعمال خلأ نمونه‌ها از داخل سیلندر خارج گردیدند. به‌منظور بررسی مقاومت بیولوژیکی و نیز خواص فیزیکی و مکانیکی (جذب آب و واکشیدگی، دانسیته، کاهش وزن، مقاومت خمشی، مقاومت به فشار موازی الیاف و مقاومت به ضربه) از چوب‌های تیمار شده و شاهد، نمونه‌های آزمونی در ابعاد استاندارد تهیه گردید. به‌منظور تجزیه‌وتحلیل آماری از نرم‌افزار SPSS استفاده شد. از آزمون تجزیه واریانس ANOVA نیز برای مقایسه بین گروه‌ها استفاده شد.

یافته‌ها: بررسی نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که تیمار روغن- گرمایی می‌تواند سبب کاهش عملکرد قارچ عامل پوسیدگی سفید و نیز اثرگذاری کمتر این قارچ بر خواص فیزیکی و مکانیکی هر دو گونه چوبی گردد. همچنین نتایج نشان داد که تیمار روغن- گرمایی سبب بهبود ویژگی‌های فیزیکی و کاهش ویژگی‌های مکانیکی به‌استثنای مقاومت فشاری موازی الیاف گردید.

نتیجه‌گیری: تیمار روغن-گرمایی در درجه حرارت بالا سبب تغییرات ساختاری چوب شده و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چوب را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین تغییرات ساختاری به وجود آمده در اثر تیمار حرارتی می‌تواند عاملی مؤثر و بازدارنده بر اثرگذاری و عملکرد قارچ عامل پوسیدگی سفید بر خواص فیزیکی و مکانیکی چوب باشد.

واژه‌های کلیدی: گرما چوب، روغن- گرمایی، خواص فیزیکی و مکانیکی، قارچ.

مقدمه

چوب به‌عنوان یک ماده طبیعی با دارا بودن مزایای متعدد، برای سالیان متمادی مورد توجه انسان بوده و یکی از پرطرف دارترین مصالح در ساخت سازه‌ها، محصولات و مصنوعات چوبی بوده است. با وجود این، چوب به دلیل ماهیت طبیعی آن، دارای محدودیت‌هایی در خواص و کاربرد است که ممکن است برای به دست آوردن عملکرد و کاربرد مورد نظر نیاز به تغییر ساختاری داشته باشد (Navi and Sandberg, 2011). فناوری‌های مدرن، مقاومت و دوام این ماده را افزایش داده و نسل بزرگ و گسترده‌ای از فراورده‌های چوبی و فرایندها و ظرفیت‌های تولید را به همراه داشته‌اند، ازاین‌رو امروزه با پیشرفت فناوری، چوب دارای اهمیت زیادی برای مهندسان، معماران و طراحان سازه‌هاست.

اصلاح چوب به روش‌های مختلفی انجام می‌شود. نکته قابل توجه این است که اصلاح به‌طور معمول ثبات ابعادی را مدنظر قرار می‌دهد؛ یعنی جذب رطوبت را کاهش داده و دوام و مقاومت به تخریب را افزایش می‌دهد. همچنین اصلاح چوب مقاومت به تخریب در برابر عوامل غیربیولوژیکی را به همراه دارد (Hill, 2006). اصلاح گرمایی یکی از روش‌های اصلاح دوستدار محیط‌زیست است. تیمار حرارتی چوب برای اولین بار در دهه ۱۹۳۰ در کشور آلمان و در دهه ۱۹۴۰ در کشور آمریکا مطالعه شد. پس‌ازآن، مطالعات متعددی در این مورد در کشورهای مختلف انجام شده و یا در حال انجام است. در تیمارهای حرارتی برای تهیه ترموود معمولاً از دمای ۱۶۰-۲۶۰ درجه سانتی‌گراد همراه با تیمار بخار استفاده می شود. این تیمار سبب تغییرات شیمیایی ساختار چوب، تغییرات رنگی، کاهش تغییرات ابعادی، بهبود خاصیت عایق حرارتی، بهبود مقاومت به پوسیدگی (استفاده از دماهای بالا) و کاهش برخی خواص مکانیکی مانند مقاومت خمشی می‌گردد. وجود هوا یا اکسیژن در طول تیمار گرمایی ممکن است تخریب ترکیبات ساختاری چوب را تسریع کند. گزارش شده است که ثابت ماندن یا کاهش اتمسفر، تیمار گرمایی را تسهیل می‌نماید. به‌طور طبیعی در این فرایند نیتروژن اتمسفر استفاده می‌شود. مقدار تخریب گرمایی همی‌سلولزهای چوب در هوا یا اتمسفر آزاد بیشتر از محیط بسته است. تجزیه گرمایی لیگنین نیز در درجه حرارت کمتر از ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد به‌صورت محدود انجام می‌شود (Kamdem *et al.*, 2002).

اصلاح گرمایی چوب در مقایسه با دیگر فناوری‌های اصلاح چوب که از قبل در بازار وجود داشته، فرایند بسیار پیشرفته‌ای است (Hill, 2006). حرارت‌دهی چوب در دامنه گرمایی ۲۶۰-۱۴۰ درجه سانتی‌گراد برای مدت زمان طولانی، سبب کاهش برگشت‌ناپذیر جذب رطوبت توسط چوب می‌گردد (González-Peña *et al.*, 2004). این کاهش، ثبات ابعادی بیشتر (Krause *et al.*, 2004) حرکت و جابه‌جایی کمتر رطوبت در سرویس (Militz & Tjeerdsma, 2001) و بهبود مقاومت به تخریب قارچی برای کاربردهای بالای زمین را به همراه دارد (Welzbacher & Rapp, 2004). با وجود این، قرار دادن چوب در درجه حرارت بالا مقاومت آن را تحت اشکال مختلف تنش کاهش می‌دهد (González-Peña & Hale, 2007). بنابراین در تیمار گرمایی نیز، اصلاحات شیمیایی در ساختار چوب که در درجه حرارت بالا اتفاق می‌افتد، تغییرات مطلوبی را در ساختار فیزیکی چوب از قبیل کاهش هم‌کشیدگی و واکشیدگی، رطوبت تعادل کم، افزایش مقاومت به هوازدگی و افزایش زیبایی چوب، رنگ تیره و مقاومت به تخریب بالاتر را به همراه دارد؛ ولی متأسفانه ویژگی‌های مکانیکی مانند مقاومت، سختی و سفتی کاهش می‌یابد. کاهش مقاومت بستگی به روش اصلاح حرارتی، گونه چوبی و ویژگی‌های آن، میزان رطوبت اولیه چوب، اتمسفر، زمان و درجه حرارت تیمار دارد (Mitchell, 1998).

در بررسی اثر اصلاح حرارتی بر دوام زیستی یک گونه چوبی کم‌دوام، مشخص شد که تیمار حرارتی دوام چوب در برابر عوامل مخرب قارچی را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش

می‌دهد که به‌دلیل کاهش گروه‌های هیدروکسیل در اثر تیمار حرارتی است (Mburu *et al.*, 2007). Kamperidou (۲۰۱۹) نیز در بررسی‌های خود دوام بیولوژیکی چوب‌های کاج و صنوبر اصلاح شده با فرایند حرارتی- شیمیایی را در برابر قارچ‌های عامل پوسیدگی سفید و قهوه‌ای ارزیابی کرد. نتایج نشان دادند که چوب‌های تیمار شده با فرایند حرارتی نسبت به نمونه‌های شاهد، کاهش جرم کمتری در برابر قارچ‌های به‌کار برده شده داشتند. به‌عبارتی‌دیگر، تیمار حرارتی سبب افزایش مقاومت بیولوژیکی چوب‌ها می‌گردد.

نتایج بررسی میزان فعالیت لاکاز تولید شده توسط قارچ عامل پوسیدگی قهوه‌ای در چند گونه چوبی (صنوبر نیگرا، صنوبر دلتوئیدس، راش، کاج) شاهد و تیمار حرارتی شده نشان دادند اگرچه تولید لاکاز توسط قارچ مورد نظر در هر دو نمونه شاهد و تیمار حرارتی شده وجود دارد، اما کمترین میزان لاکاز در نمونه‌های شاهد ملاحظه گردید که بیانگر واکنش و تخریب بیشتر و مصرف بالاتر لاکاز در نمونه‌های شاهد است. حذف گروه‌های هیدروکسیل در اثر تیمار حرارتی دلیل اثرگذاری کمتر لاکاز در این نمونه‌ها بیان گردید (Zamani *et al*., 2023; Hajihassani *et al*., 2022).

Gao و همکاران (۲۰۱۶) تأثیر تیمار حرارتی تحت خلأ بر خواص چوب صنوبر را بررسی کردند. نمونه‌های چوبی تحت تیمار حرارتی با دو دمای ۱۴۰ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد برای مدت زمان ۱-۳ ساعت قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که افزایش دما و زمان تیمار حرارتی سبب بهبود ثبات ابعادی، تیره‌تر شدن رنگ چوب و کاهش مدول‌الاستیسیته می‌گردد. همچنین نتایج نشان داد که دوام زیستی نمونه‌های تیمار شده، در برابر قارچ پوسیدگی سفید در مقایسه با قارچ پوسیدگی قهوه‌ای بهتر بود.

Delucis و همکاران (۲۰۱۹) در بررسی‌های خود چوب‌های تند رشد اکالیپتوس را ابتدا در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد تیمار حرارتی و بعد در دمای ۲۲- درجه سانتی‌گراد سرمادهی کرده و مقاومت به پوسیدگی قارچ‌های عامل پوسیدگی سفید و قهوه‌ای این چوب‌ها را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که تیمار حرارتی و یخ‌زدگی باعث کاهش وزن کمتر نمونه‌های چوبی تحت پوسیدگی قارچی می‌گردد که دلیل آن را تغییرات ایجاد شده در لیگنین و مواد استخراجی در اثر تیمارهای اصلاحی بیان نمودند. تیمار حرارتی سبب افزایش مقدار لیگنین و سلولز می‌گردد (Wentzel *et al.*, 2019; Gaff *et al.*, 2019). درحالی‌که مقدار همی‌سلولز کاهش می‌یابد (Kozakiewicz *et al.*, 2020; Lengowski, *et al.*, 2021). به‌عبارتی‌دیگر، با کاهش یکی از اجزاء شیمیایی، افزایش نسبی در سایر اجزای شیمیایی حاصل می‌شود که این پدیده عاملی مؤثر در تغییرات ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چوب محسوب می‌گردد.

Ghorbani و همکاران (۲۰۲۰) در بررسی‌های خود نشان دادند تیمار حرارتی باعث افزایش صلبیت، استحکام نسبی و سختی چوب می‌گردد، اما در چوب تیمار نشده میکروفیبریل‌های با دیواره سلولی نازک و منعطف در مقابل فشار موازی الیاف دچار کمانش و لهیدگی می‌شوند.

در اصلاح حرارتی چوب، سخت و حجیم شدن دیواره سلولی در اثر افزایش اتصال‌های عرضی و واکنش‌های تراکمی ترکیبات شیمیایی لیگنین، سبب بهبود مقاومت فشار موازی الیاف چوب می‌گردد (Tomak *et al.,2014;* Yildiz *et al., 2013*).

در بررسی تأثیر اصلاح حرارتی بر ویژگی‌های چوب نشان داده شد که تیمار حرارتی در دمای ۲۱۰ درجه سانتی‌گراد می‌تواند ویژگی‌های خمشی (مقاومت خمشی و مدول‌الاستیسیته) را کاهش داده و ساختار شیمیایی چوب را تغییر دهد. نتایج آنالیز شیمیایی در این بررسی نشان داد که میزان همی‌سلولز و مواد استخراجی در اثر تیمار حرارتی کاهش می‌یابد، اما درصد سلولز و لیگنین چوب به‌طور نسبی روند افزایشی دارد (Corleto *et al.*, 2020).

در مطالعه‌ای که به‌منظور اثر تیمار حرارتی در دامنه ۱۸۰ تا ۲۶۰ بر روی مقاومت بیولوژیکی نمونه‌های چوبی انجام شد، نشان داده شد که چوب‌های تیمار شده در برابر پوسیدگی مقاوم بوده و ثبات ابعادی بهتری دارند. از سویی خواص مکانیکی نمونه‌ها در اثر تیمار حرارتی کاهش می‌یابد (Militz & Altgen, 2014).

Kaygin و همکاران (۲۰۰۹) تأثیر کاهش وزن بر خواص مکانیکی گونه پالونیا تیمار شده با فرایند حرارتی در دماهای ۱۶۰، ۱۸۰ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد را بررسی کردند. نتایج به‌دست‌آمده نشان دادند که با افزایش دمای تیمار حرارتی، مدول‌الاستیسیته و مقاومت خمشی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. آنان اظهار داشتند که تفاوت در کاهش خواص مکانیکی ارتباط مستقیمی با کاهش وزن نمونه‌ها در اثر تیمار حرارتی دارد.

Čabalová و همکاران (۲۰۱۹) برای بررسی تغییرات ساختار شیمیایی ترمومود نوئل میزان سلولز، هولو سلولز، لیگنین و مواد استخراجی را ارزیابی کردند. نتایج نشان دادند که پس از تیمار حرارتی درصد سلولز و لیگنین افزایشی بود، درحالی‌که میزان هولوسلولز و مواد استخراجی روند کاهشی داشتند. آنان افزایش میزان لیگنین را به دلیل کندانس شدن و واکنش‌های تراکمی آن بیان نمودند. همچنین افزایش درصد سلولز را نیز به تغییرات ساختاری چوب (کربنیزاسیون و اتصال عرضی) نسبت دادند. به‌طورکلی هریک از روش‌های اصلاح حرارتی می‌توانند تأثیر متفاوتی بر خواص فیزیکی و مکانیکی چوب بگذارند. تیمار حرارتی چوب در مجاورت اکسیژن می‌تواند سبب اکسیداسیون ساختار شیمیایی چوب شده و منجر به افت خواص فیزیکی و مکانیکی آن گردد. ازاین‌رو حذف اکسیژن در طول تیمار حرارتی می‌تواند اثرهای تخریبی این تیمار را کاهش دهد. این تحقیق نیز سعی دارد تا با به‌کارگیری فرایند روغن-گرمایی، تیمار اصلاحی چوب را در محیط فاقد اکسیژن انجام داده و تأثیر این فرایند را بر خواص فیزیکی، مکانیکی و نیز مقاومت بیولوژیکی محصول نهایی بررسی کند.

مواد و روش‌ها

در این بررسی نمونه‌های مورد نظر شامل ۲ گونه چوب کاج (*Pinus SP.*) و غان (*Betula SP.*) بودند که تحت تیمار گرمایی قرار گرفتند. تیمار گرمایی نمونه‌های مورد نظر با استفاده از فرایند روغن- گرمایی (Thermo-oil) انجام شد. برای این منظور، از یک سیلندر مجهز به سیستم فشار و خلأ استفاده شد (شکل ۱).

شکل ۱- سیلندر فرایند روغن- گرمایی
Figure 1. Thermo-oil process cylinder

همچنین از روغن بازیافت شده صنعتی برای تیمار روغن- گرمایی نمونه‌ها استفاده گردید. دمای مورد استفاده در این تیمار ۱۹۵ درجه سانتی‌گراد و زمان تیمار ۵ ساعت در نظر گرفته شد. در پایان عملیات روغن مورد استفاده از سیلندر اصلی به داخل مخزن روغن تخلیه شده و پس از اعمال خلأ نمونه‌ها از داخل سیلندر خارج گردیدند. به‌منظور بررسی مقاومت بیولوژیکی و نیز خواص فیزیکی و مکانیکی (جذب آب و واکشیدگی، دانسیته، کاهش وزن، مقاومت خمشی، مقاومت به فشار موازی الیاف و مقاومت به ضربه) از چوب‌های تیمار شده و شاهد، نمونه‌های آزمونی در ابعاد استاندارد تهیه گردید.برای آزمون مقاومت بیولوژیک نمونه‌های شاهد و تیمار شده از قارچ عامل پوسیدگی سفید استفاده شد. قارچ عامل پوسیدگی سفید از جنگل‌های شمال کشور (اسالم) تهیه شد. سپس اقدام به بازکشت قارچ‌های مورد نظر برای انجام مراحل بعدی گردید.

در این تحقیق از مالت اکستراکت آگار (Malt Extract

Agar) به‌عنوان محیط کشت قارچ استفاده شد. از مایع کشت تهیه شده به میزان ۵۰cc در هر شیشه kolle ریخته و دهانه آن را با پنبه مسدود کرده و به‌منظور استریل شدن به مدت ۲۰ دقیقه در داخل اتوکلاو با دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱/۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع قرار داده شد. سپس شیشه‌های kolle از اتوکلاو خارج و در دمای محیط خنک گردید. مرحله بعد انتقال نمونه‌های قارچ بر روی محیط کشت بود که در زیر هود استریل مجهز به لامپ uv و تهویه هوا انجام گردید. با استفاده از سوزن انتقال، قطعه کوچکی از ریسه‌های قارچ به همراه محیط کشت جدا و بر روی قسمت مرکزی محیط کشت در شیشه kolle قرار داده شد. سپس درب ظروف kolle را بسته و در ژرمیناتور با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵±۷۵ قرار داده شدند. قارچ عامل پوسیدگی سفید حداکثر طی ۲ هفته سطح محیط کشت داخل kolle را می‌پوشاند که در این مرحله آماده انتقال نمونه‌های چوبی است.

قبل از مجاورت قارچ با نمونه‌های مورد نظر، ابتدا نمونه‌های چوبی تهیه شده برای استریل شدن به مدت ۲۰ دقیقه در داخل اتوکلاو با دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱/۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع قرار داده شدند. سپس در زیر هود استریل دو عدد پایک شیشه‌ای استریل شده در داخل هر ظرف kolle که قارچ خالص شده سطح آن را کاملاً فرا گرفته بود، قرار داده شدند. درنهایت نمونه‌های چوبی استریل شده بر روی پایک‌های شیشه‌ای قرار داده‌شده و شیشه‌های kolle حاوی نمونه‌های چوبی و قارچ به ژرمیناتور با شرایط رطوبت نسبی ۵±۶۵ و دمای ۲۲ درجه سانتی‌گراد منتقل گردیدند. بدین ترتیب نمونه‌ها براساس استاندارد EN113 به مدت ۱۶ هفته در شرایط دمای ۲۲ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵±۶۵ قرار گرفتند. بعد از ۱۶ هفته کلیه نمونه‌ها را از داخل ژرمیناتور خارج کرده و مورد آزمون‌های فیزیکی، مکانیکی و ارزیابی مقاومت بیولوژیکی قرار گرفتند.

نمونه‌های شاهد و تیمار شده که در معرض قارچ عامل پوسیدگی سفید بودند مورد آزمون اندازه‌گیری کاهش وزن، دانسیته، مقاومت به ضربه و مقاومت به فشار موازی الیاف قرار گرفتند. استانداردهای مورد استفاده برای آزمون‌های فیزیکی، مکانیکی و ارزیابی مقاومت بیولوژیکی شامل EN113، ASTM D143-09 و ASTM D256 بود. پس از انجام کلیه آزمون‌ها، نتایج به‌دست‌آمده جمع‌آوری و تجزیه وتحلیل گردید. برای تجزیه‌وتحلیل آماری از نرم‌افزار SPSS استفاده شد. از آزمون تجزیه واریانس ANOVA نیز برای مقایسه بین گروه‌ها استفاده شد.

نتایج

در این پژوهش تأثیر تیمار روغن- گرمایی بر خواص فیزیکی و مکانیکی دو گونه چوبی (ترمووود) و نیز عملکرد قارچ عامل پوسیدگی سفید (*Trametes versicolor*) ارزیابی شد. جدول ۱ خلاصه تجزیه واریانس ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و مقاومت بیولوژیکی دو گونه چوبی را نشان می‌دهد.

جدول ۱- خلاصه تجزیه واریانس خواص فیزیکی و مکانیکی ۲ گونه چوبی

Table 1. Summarized of One-Way ANOVA for physical and mechanical properties of two wood species

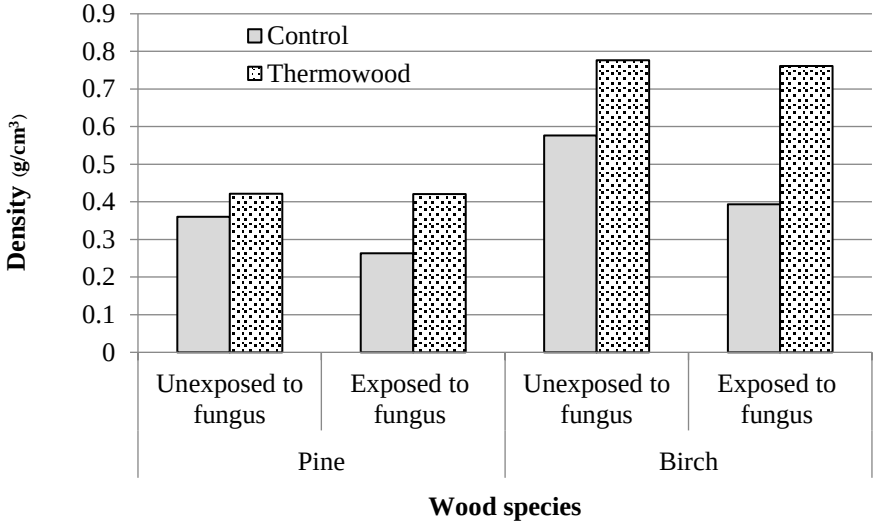
Source of variation	Wood species	Density (g/cm^3)		Mass loss (%)	Compression strength parallel to grain (Mpa)	Impact strength (kj/m^2)	Modulus of rapture (Mpa)	Modulus of elasticity (Mpa)	Water absorption (%)		Volume swelling (%)	
		Unexposed to fungus	Exposed to fungus	Exposed to fungus					2 hours	24 hours	2 hours	24 hours
Heat treatment	*Pinus Sp.*	0.000 **	0.000 **	0.000 **	0.570 ns	0.000 **	0.000 **	0.826 ns	0.000 **	0.000 **	0.000 **	0.000 **
	Betula Sp.	0.000 **	0.000 **	0.000 **	0.543 ns	0.000 **	0.000 **	0.414 ns	0.000 **	0.000 **	0.000 **	0.000 **

ns, * and ** Non-significant and significant at the 5% and 1% probability levels, respectively

دانسیته

دانسیته بدون مجاورت با قارچ

نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمار حرارتی بر دانسیته گونه‌های چوبی مورد مطالعه نشان داد که تیمار حرارتی دارای تأثیر معنی‌داری بر دانسیته هر ۲ گونه چوبی بوده است (جدول ۱). به‌طوری‌که تیمار حرارتی با فرایند روغن- گرمایی سبب افزایش دانسیته در هر دو گونه مورد مطالعه شده است (شکل ۲). مقایسه تیمارها در شکل ۲ نشان می‌دهد که میزان افزایش دانسیته در گونه چوبی کاج و توس به ترتیب برابر با ۱۶/۹۶ و ۳۴/۶۲ درصد بوده است.



شکل ۲- تأثیر فرایند روغن- گرمایی بر تغییرات دانسیته چوب کاج و توس در اثر مجاورت و بدون مجاورت با قارچ عامل پوسیدگی سفید

Figure 2. Effect of thermo-oil process on pine and birch density variation due to expose and unexposed to white rot fungus

دانسیته تحت مجاورت با قارچ عامل پوسیدگی سفید

نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمار حرارتی با فرایند روغن- گرمایی بر دانسیته گونه‌های چوبی قرار گرفته در معرض قارچ عامل پوسیدگی سفید نشان داد که در هر ۲ گونه چوبی، تیمار حرارتی دارای تأثیر معنی‌داری بر عملکرد قارچ در کاهش دانسیته بوده است (جدول ۱). شکل ۲ تأثیر تیمار حرارتی با فرایند روغن-گرمایی در جلوگیری از عملکرد قارچ عامل پوسیدگی سفید در کاهش دانسیته گونه‌های چوبی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. مقایسه میانگین نتایج به‌دست‌آمده در نمونه‌های شاهد و ترموود نشان دادند که تیمار حرارتی می‌تواند سبب کاهش عملکرد قارچ عامل پوسیدگی سفید در هر دو گونه چوبی مورد مطالعه گردد، به‌طوری‌که میزان بازدارندگی فرایند روغن-گرمایی در کاهش دانسیته ناشی از فعالیت قارچ در گونه چوبی کاج و توس به ترتیب برابر با ۹۹/۳۳ و ۹۳/۷۹ درصد به‌دست آمد (جدول ۲).

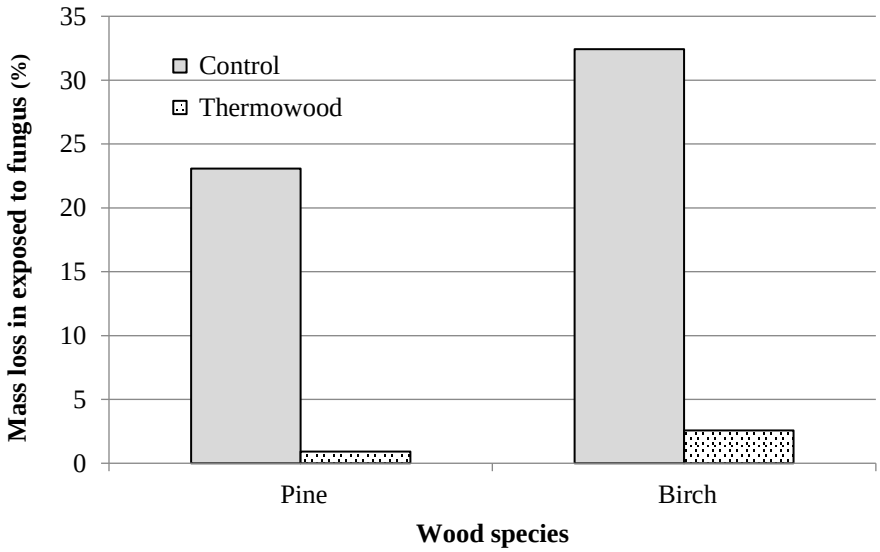
جدول ۲- کاهش دانسیته ناشی از فعالیت قارچ عامل پوسیدگی سفید در نمونه‌های شاهد و ترمووود

Table 2. Density reduction due to whit rot fungus activity in control and treated specimens

Wood species		pine	birch
Density reduction (%)	control	26.86	31.67
	Thermo-wood	0.18	1.97
Inhibition of thermo-oil process on density reduction caused by fungus activity (%)		99.33	93.79

کاهش وزن

نتایج حاصل از تجزیه واریانس تأثیر تیمار حرارتی بر کاهش وزن ناشی از فعالیت قارچ عامل پوسیدگی سفید در گونه‌های چوبی مورد مطالعه نشان دادند که تیمار حرارتی دارای تأثیر معنی‌داری بر عملکرد این قارچ روی کاهش وزن هر دو گونه چوبی بوده است (جدول ۱). به‌طوری‌که میزان کاهش وزن ناشی از فعالیت قارچ سفید در نمونه‌های ترمووود به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کمتر از نمونه‌های شاهد است که این موضوع بازدارندگی تیمار حرارتی در فعالیت قارچ سفید را نشان می‌دهد (شکل ۳). با در نظر گرفتن میانگین عددی کاهش وزن در نمونه‌های شاهد و ترمووود مربوط به هرگونه چوبی در شکل ۳ مشخص گردید که میزان بازدارندگی فرایند روغن-گرمایی در کاهش دانسیته ناشی از فعالیت قارچ در گونه چوبی کاج و توس به ترتیب برابر با ۹۶/۰۷ و ۹۲/۰۷ درصد بوده است.



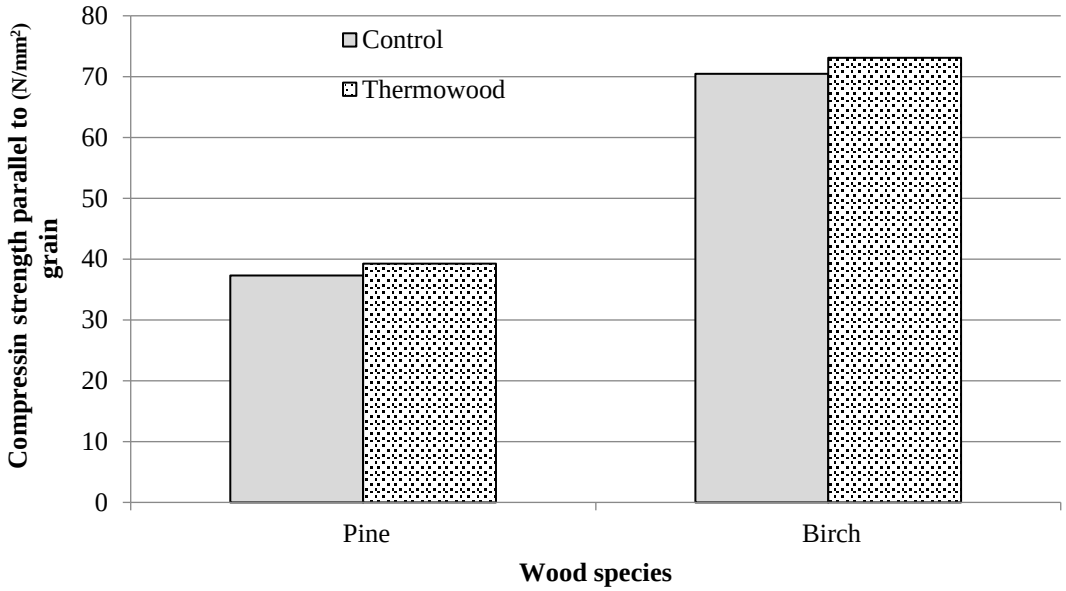
شکل ۳- تأثیر فرایند روغن- گرمایی بر کاهش وزن نمونه‌های چوبی قرارگرفته در معرض قارچ عامل پوسیدگی سفید

Figure 3. Effect of thermo-oil process on mass loss of wood specimens exposed to white rot fungus

مقاومت فشاری موازی الیاف

نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمار حرارتی با فرایند روغن-گرمایی بر مقاومت فشاری موازی الیاف گونه‌های چوبی کاج و توس نشان دادند که این تیمار دارای اثر معنی‌داری بر ویژگی مکانیکی ذکرشده نبوده است (جدول ۱). شکل ۴ تأثیر تیمار حرارتی بر مقاومت فشاری موازی الیاف گونه‌های چوبی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. مقایسه میانگین نتایج به‌دست‌آمده در نمونه‌های شاهد و ترمووود نشان دادند که هرچند تیمار حرارتی دارای اثر معنی‌داری بر مقاومت فشاری موازی الیاف نیست، اما به لحاظ عددی مقدار این

ویژگی مکانیکی در نمونه‌های ترموود هر دو گونه چوبی بیشتر از نمونه‌های شاهد است (شکل ۴). به‌طوری‌که مقدار مقاومت فشاری موازی الیاف نمونه‌های ترموود گونه چوبی کاج و توس در مقایسه با نمونه‌های شاهد به ترتیب به میزان ۵/۲۵ و ۳/۷۶ درصد افزایش یافت. ازاین‌رو نتایج بیانگر آن است که تیمار حرارتی با فرایند روغن–گرمایی می‌تواند سبب بهبود نسبی مقاومت فشاری موازی الیاف گردد.

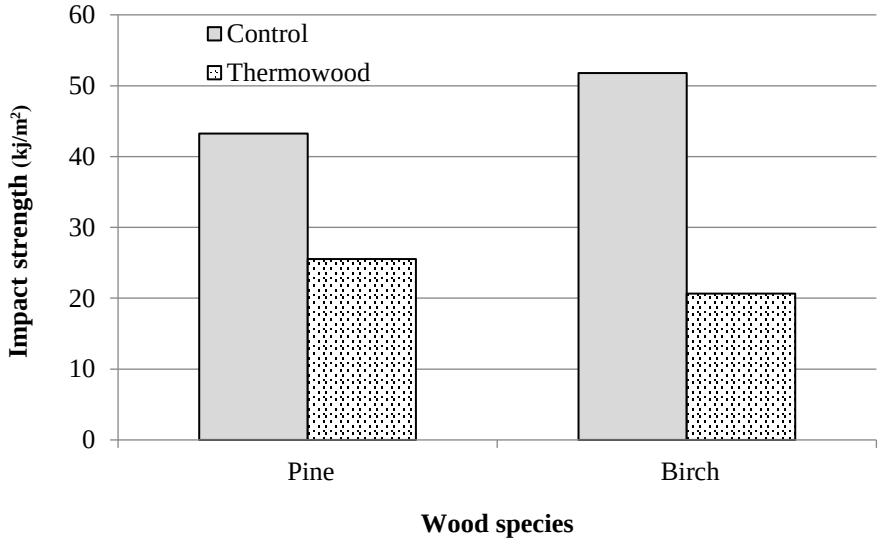


شکل ۴- تأثیر فرایند روغن–گرمایی بر مقاومت فشاری موازی الیاف کاج و توس

Figure 4. Effect of thermo-oil process on compression strength parallel to grain of pine and birch wood

مقاومت به ضربه

نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمار حرارتی با فرایند روغن–گرمایی بر مقاومت به ضربه گونه‌های چوبی کاج و توس نشان دادند که این تیمار دارای اثر معنی‌داری بر این ویژگی مکانیکی بوده است (جدول ۱). شکل ۵ تأثیر فرایند روغن–گرمایی بر مقاومت به ضربه گونه چوبی کاج و توس را نشان می‌دهد که بیانگر کاهش مقاومت به ضربه در هر دو گونه چوبی است. به‌طوری‌که مقایسه میانگین نتایج به‌دست‌آمده نشان دادند که مقاومت به ضربه نمونه‌های ترموود کاج و توس به ترتیب به مقدار ۴۰/۹۵ و ۶۰/۱۱ درصد نسبت به نمونه‌های شاهد کاهش یافته است (شکل ۵).

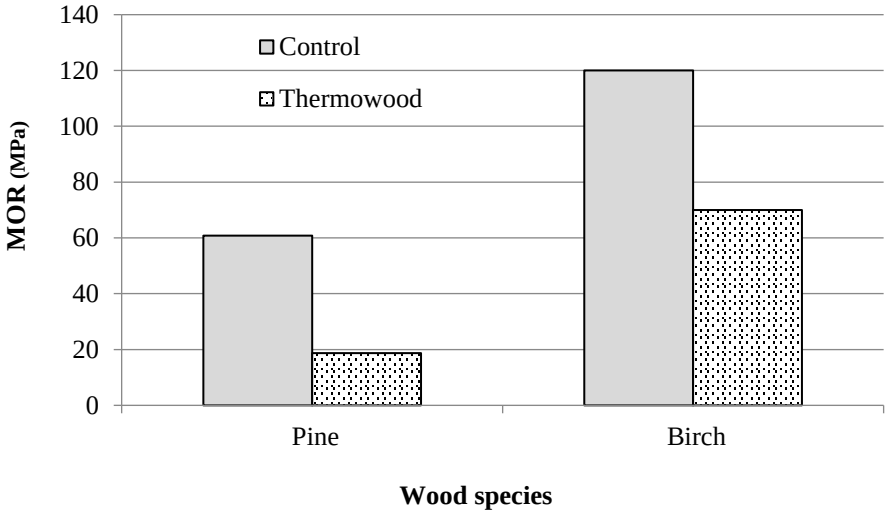


شکل ۵- تأثیر فرایند روغن-گرمایی بر مقاومت به ضربه کاج و توس

Figure 5. Effect of thermo-oil process on impact strength of pine and birch wood

مقاومت خمشی (MOR)

نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمار حرارتی بر مقاومت خمشی گونه‌های چوبی مورد مطالعه نشان داد که تیمار حرارتی دارای تأثیر معنی‌داری بر مقاومت خمشی هر ۲ گونه چوبی بوده است (جدول ۱). به‌طوری‌که تیمار حرارتی با فرایند روغن- گرمایی سبب کاهش مقاومت خمشی در هر دو گونه چوبی کاج و توس شده است (شکل ۶). مقایسه تیمارها در شکل ۶ نشان می‌دهد که میزان کاهش مقاومت خمشی در گونه چوبی کاج و توس به ترتیب برابر با ۶۹/۲۴ و ۴۱/۶۱ درصد بوده است.

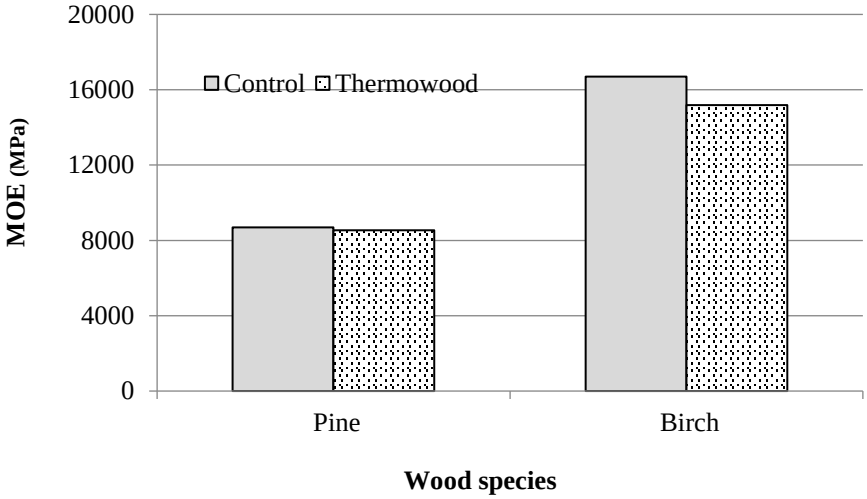


شکل ۶- تأثیر فرایند روغن-گرمایی بر مقاومت خمشی کاج و توس

Figure 6. Effect of thermo-oil process on bending strength of pine and birch wood

مدول‌الاستیسیته (MOE)

نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمار حرارتی با فرایند روغن- گرمایی بر مدول‌الاستیسیته گونه‌های چوبی کاج و توس نشان دادند که این تیمار دارای اثر معنی‌داری بر این ویژگی مکانیکی نبوده است (جدول ۱). شکل ۷ تأثیر تیمار حرارتی بر مقاومت فشاری موازی الیاف گونه‌های چوبی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. مقایسه میانگین نتایج به‌دست‌آمده در نمونه‌های شاهد و ترمووود نشان دادند که تیمار حرارتی با فرایند روغن- گرمایی سبب کاهش ناچیز مدول‌الاستیسیته در هر دو گونه چوبی کاج و توس گردید (شکل ۷). به‌طوری‌که مقدار مدول‌الاستیسیته نمونه‌های ترمووود گونه چوبی کاج و توس در مقایسه با نمونه‌های شاهد به ترتیب به میزان ۱/۷۷ و ۹/۰۳ درصد کاهش یافت.

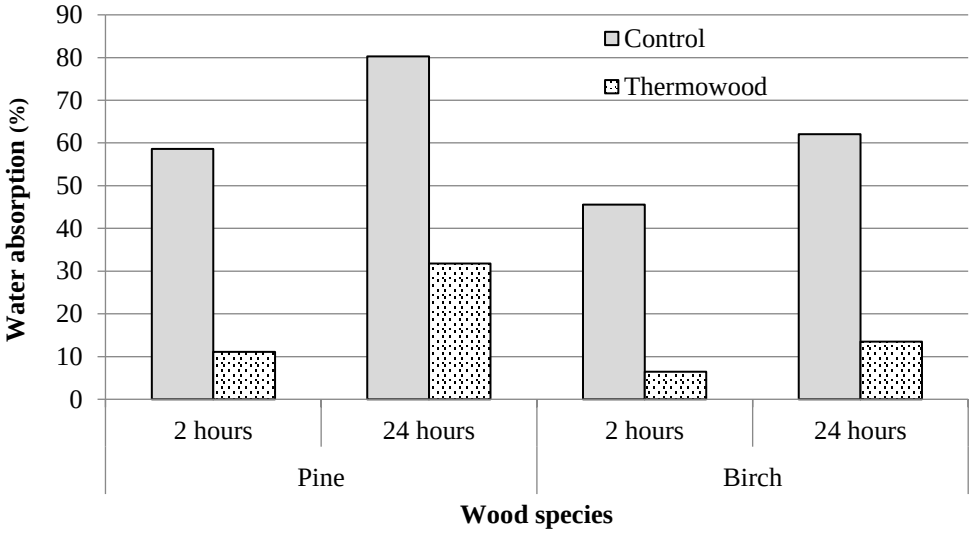


شکل ۷- تأثیر فرایند روغن-گرمایی بر مدول‌الاستیسیته کاج و توس

Figure 7. Effect of thermo-oil process on modulus of elasticity of pine and birch wood

جذب آب

نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمار حرارتی با فرایند روغن- گرمایی بر میزان جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب گونه‌های چوبی مورد مطالعه نشان داد که تیمار حرارتی دارای تأثیر معنی‌داری بر هر دو میزان جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت بوده است (جدول ۱). به‌طوری‌که تیمار حرارتی با فرایند روغن- گرمایی سبب کاهش جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت در هر دو گونه چوبی کاج و توس شده است (شکل ۸). مقایسه تیمارها در شکل ۸ نشان می‌دهد که میزان کاهش جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت در گونه چوبی کاج به ترتیب برابر با ۸۱/۱۱ و ۶۰/۴۱ درصد و در گونه چوبی توس به ترتیب برابر با ۸۵/۸۲ و ۷۸/۲۲ درصد بوده است.

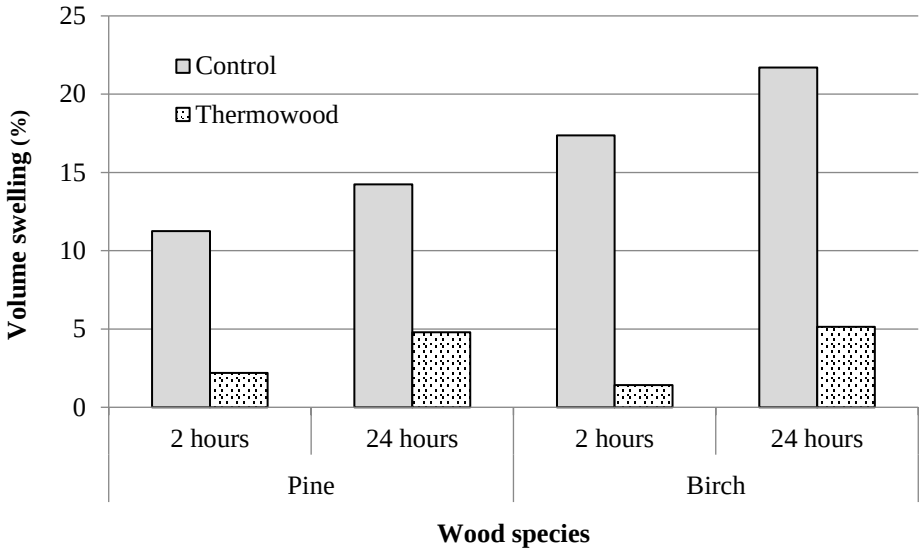


شکل ۸- تأثیر فرایند روغن-گرمایی بر میزان جذب آب کاج و توس

Figure 8. Effect of thermo-oil process on water absorption of pine and birch wood

واکشیدگی حجمی

نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمار حرارتی با فرایند روغن- گرمایی بر میزان واکشیدگی حجمی ۲ و ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب گونه‌های چوبی مورد مطالعه نشان داد که تیمار حرارتی دارای تأثیر معنی‌داری بر هر دو میزان واکشیدگی حجمی ۲ و ۲۴ ساعت بوده است (جدول ۱). به‌طوری‌که تیمار حرارتی با فرایند روغن- گرمایی سبب کاهش واکشیدگی حجمی ۲ و ۲۴ ساعت در هر دو گونه چوبی کاج و توس شده است (شکل ۹). مقایسه تیمارها در شکل ۹ نشان می‌دهد که میزان کاهش واکشیدگی حجمی ۲ و ۲۴ ساعت در گونه چوبی کاج به ترتیب برابر با ۸۰/۵۸ و ۶۶/۳۸ درصد و در گونه چوبی توس به ترتیب برابر با ۹۱/۸۶ و ۷۶/۳۴ درصد بوده است.



شکل ۹- تأثیر فرایند روغن-گرمایی بر واکشیدگی حجمی کاج و توس

Figure 9. Effect of thermo-oil process on volume swelling of pine and birch wood

بحث

هدف از این بررسی، ارزیابی تأثیر تیمار حرارتی با فرایند روغن-گرمایی بر خواص فیزیکی، مکانیکی و نیز مقاومت بیولوژیکی دو گونه چوبی بوده است. نتایج حاصل از این بررسی نشان دادند که فرایند روغن-گرمایی سبب افزایش دانسیته در هر دو گونه مورد مطالعه گردید. هرچند تیمار حرارتی در دمای بالا سبب تغییرات شیمیایی در ساختار چوب و کاهش وزن می‌گردد و این پدیده عاملی مؤثر در تغییرات ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چوب محسوب می‌شود (Kozakiewicz *et al.*, 2020; Lengowski, *et al.*, 2021). اما در فرایند روغن-گرمایی نفوذ روغن در قسمت‌های سطحی گونه چوبی کاج و توس سبب افزایش میزان دانسیته گردید.

نتایج این بررسی نشان دادند که تیمار حرارتی با فرایند روغن-گرمایی می‌تواند سبب کاهش فعالیت قارچ عامل پوسیدگی سفید گردد و از افت دانسیته جلوگیری نماید، به‌طوری‌که میزان کاهش دانسیته در اثر فعالیت این قارچ به‌طور چشمگیری در نمونه‌های ترموود کمتر از نمونه‌های شاهد بود. این موضوع نشان می‌دهد که تیمار حرارتی می‌تواند عاملی بازدارنده در عملکرد قارچ مورد نظر باشد. در حقیقت تیمار گرمایی باعث تجزیه ساختار شیمیایی چوب ازجمله کاهش گروه‌های هیدروکسیل می‌گردد که عاملی در کاهش اثرگذاری و عملکرد این دو نوع قارچ است (Mburu *et al.*, 2007). مضاف بر اینکه نفوذ روغن در قسمت‌های سطحی نمونه‌های چوبی نیز می‌تواند سبب کاهش اثرگذاری قارچ عامل پوسیدگی سفید گردد.

همچنین نتایج نشان دادند که میزان کاهش وزن ناشی از فعالیت قارچ عامل پوسیدگی در نمونه‌های ترموود به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کمتر از نمونه‌های شاهد بوده است که این موضوع بازدارندگی فرایند روغن-گرمایی در فعالیت این نوع قارچ را نشان می‌دهد. کاهش گروه‌های هیدروکسیل در اثر تیمار حرارتی سبب محدود شدن اثرگذاری قارچ عامل پوسیدگی سفید و قهوه‌ای شده و تخریب کمتر و کاهش وزن کمتری را به همراه دارد (Mburu *et al.*, 2007). از سویی همان‌طور که قبلاً اشاره شد نفوذ روغن در قسمت‌های سطحی نمونه‌های چوبی نیز می‌تواند سبب کاهش اثرگذاری قارچ عامل پوسیدگی سفید گردد.

نتایج بررسی مقاومت فشاری موازی الیاف نشان دادند که

فرایند روغن-گرمایی باعث افزایش ناچیز این ویژگی مکانیکی در هر دو گونه کاج و توس گردید که بیانگر اثر مثبت تیمار حرارتی بر این ویژگی مکانیکی است. تیمار حرارتی باعث افزایش صلبیت و استحکام نسبی چوب می‌گردد اما در چوب تیمار نشده میکروفیبریل‌های با دیواره سلولی نازک و منعطف در مقابل فشار موازی الیاف دچار کمانش و لهیدگی می‌شوند (Ghorbani, *et al.*, 2020). از سویی در اصلاح حرارتی چوب، سخت و حجیم شدن دیواره سلولی در اثر افزایش اتصال‌های عرضی و واکنش‌های تراکمی ترکیبات شیمیایی لیگنین، سبب بهبود مقاومت فشار موازی الیاف چوب می‌گردد (Tomak *et al.*, 2014; Yildiz *et al.*, 2013).

بررسی تأثیر فرایند روغن-گرمایی بر مقاومت به ضربه گونه‌های چوبی مورد مطالعه نشان دادند که این فرایند باعث کاهش مقاومت به ضربه می‌گردد که این موضوع نشان‌دهنده اثر منفی تیمار حرارتی بر مقاومت به ضربه است. البته کاهش وزن و ترد و شکننده شدن ساختار چوب در اثر تیمار حرارتی می‌تواند عاملی مؤثر در کاهش مقاومت به ضربه باشد (Kozakiewicz *et al.*, 2020; Lengowski, *et al.*, 2021; Ghorbani, *et al.*, 2020).

همچنین نتایج نشان داد که فرایند روغن- گرمایی سبب کاهش مقاومت خمشی و مدول‌الاستیسیته در هر دو گونه چوبی کاج و توس گردید. قرار دادن چوب در درجه حرارت بالا مقاومت آن را تحت اشکال مختلف تنش کاهش می‌دهد (González-Peña و Hale، ۲۰۰۷). اصلاحات شیمیایی در ساختار چوب که در درجه حرارت بالا اتفاق می‌افتد، متأسفانه ویژگی‌های مکانیکی مانند مقاومت، سختی و سفتی را کاهش می‌دهد (Mitchell، ۱۹۹۸). به‌عبارتی‌دیگر، در تیمار حرارتی با کاهش یکی از اجزاء شیمیایی مانند همی‌سلولز (Kozakiewicz *et al.*, 2020; Lengowski, *et al.*, 2021)، افزایش نسبی در سایر اجزای شیمیایی مانند لیگنین، سلولز و مواد استخراجی حاصل می‌شود (Wentzel *et al.*, 2019; Gaff *et al.*, 2019) که این پدیده عاملی مؤثر در تغییرات ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چوب محسوب می‌شود.

بررسی تأثیر فرایند روغن-گرمایی بر میزان جذب آب و واکشیدگی حجمی نشان داد که این فرایند سبب کاهش قابل‌توجه این دو ویژگی فیزیکی گردید. در فرایند روغن-گرمایی، ماده روغنی استفاده شده می‌تواند با ایجاد پوشش ضد رطوبتی سبب کاهش نفوذ و جذب رطوبت در چوب گردد. از سوی دیگر، در اصلاح حرارتی، تغییر ساختار فیزیکی و شیمیایی چوب ازجمله سخت و حجیم شدن دیواره سلولی در اثر افزایش اتصال‌های عرضی و واکنش‌های تراکمی ترکیبات شیمیایی لیگنین (Tomak *et al.*,2014; Yildiz *et al.*, 2013) و کاهش همی‌سلولز (Kozakiewicz *et al.*, 2020; Lengowski, *et al.*, 2021) می‌تواند سبب کاهش جذب رطوبت و افزایش ثبات ابعادی گردد.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، به‌طورکلی می‌توان گفت که تیمار روغن-گرمایی در درجه حرارت بالا سبب تغییرات فیزیکی و شیمیایی در ساختار چوب می‌گردد که ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چوب را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این تغییرات با توجه به روش اصلاح حرارتی، گونه چوبی و ویژگی‌های آن، میزان رطوبت اولیه چوب، اتمسفر، زمان و درجه حرارت تیمار متفاوت است. همچنین تغییرات ساختاری به وجود آمده در اثر تیمار حرارتی می‌تواند عاملی مؤثر و بازدارنده بر اثرگذاری و عملکرد قارچ عامل پوسیدگی سفید بر خواص فیزیکی و مکانیکی چوب باشد.

فهرست منابع مورد استفاده

-American Society for Testing of Materials. ASTM D 143-09 (2014). Standard methods of testing small clear specimens of timber.

-American Society for Testing of Materials. ASTM D256 (2018). Standard test methods for determining the Izod pendulum impact strength of plastics.

-Čabalová, I., Zachar, M., Kačík, F. and Tribulová, T., 2019. Impact of Thermal Loading on Selected Chemical and Morphological Properties of Spruce Thermo Wood. BioResources, 14(1), 387-400.

-Corleto, R., Gaff, M., Niemz, P., Sethy, A.K., Todaro, L., Ditommaso, G. and Kamboj, G., 2020. Effect of thermal modification on properties and milling behaviour of African padauk (Pterocarpus soyauxii

Affecting the Mechanical Properties of Thermally Modified Black Poplar (Populus nigra L.). BioResources, 15(2), 3915-3929.

-Krause, A., Hof, C. and Militz, H., 2004. Novel Wood Modification Processes for Window and Cladding Products. In: 35th Annual Meeting, International Research Group on Wood Protection, IRG/WP 04–40285.

-Lengowski, E.C., Bonfatti Júnior, E.A., Nisgoski, S., Bolzon de Muñiz, G.I. and Klock, U., 2021. Properties of thermally modified teakwood. Maderas. Ciencia y tecnología, 23(10), 1-16.

-Mburu, F., Dumarc, S., Huber, F., Petrissans, M. and Gérardin, P., 2007. Evaluation of Thermally Modified Grevillea Robusta 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.

-Militz, H. and Altgen, M., 2014. "Processes and Properties of Thermally Modified Wood Manufactured in Europe". American Chemical Society in Deterioration and Protection of Sustainable Biomaterials; Schultz, T.et al.; ACS Symposium Series; American Chemical Society: Washington, DC, 269-285.

-Mitchell, P.H., 1988. Irreversible Property Changes of Small Loblolly Pine Specimens Heated in Air, Nitrogen, or Oxygen. Wood and Fiber Science, 20(3): 320–55.

-Navi, P. and Sandberg, D., 2011. Thermo-Hydro-Mechanical Processing of Wood. Engineering Sciences, 360 p.

-The European Standard EN 113. 1997 .Wood preservatives. Test method for determining the protective effectiveness against wood destroying basidiomycetes.

-Tomak, E.D., Ustaomer, D., Yildiz, S. and Pesman, E., 2014. Changes in surface and mechanical properties of heat-treated wood during natural weathering. Measurement, 53(5), 30-39.

-Welzbacher, C.R. and Rapp, A.O., 2004. Determination of the Water Sorption Properties and Preliminary Results from Field Tests above Ground of Thermally Modified Material from Industrial Scale Processes. In: 35th Annual Meeting, International Research Group on Wood Protection, IRG/WP 04–40279.

-Wentzel, M., Fleckenstein, M., Hofmann, T. and Militz, H., 2019. Relation of chemical and mechanical properties of Eucalyptus nitens wood thermally modified in open and closed systems. Wood Material Science & Engineering, 14(3), 165-173.

-Yildiz, S., Tomak, E.D., Yildiz, U.C. and Ustaomer, D., Taub.) wood. Journal of Materials Research and Technology, 9(4), 9315-9327.

-Delucis, R., Machado, S.F., Missio, A.L. and Gatto, D. A. 2019. Decay resistance of two-step freezing–heat-treated fast-growing eucalyptus wood. Journal of the Indian Academy of Wood Science, 16(2), 139-143.

-Gaff, M., Babiak, M., Kačík, F., Sandberg, D., Turčani, M., Hanzlík, P. and Vondrová, V., 2019. Plasticity properties of thermally modified timber in bending–the effect of chemical changes during modification of European oak and Norway spruce. Composites Part B: Engineering, 165(5), 613-625.

-Gao, H., Sun, M.Y., Cheng, H.Y., Gao, W.L. and Ding, X.L., 2016. Effects of Heat treatment under vacuum on properties of poplar. BioResources, 11(1), 1031-1043.

-Ghorbani, M., Nikkhah Shahmirzadi, A. and Toopa, A., 2020. Effect of densification on the practical properties of chemical and thermal modified poplar wood. Iranian Journal of Wood and Paper Industries, 11(2), 185-197.

-González-Peña, M.M. and Hale, M.D.C., 2007. The Relationship between Mechanical Performance and Chemical Changes in Thermally Modified Wood. In: Proceedings 3rd European Conference on Wood Modification, pp. 169–72.

-González-Peña, M.M., Breese, M.C. and Hill, C.A.S., 2004. Hygroscopicity in Heat Treated Wood: Effect of Extractives. In: Proceedings 1st International Conference on Environmentally- Compatible Forest Products, pp. 105–19.

-Hajihassani, H., Zamani, S.M., Salehi, K. and Ghahri, S., 2022. Evaluation of engineering characteristics of decayed thermo-wood by brown rot fungus. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 37(4), 306-317.

-Hill, C.A.S., 2006. Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK.

-Kamdem, D.P., Pizzi, A. and Jermannaud, A., 2002. Durability of Heat-Treated Wood. Holz als Roh-und Werkstoff, 60:1–6.

-Kamperidou, V., 2019. The biological durability of thermally-and chemically modified black pine and poplar wood against basidiomycetes and mold action. Forests, 10(12), 1111-1128.

-Kaygin, B., Gunduz, G. and Aydemir, D., 2009. The effect of mass loss on mechanical properties of heat treated Paulownia wood. Wood Research, 54(2), 101-108.

-Kozakiewicz, P., Drożdżek, M., Laskowska, A., Grześkiewicz, M., Bytner, O., Radomski, A. and Zawadzki, J., 2020. Chemical Composition as Factor

2013. Effect of artificial weathering on the properties of heat-treated wood. Polymer degradation and stability, 98(8), 1419-1427.

-Zamani, S.M., Hajihassani, R. and Ghahri, S., 2023. Bio-durability and engineering characteristics of heat-treated poplar wood. Drvna Industrija, 74(4), 469-477.