Iranian Journal of Wood and Paper Science Research

Print ISSN: 1735-0913

Online ISSN: 2383-112X

Vol. 41, No. 2, Page 185-197 (2026) DOI: 10.22092/ijwpr.2026.372631.1835

(OPEN ACCESS)

Influence of thermally modification on biological resistance and applied properties of wood

Reza Hajihassani[1*], Seyedeh masoomeh Zamani[2] and Fardad Golbabaei[3]

1*-Corresponding author, Associate Prof., Wood and Forest Products Science Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), 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-Wood and Forest Products Science Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 27 April 2026
Revised: 17 May 2026
Accepted: 23 May 2026
Published online: 19 June 2026

Keywords:
Applied properties, biological resistance, thermally modification, white rot fungus.

ABSTRACT

Background and objectives: The purpose of this study was to investigate the effect of heat treatment on bio-durability and some physical and mechanical properties of two wood species (Fraxinus Sp. and Picea Sp.). So, thermo-wood samples were prepared from Fraxinus Sp. and Picea Sp. based on thermo-D process. Heat-treated and untreated wood specimens were evaluated after exposing to white rot fungus for 16 weeks. The laccase activity and its effect on mass loss and wood density were also investigated. Moreover, some mechanical properties include impact strength and compression parallel to grain of both wood specimens was measured before and after exposing to fungus. The results showed that thermally modification improves the bio-durability of both wood species. The results also revealed reduction of mechanical properties due to heat treatment except compression parallel to grain.

Materials and methods: In current study, the wood specimens were prepared from Ash and spruce woods. First, the prepared specimens were heat treated based on thermo-D process. Then, to investigate the biological resistance as well as physical and mechanical properties measurements, several specimens were prepared from heat treated and untreated wood. White rot fungus (Trametes versicolor) was used to evaluate the biological resistance of wood samples. Malt extract agar was also used as a culture medium. After preparing the white rot fungus, they were initially transferred on the culture medium in kolle dishes and then were placed inside the germinator to cover the surface of culture medium. Afterwards, the heat treated and untreated wood samples were exposed to the fungus and finally kolle dishes containing wood and fungus samples were transferred to the germinator. After 16 weeks, all specimens were taken from the germinator out and evaluated their physical and mechanical properties as well as biological resistance. The experiments included measurement of laccase activity, mass loss, density, impact strength and compression parallel to grain. The applied standards for physical, mechanical, and biological resistance experiments included EN113, ASTM D143-09, and ASTM D256. Eventually,

the obtained results were statistically analyzed based on ANOVA method by SPSS software.

Results: The results showed that the white rot fungus has been more efficiency on untreated specimens compared to thermo-wood in both wood species (Fraxinus Sp. and Picea Sp.). Therefor heat treatment improved the biological resistance, and also causes some changes in physical and mechanical properties of Ash and Spruce wood. The results also showed that thermal modification at high temperatures not only reduces the density of both woods, but also inhibited the reduction effect on density due to white rot fungus activity. Moreover, the results revealed that the compression parallel to grain of specimens was increased by heat treatment. On the other hand, reduction of this mechanical property due to the white rot fungus activity in thermo-wood samples was less than the controls. Evaluation of impact strength of specimens showed negative effect of heat treatment on this mechanical property. In addition, reduction of impact strength after exposure to the white rot fungus in heat treated specimens was higher than untreated.

Conclusion: Based on the results, thermal modification can generally causes improvement of biological resistance, reduction of some physical and mechanical properties as well as more stability of applied properties of Ash and Spruce wood which is exposed to the white rot fungus.

Cite this article: Reza Hajihassani, Seyedeh masoomeh Zamani and Fardad Golbabaei. 2026. Influence of thermally modification on biological resistance and applied properties of wood. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research,41(2), 185-197. DOI: https://doi.org/10.22092/ijwpr.2026.372631.1835

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

تاثیر اصلاح گرمایی بر مقاومت بیولوژیکی و خواص کاربردی چوب

رضا حاجی‌حسنی[۱*]، سیده معصومه زمانی[۲] و فرداد گلبابائی[۳]

۱*- 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

۲- دانشیار، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

۳- مربی پژوهشی، بخش تحقیقات علوم چوب و فرآورده‌های آن، موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
علمی - پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۷
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۲۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۲
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۲۹

واژه‌های کلیدی:
اصلاح گرمایی،
قارچ پوسیدگی سفید،
مقاومت بیولوژیکی،
ویژگی‌های کاربردی.

چکیده

سابقه و هدف: هدف از این تحقیق بررسی تأثیر اصلاح گرمایی بر دوام بیولوژیکی و برخی خواص فیزیکی و مکانیکی دو گونه چوبی زبان‌گنجشک (*Fraxinus Sp.*) و نوئل (*Picea Sp.*) است. بدین منظور از دو گونه چوبی موردنظر نمونه‌های ترمووود براساس فرایند ترمو-D تهیه گردید. از قارچ عامل پوسیدگی سفید (*Trametes versicolor*) به‌منظور ارزیابی دوام بیولوژیکی نمونه‌های چوبی شاهد و تیمار شده با فرایند گرمایی استفاده شد. میزان لاکاز تولید شده توسط قارچ عامل پوسیدگی سفید و نیز تأثیر این قارچ بر کاهش وزن و تغییرات دانسیته نمونه‌ها پس از ۱۶ هفته مجاورت نمونه‌ها با قارچ مورد بررسی قرار گرفت. برخی خواص مکانیکی ازجمله مقاومت به ضربه و مقاومت به فشار موازی الیاف نمونه‌ها قبل و بعد از مجاورت با قارچ عامل پوسیدگی سفید ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که تیمار گرمایی سبب افزایش دوام بیولوژیکی هر دو گونه چوبی گردید. همچنین نتایج بیانگر کاهش مقاومت به ضربه و افزایش مقاومت فشاری موازی الیاف نمونه‌ها در اثر تیمار گرمایی بودند.

مواد و روش‌ها: در این بررسی نمونه‌هایی از دو گونه چوبی زبان‌گنجشک و نوئل تهیه گردید. سپس تیمار گرمایی نمونه‌های موردنظر با توجه به نوع فرایند گرمایی (ترمو-D) انجام شد. برای بررسی دوام بیولوژیکی و نیز خواص فیزیکی و مکانیکی، از چوب‌های تیمار شده و شاهد نمونه‌های آزمونی استفاده گردید. به‌منظور بررسی دوام بیولوژیک نمونه‌های چوبی نیز از قارچ عامل پوسیدگی سفید (*Trametes versicolor*) استفاده شد. همچنین از مالت اکستراکت آگار به‌عنوان محیط کشت قارچ استفاده شد. پس از تهیه قارچ موردنظر، اقدام به انتقال آنها روی محیط کشت در شیشه‌های kolle گردید و بعد در داخل ژرمیناتور قرار داده شدند تا سطح محیط کشت توسط قارچ پوشانده شود. سپس مجاورت نمونه‌های چوبی با قارچ موردنظر انجام شد و درنهایت شیشه‌های kolle حاوی نمونه‌های چوبی و قارچ به ژرمیناتور منتقل شدند. پس از ۱۶ هفته کلیه نمونه‌ها از داخل ژرمیناتور خارج شده و مورد آزمون‌های فیزیکی، مکانیکی و نیز بررسی مقاومت بیولوژیکی قرار گرفتند. آزمون‌های موردنظر شامل بررسی میزان لاکاز، اندازه‌گیری کاهش وزن، دانسیته، مقاومت به ضربه و مقاومت به فشار موازی الیاف بودند. استانداردهای مورد استفاده برای آزمون‌های موردنظر شامل EN113، ASTM D143-09 و ASTM 256 بودند. نتایج به‌دست‌آمده جمع‌آوری و با استفاده از نرم‌افزار SPSS مورد تجزیه‌وتحلیل آماری قرار گرفتند. از آزمون تجزیه واریانس ANOVA نیز برای مقایسه بین گروه‌ها استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج به‌دست‌آمده نشان دادند که فعالیت و اثرگذاری قارچ عامل پوسیدگی سفید در نمونه‌های شاهد بیشتر از نمونه‌های تیمار شده با فرایند گرمایی در هر دو گونه چوبی بوده است. ازاین‌رو، حرارت‌دهی می‌تواند سبب

بهبود و افزایش مقاومت بیولوژیکی گردد. از سویی، تیمار گرمایی با فرایند ترمو-D می‌تواند سبب بروز برخی تغییرات در خواص فیزیکی و مکانیکی گردد. اصلاح حرارتی ضمن آنکه سبب کاهش دانسیته می‌گردد همچنین می‌تواند عاملی بازدارنده در کاهش دانسیته ناشی از فعالیت قارچ عامل پوسیدگی سفید نیز باشد. همچنین این تیمار سبب بهبود مقاومت فشاری موازی الیاف می‌گردد، مضاف بر اینکه اثرگذاری قارچ عامل پوسیدگی سفید بر این ویژگی در نمونه‌های تیمار شده با فرایند گرمایی کمتر از نمونه‌های شاهد گردید. ویژگی مکانیکی مقاومت به ضربه نیز در اثر تیمار گرمایی کاهش می‌یابد و میزان این کاهش در نمونه‌های تیمار شده بیشتر از نمونه‌های شاهد است.

نتیجه‌گیری: براساس نتایج به‌دست‌آمده می‌توان گفت که تیمار گرمایی می‌تواند سبب بهبود مقاومت بیولوژیکی، کاهش برخی خواص فیزیکی و مکانیکی و نیز پایداری بیشتر این ویژگی‌ها در مقابل اثرگذاری قارچ عامل پوسیدگی سفید در دو گونه چوبی زبان‌گنجشک و نوئل گردد.

استناد: رضا حاجی‌حسنی، سیده معصومه زمانی و فرداد گلبابائی. ۱۴۰۵. تاثیر اصلاح گرمایی بر مقاومت بیولوژیکی و خواص کاربردی چوب نشریه تحقیقات علوم چوب و کاغذ ایران، ۴۱(۲)، ۱۸۵-۱۹۷.

DOI: https://doi.org/10.22092/ijwpr.2026.372631.1835

مقدمه

چوب همواره در طول تمدن بشری به‌عنوان یک ماده طبیعی و در دسترس، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار بوده و یکی از پرکاربردترین مصالح در ساخت سازه‌های متنوع چوبی بوده است؛ اما وجود عیوب ذاتی در ساختار این ماده طبیعی سبب محدودیت کاربرد آن می‌گردد. تخریب چوب توسط عوامل مخرب بیولوژیک مانند قارچ‌ها، حشرات و باکتری‌ها ازجمله معایب مهم چوب است. قارچ‌ها ازجمله عوامل مخرب بیولوژیکی چوب هستند که می‌توانند خسارت‌های قابل‌توجهی را به چوب و فراورده‌های مرکب چوبی وارد کنند. ازاین‌رو، برای بهبود دوام بیولوژیکی چوب و افزایش قابلیت کاربرد آن روش‌های متعددی از فرایندهای اصلاح و حفاظت چوب استفاده شده است. اصلاح گرمایی چوب با اشکال مختلف، یکی از این روش‌های کاربردی است. در دهه‌های ۱۹۳۰ و ۱۹۴۰ تیمار گرمایی چوب برای اولین بار به‌طور علمی در کشور آلمان و امریکا موردمطالعه قرار گرفت. بیشترین و گسترده‌ترین فعالیت‌های تحقیقاتی در زمینه اصلاح گرمایی چوب توسط انجمن بین‌المللی ترمووود در کشور فنلاند انجام شده است. تیمارهای گرمایی معمولاً در دامنه حرارتی ۲۶۰-۱۶۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود، زیرا دماهای پایین‌تر سبب تغییرات جزئی ویژگی‌های چوب و دماهای بالاتر منجر به تخریب آن می‌گردد (Militz, 2002)، بنابراین مقدار حرارت و زمان تیمار بستگی به نوع فرایند، گونه چوبی، اندازه نمونه‌ها، درصد رطوبت چوب، خواص فیزیکی و مکانیکی موردنظر، مقاومت به حملات بیولوژیکی و ثبات ابعادی موردنظر محصولات نهایی دارد. در بررسی تأثیر تیمار روغن-گرمایی روی دو گونه چوبی کاج و توس و مقاومت بیولوژیکی آن نیز نشان داده شد که در درجه حرارت بالا ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چوب تحت تأثیر قرار می‌گیرد. 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 (Zarey *et al.*, 2024).

Zamani و همکاران (۲۰۲۲) در تحقیقات خود نشان دادند که تیمار حرارتی می‌تواند سبب افزایش مقاومت زیستی گونه چوبی پالونیا گردد. آنان اظهار داشتند تیمار حرارتی در دمای بالا سبب تغییرات فیزیکی و شیمیایی در ساختار چوب

می‌گردد که منجر به کاهش اثرگذاری قارچ عامل پوسیدگی قهوه‌ای می‌گردد.

تیمار حرارتی 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 (Militz, 2002). Delucis و همکاران (۲۰۱۹) در بررسی‌های خود چوب‌های تندرشد 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 مورد ارزیابی قرار دادند. 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، سلولز و مواد استخراجی می‌گردد، درحالی‌که مقدار همی‌سلولز و نیز هولوسلولز کاهش می‌یابد. 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 می‌شود (Gaff *et al.*, 2019; Wentzel *et al.*, 2019).

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. Kaygin و همکاران (۲۰۰۹) در بررسی تأثیر کاهش وزن ناشی از تیمار حرارتی بر خواص مکانیکی گونه پالونیا 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.

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

در ارزیابی خواص کاربردی Thermowood قرار گرفته در معرض قارچ عامل پوسیدگی قهوه‌ای، نشان داده شد که تیمار حرارتی می‌تواند سبب بهبود مقاومت بیولوژیکی چوب گردد. همچنین باوجود افت خواص فیزیکی و مکانیکی در اثر تیمار حرارتی، این تیمار می‌تواند سبب پایداری بیشتر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چوب قرار گرفته در معرض قارچ عامل پوسیدگی قهوه‌ای شود (Hajihassani *et al.*, 2022).

Ayata و همکاران (۲۰۱۷) مقاومت به پوسیدگی قارچ در گونه‌های چوبی راش، بلوط و کاج تیمار گرمایی شده را مورد بررسی قرار دادند. دمای بکار برده شده برای اعمال تیمار گرمایی ۱۹۰ و ۲۱۲ درجه سانتی‌گراد برای مدت‌زمان ۱ و ۲ ساعت بود. نتایج کاهش وزن نمونه‌ها در برابر پوسیدگی قارچی در فاصله زمانی ۱۲ هفته بیانگر افزایش مقاومت بیولوژیکی در اثر تیمار حرارتی بود. در مطالعه‌ای دیگر که بر روی ویژگی‌های فیزیکی چوب کاج و نوئل تیمار شده با فرایند حرارتی انجام شد، نشان داده شد که تیمار حرارتی در دمای ۲۱۲ درجه سانتی‌گراد برای مدت‌زمان ۲ ساعت سبب کاهش وزن ۲/۵۶ و ۶/۱۲ درصدی و افزایش

ثبات ابعادی ۵۸ و ۵۲ درصدی به ترتیب در نمونه‌های نوئل و کاج می‌گردد (Icel *et al.*, 2015). ازاین‌رو، هدف از این بررسی از یکسو ارزیابی مقاومت بیولوژیک نمونه‌های ترموود و شاهد و بررسی مقایسه‌ای آنها و از سوی دیگر بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های ترموود و شاهد در اثر مجاورت با قارچ عامل پوسیدگی سفید است. همچنین در این تحقیق، بررسی فعالیت آنزیم لاکاز گامی نو در جهت ارزیابی بهتر خواص فیزیکی، مکانیکی و مقاومت بیولوژیکی گونه‌های چوبی شاهد و تیمار شده با فرایند حرارتی است.

مواد و روش‌ها

در این بررسی از دو گونه چوبی زبان‌گنجشک و نوئل به‌منظور ارزیابی تأثیر تیمار گرمایی بر مقاومت بیولوژیکی و خواص کاربردی آنها استفاده گردید. پس از تهیه نمونه‌های موردنظر به‌صورت الوار موجود در بازار، تیمار گرمایی براساس فرایند گرمایی ترمو–D مطابق با دستورالعمل اتحادیه ترموود فنلاند (۲۱۲ °C) به مدت ۳ ساعت) انجام شد. برای بررسی مقاومت بیولوژیکی و نیز خواص فیزیکی و مکانیکی، از چوب‌های تیمار شده و شاهد نمونه‌های آزمونی تهیه گردید.

برای بررسی مقاومت بیولوژیک نمونه‌های شاهد و تیمار شده از قارچ عامل پوسیدگی سفید (*Trametes versicolor*) استفاده شد. 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 و به‌منظور استریل شدن به مدت ۲۰ دقیقه در داخل اتوکلاو با دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. سپس شیشه‌های kolle از اتوکلاو خارج و در دمای محیط خنک گردید. به‌منظور عدم آلودگی، شیشه‌ها تا هنگام کشت قارچ در انکوباتور نگهداری شدند.

به‌منظور انتقال نمونه‌های قارچ بر روی محیط کشت، از هود استریل مجهز به لامپ uv و تهویه هوا استفاده شد. سپس قطعات کوچکی از ریسه‌های قارچ به همراه محیط کشت جدا و بر روی قسمت مرکزی محیط کشت‌های آماده شده در شیشه‌های kolle قرار داده شدند. سپس درب ظروف kolle بسته و در ژرمیناتور با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵±۷۵ قرار داده شدند. قارچ عامل پوسیدگی سفید طی یک تا دو هفته سطح محیط کشت داخل kolle را می‌پوشاند که در این مرحله آماده انتقال نمونه‌های چوبی است.

سپس در زیر هود استریل و در مجاورت چراغ الکلی 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 در اتوکلاو بر روی پایک‌های شیشه‌ای قرار داده شدند 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 نیز بررسی مقاومت بیولوژیکی قرار گرفتند. آزمون‌های موردنظر شامل بررسی میزان لاکاز، اندازه‌گیری کاهش وزن، دانسیته، مقاومت به ضربه و مقاومت به فشار موازی الیاف، قبل و بعد از مجاورت با قارچ عامل پوسیدگی سفید بودند. استانداردهای مورد استفاده برای آزمون‌های فیزیکی، مکانیکی و مقاومت بیولوژیکی شامل EN113، D143-09 ASTM و ASTM D256 بودند.

برای استخراج آنزیم لاکاز از دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد طی مدت‌زمان ۲۴ ساعت، از بافر ۵۰ میلی‌مولار استات سدیم با pH= ۵/۵ همراه با Tween 20 (۰/۱ گرم در لیتر) استفاده شد. ابتدا نمونه‌های چوب قرار گرفته در معرض قارچ عامل پوسیدگی سفید با ۵۰ میلی‌لیتر بافر استخراج به مدت ۲۴ ساعت خیس شدند. در هر مرحله، مایع رویی جمع‌آوری‌شده از استخراج‌ها توسط کاغذ صافی فیلتر شده و بعد با سرعت ۵۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه سانتریفوژ و برای

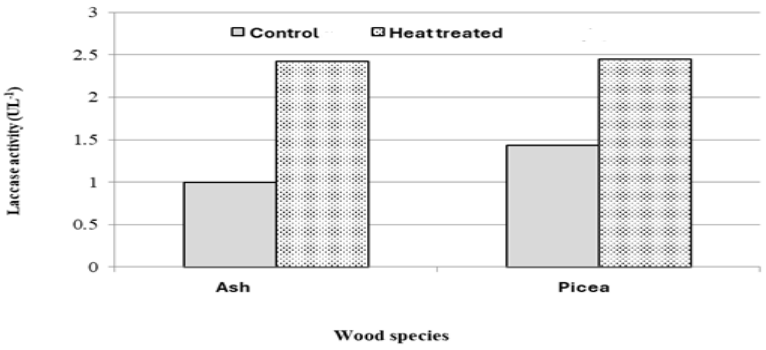
آزمون فعالیت آنزیم استفاده شد. اندازه‌گیری فعالیت آنزیم لاکاز در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد با استفاده از ۲ و ۶-دی متوکسی فنل (DMP) ۵ میلی‌مولار در بافر استات سدیم ۰/۱ مولار با pH= ۳/۶ انجام شد. میزان جذب در ۴۶۹ نانومتر (E_{469} = 27.5 $mM^{-1}cm^{-1}$) توسط اسپکتروفتومتر مورد ارزیابی قرار گرفت. یک واحد فعالیت لاکاز به‌صورت مقدار آنزیم مورد نیاز برای اکسید کردن ۱ میکرومول از DMP در دقیقه در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد تعریف شد (Field *et al.*, 1993).

نتایج به‌دست‌آمده جمع‌آوری و مورد آنالیز قرار گرفتند. برای تجزیه‌وتحلیل آماری از نرم‌افزار SPSS استفاده شد. از آزمون تجزیه واریانس ANOVA نیز برای مقایسه بین گروه‌ها استفاده گردید.

نتایج

فعالیت لاکاز

نتایج حاصل از ارزیابی میزان لاکاز ۲۴ ساعت نمونه‌های چوبی پس از ۱۶ هفته مجاورت با قارچ عامل پوسیدگی سفید نشان داد که میزان لاکاز موجود در نمونه‌های شاهد کمتر از نمونه‌های تیمار شده با فرایند گرمایی است (شکل ۱). در حقیقت کاهش میزان آنزیم لاکاز در نمونه‌های شاهد نسبت به نمونه‌های ترموود بیانگر مصرف و تأثیرگذاری بیشتر این آنزیم در نمونه‌های تیمار نشده است.



شکل ۱- تأثیر تیمار گرمایی بر میزان آنزیم لاکاز پس از ۱۶ هفته مجاورت با قارچ عامل پوسیدگی سفید

Figure 1. Effect of heat treatment on laccase activity after 16 weeks exposing to white rot fungus

در این بررسی نتایج حاصل از تأثیر تیمار گرمایی در فرایند ترمو-D بر عملکرد و تأثیر قارچ عامل پوسیدگی سفید بر خواص کاربردی نمونه‌های چوبی مورد ارزیابی قرار گرفت. جدول ۱ خلاصه تجزیه واریانس ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی گونه چوبی زبان‌گنجشک و نوئل را نشان می‌دهد.

جدول ۱- خلاصه تجزیه واریانس خواص فیزیکی و مکانیکی ارزیابی شده گونه‌های چوبی

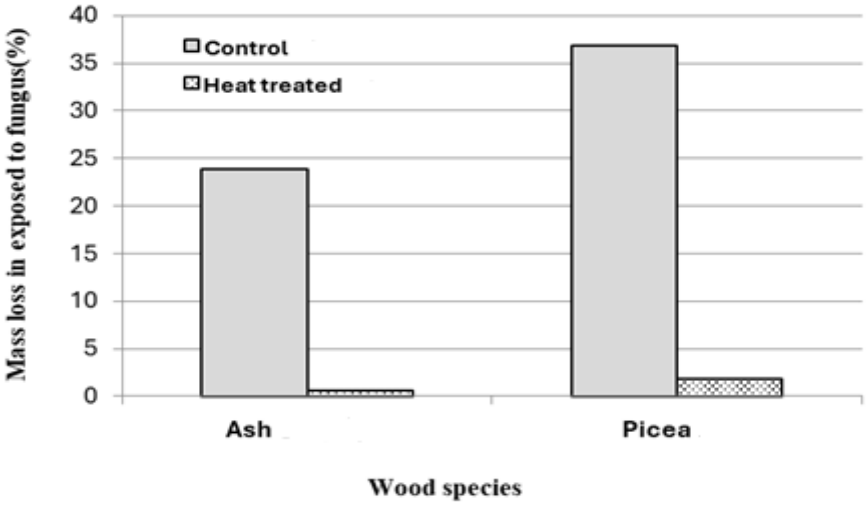
Table 1. Summarized result of ANOVA for evaluated physical and mechanical properties of wood species

		Unexposed to white rot fungus			Exposed to white rot fungus			
Source of variation	**Wood species**	**Density (g/cm^3)**	**Compression parallel to grain (Mpa)**	**Impact strength (Kj/m^2)**	**Mass loss (%)**	**Density (g/cm^3)**	**Compression parallel to grain (Mpa)**	**Impact strength (Kj/m^2)**
Heat treatment	Ash.	**0.002	ns 0.296	**0.000	**0.000	0.001**	0.029*	**0.003
	Picea.	**0.003	ns 0.676	**0.010	**0.000	0.003**	0.047*	**0.006

**, significant at 0.01; *, significant at 0.05; ns, non-significant.

کاهش وزن

نتایج حاصل از تجزیه واریانس تأثیر تیمار گرمایی بر کاهش وزن ناشی از فعالیت قارچ عامل پوسیدگی سفید در هر دو گونه چوبی موردنظر نشان داد که تیمار گرمایی در سطح آماری ۹۹٪ دارای تأثیر معنی‌داری بر کاهش وزن ناشی از عملکرد قارچ عامل پوسیدگی سفید بوده است (جدول ۱). شکل ۲ نشان می‌دهد که میانگین کاهش وزن ناشی از اثرگذاری قارچ عامل پوسیدگی سفید در نمونه‌های شاهد و ترمووود گونه چوبی زبان‌گنجشک به ترتیب برابر با ۲۳/۸۱ و ۰/۵۷ درصد و در گونه چوبی نوئل به ترتیب برابر با ۳۶/۸۰ و ۱/۸۱ درصد است؛ یعنی میزان بازدارندگی تیمار گرمایی بر عملکرد قارچ عامل پوسیدگی سفید در گونه چوبی زبان‌گنجشک و نوئل به ترتیب به میزان ۹۷/۶۰ و ۹۵/۰۸ درصد بوده است.



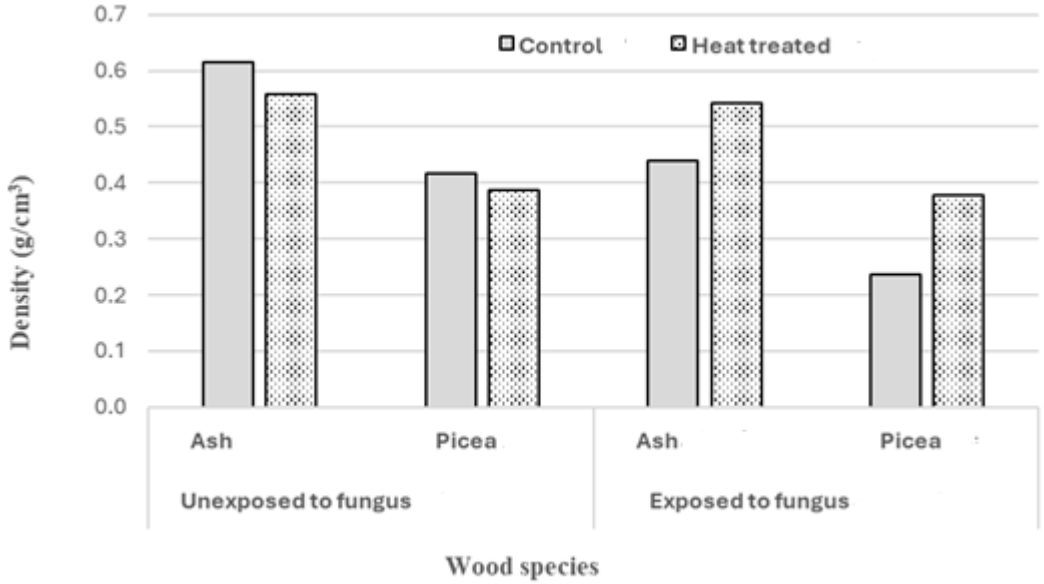
شکل ۲- تأثیر تیمار گرمایی بر کاهش وزن پس از ۱۶ هفته مجاورت با قارچ عامل پوسیدگی سفید

Figure 2. Effect of heat treatment on mass loss after 16 weeks exposing to white rot fungus

دانسیته

ارزیابی دانسیته نمونه‌های شاهد و تیمار شده گونه‌های چوبی موردنظر به دو شکل الف- تأثیر تیمار گرمایی بر دانسیته بدون مجاورت با قارچ و ب- در مجاورت با قارچ و تأثیر عملکرد قارچ بر دانسیته، انجام شد. نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمار گرمایی بر دانسیته گونه‌های چوبی و بدون مجاورت با قارچ نشان دادند که تیمار گرمایی دارای تأثیر معنی‌داری بر دانسیته هر دو گونه چوبی بوده است (جدول ۱) و سبب کاهش دانسیته آنها شده است (شکل ۳). شکل ۳ نشان می‌دهد که دانسیته گونه چوبی زبان‌گنجشک و نوئل در اثر تیمار گرمایی به ترتیب به میزان ۹/۱۴ و ۷/۲۴ درصد کاهش یافته است. نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمار گرمایی بر دانسیته نمونه‌های قرار گرفته در مجاورت با قارچ عامل پوسیدگی سفید نیز بیانگر معنی‌دار بودن تأثیر این تیمار بر عملکرد قارچ عامل پوسیدگی سفید در کاهش دانسیته هر دو گونه چوبی بوده است (جدول ۱). به‌طوری‌که میزان کاهش دانسیته در اثر فعالیت این قارچ در نمونه‌های شاهد و ترمووود گونه چوبی زبان‌گنجشک به ترتیب به میزان ۲۸/۶۱ و ۲/۷۳ درصد و در گونه چوبی نوئل به ترتیب به میزان ۴۳/۳۱ و ۱/۹۰ درصد به دست آمد (شکل ۳). به‌عبارت‌دیگر، میزان

بازدارندگی تیمار گرمایی بر عملکرد قارچ عامل پوسیدگی سفید در گونه چوبی زبان‌گنجشک و نوئل به ترتیب به میزان ۹۰/۴۶ و ۹۵/۶۲ درصد بوده است. ازاین‌رو، تیمار گرمایی می‌تواند عاملی بازدارنده در عملکرد قارچ عامل پوسیدگی سفید و کاهش دانسیته ناشی از فعالیت این قارچ باشد.

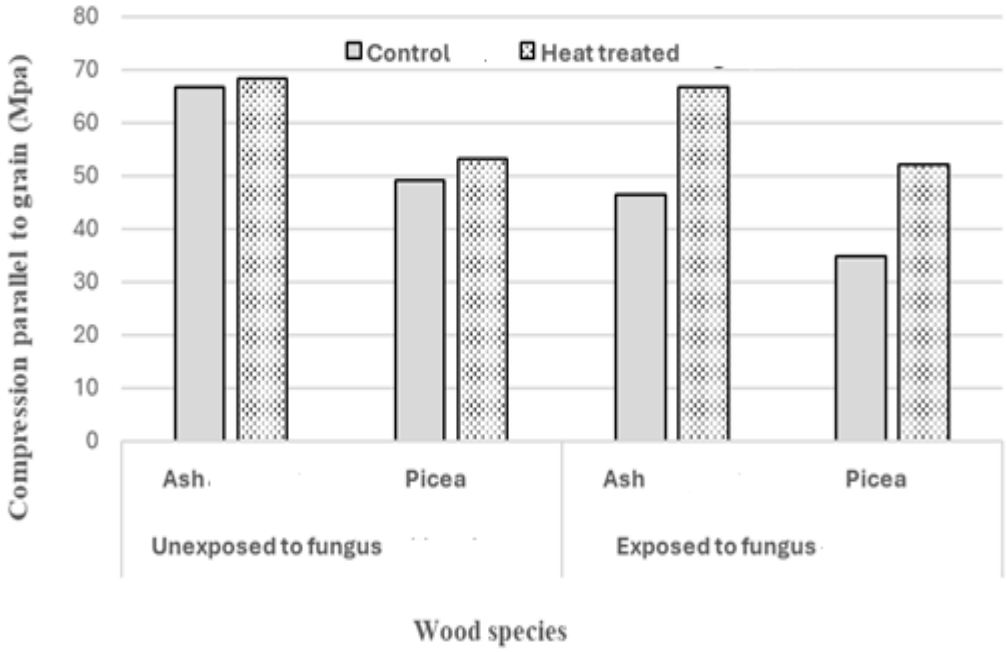


شکل ۳- تغییرات دانسیته در اثر تیمار گرمایی و مجاورت با قارچ عامل پوسیدگی سفید

Figure 3. Density variation due to heat treatment and expose to white rot fungus

مقاومت فشاری موازی الیاف

مقاومت فشاری موازی الیاف دو گونه چوبی مورد بررسی نیز به دو شکل الف- تأثیر تیمار گرمایی بر مقاومت فشاری موازی الیاف و بدون مجاورت با قارچ و ب- در مجاورت با قارچ و تأثیر عملکرد قارچ بر مقاومت فشاری موازی الیاف، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آنالیز داده‌ها نشان دادند که در هر دو گونه چوبی تیمار گرمایی تأثیر معنی‌داری بر مقاومت فشاری موازی الیاف نداشته است (جدول ۱). با این حال، مقایسه مقاومت فشاری موازی الیاف نمونه‌های شاهد و ترموود در شکل ۴ نشان می‌دهد که با وجود معنی‌دار نشدن تأثیر تیمار گرمایی بر این ویژگی مکانیکی، مقدار عددی آن در هر دو گونه چوبی روند افزایش داشته است که بیانگر اثر مثبت تیمار گرمایی بر این ویژگی مکانیکی می‌باشد. نتایج آنالیز تأثیر تیمار گرمایی بر مقاومت فشاری موازی الیاف نمونه‌های قرار گرفته در معرض قارچ عامل پوسیدگی سفید نشان داد که تیمار گرمایی دارای تأثیر معنی‌داری بر عملکرد این قارچ روی مقاومت فشاری موازی الیاف بوده است (جدول ۱). به‌طوری‌که میزان کاهش مقاومت فشاری موازی الیاف در اثر فعالیت قارچ عامل پوسیدگی سفید در نمونه‌های شاهد و ترموود گونه چوبی زبان‌گنجشک به ترتیب به میزان ۳۰/۵۳ و ۲/۵۹ درصد و در گونه چوبی نوئل به ترتیب به میزان ۲۸/۹۴ و ۲/۲۵ درصد به دست آمد (شکل ۴). به‌عبارت‌دیگر، میزان بازدارندگی تیمار گرمایی بر عملکرد قارچ عامل پوسیدگی سفید در گونه چوبی زبان‌گنجشک و نوئل به ترتیب به میزان ۹۱/۵۰ و ۹۲/۲۲ درصد بوده است.



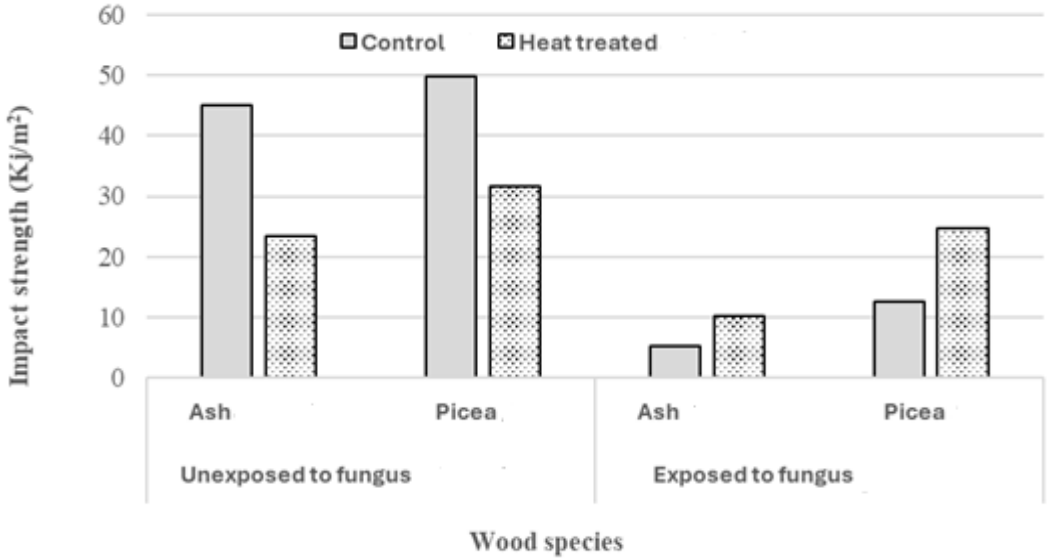
شکل ۴- تغییرات مقاومت فشاری موازی الیاف در اثر تیمار گرمایی و مجاورت با قارچ عامل پوسیدگی سفید

Figure 4. Variation of compression parallel to grain due to heat treatment and expose to white rot fungus

مقاومت به ضربه

ویژگی مکانیکی مقاومت به ضربه نیز به دو شکل الف- تأثیر تیمار گرمایی بر مقاومت به ضربه و بدون مجاورت با قارچ و ب- در مجاورت با قارچ و تأثیر عملکرد قارچ بر مقاومت به ضربه، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آنالیز داده‌ها نشان دادند که تیمار گرمایی تأثیر معنی‌داری بر مقاومت به ضربه هر دو گونه چوبی داشته است (جدول ۱). مقایسه مقاومت به ضربه نمونه‌های شاهد و ترموود گونه‌های چوبی مورد مطالعه نشان می‌دهد که تیمار گرمایی باعث کاهش این ویژگی مکانیکی در هر دو گونه چوبی شده است، به‌طوری‌که مقاومت به ضربه گونه چوبی زبان‌گنجشک و نوئل در اثر تیمار گرمایی به ترتیب به میزان ۴۸/۱۵ و ۳۶/۲۴ درصد کاهش یافته است که بیانگر اثر منفی تیمار گرمایی بر مقاومت به ضربه است (شکل ۵).

همچنین نتایج آنالیز تأثیر تیمار گرمایی بر مقاومت به ضربه نمونه‌های قرار گرفته در مجاورت قارچ عامل پوسیدگی سفید نیز نشان داد که تیمار گرمایی دارای اثر معنی‌داری بر عملکرد این قارچ بوده است (جدول ۱). به‌طوری‌که میزان کاهش مقاومت به ضربه در اثر فعالیت قارچ عامل پوسیدگی سفید در نمونه‌های شاهد و ترموود گونه چوبی زبان‌گنجشک به ترتیب به میزان ۸۸/۱۵ و ۵۵/۷۱ درصد و در گونه چوبی نوئل به ترتیب به میزان ۷۴/۵۰ و ۲۲/۱۱ درصد به دست آمد (شکل ۵). به‌عبارت‌دیگر، میزان بازدارندگی تیمار گرمایی بر عملکرد قارچ عامل پوسیدگی سفید در گونه چوبی زبان‌گنجشک و نوئل به ترتیب به میزان ۳۶/۷۹ و ۷۰/۳۳ درصد بوده است.



شکل ۵- تغییرات مقاومت به ضربه در اثر تیمار گرمایی و مجاورت با قارچ عامل پوسیدگی سفید

Figure 5. Variation of impact strength of due to heat treatment and expose to white rot fungus

بحث

نتایج نشان دادند که میزان لاکاز موجود در نمونه‌های شاهد کمتر از نمونه‌های تیمار شده با فرایند گرمایی است که بیانگر مصرف و تأثیرگذاری بیشتر این آنزیم در نمونه‌های تیمار نشده است. ازآنجایی‌که تیمار گرمایی سبب تخریب و کاهش میزان همی‌سلولز و هولوسلولزها می‌گردد، بنابراین میزان گروه‌های هیدروکسیل که جایگاه فعالیت و شروع واکنش‌های شیمیایی می‌باشند کاهش یافته و فعالیت و اثرگذاری آنزیم لاکاز تولید شده توسط قارچ عامل پوسیدگی سفید کاهش می‌یابد (Gaff *et al*., 2019; Wentzel *et al*., 2019; Mburu *et al*., 2007). براساس نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق، در گزارشی دیگر نشان داده شد زمانی که تراشه‌های چوب اکالیپتوس در معرض قارچ *Ceriporiopsis subvermisporaon* قرار داده شد، بیشترین کاهش وزن چوب به‌طور مستقیم با کاهش چشمگیر میزان آنزیم لاکاز همراه بود (Ferraz *et al*., 2003).

همچنین نتایج نشان دادند که میزان کاهش وزن ناشی از فعالیت قارچ عامل پوسیدگی سفید در نمونه‌های شاهد بیشتر از نمونه‌های تیمار شده با فرایند گرمایی است. با توجه به اینکه گروه‌های هیدروکسیل جایگاه اثرگذاری آنزیم تولید شده توسط قارچ است، ازاین‌رو، حذف این گروه‌ها در اثر تیمار گرمایی سبب محدودیت عملکرد قارچ می‌گردد. Mburu و همکاران (۲۰۰۷) در تحقیقات خود نشان دادند که تیمار گرمایی، دوام چوب در برابر عوامل مخرب قارچی را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد که دلیل آن را کاهش گروه‌های هیدروکسیل در اثر تیمار گرمایی بیان نمودند. بنابراین تیمار گرمایی می‌تواند عاملی مؤثر در افزایش دوام بیولوژیکی باشد.

نتایج نشان دادند که اصلاح حرارتی ضمن آنکه سبب کاهش دانسیته می‌گردد می‌تواند عاملی بازدارنده در کاهش دانسیته ناشی از فعالیت قارچ عامل پوسیدگی سفید نیز باشد. کاهش دانسیته در اثر تیمار حرارتی به دلیل تخریب و تغییر ساختار شیمیایی چوب است که با افزایش دمای تیمار این موضوع تشدید می‌شود (Zarey *et al*., 2024; Zamani *et*

al., 2022).

ارزیابی مقاومت فشاری موازی الیاف نشان دادند که با وجود معنی‌دار نشدن تأثیر تیمار گرمایی بر این ویژگی مکانیکی، مقدار عددی آن روند افزایشی داشته است که بیانگر اثر مثبت تیمار گرمایی بر این ویژگی مکانیکی است. اصلاح چوب با فرایندهای گرمایی، مقاومت‌های فیزیکی و مکانیکی آن را تغییر می‌دهد (Zarey *et al*., 2024). 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 (Ghorbani *et al*., 2020). در حقیقت فرایندهای گرمایی در دمای بالا سبب تغییر اجزای شیمیایی چوب می‌گردد، به‌طوری‌که تیمار حرارتی با ایجاد پیوندهای عرضی در لیگنین و نیز افزایش مقدار لیگنین و سلولز در ساختار چوب، می‌تواند سبب بهبود مقاومت فشاری موازی الیاف گردد. به‌عبارتی‌دیگر، تغییرات اجزاء شیمیایی چوب در اثر حرارت عاملی مؤثر در تغییرات ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چوب محسوب می‌شود (Gaff *et al*., 2019; Wentzel *et al*., 2019).

از سویی، نتایج نشان دادند که تیمار حرارتی می‌تواند سبب کاهش اثرگذاری قارچ عامل پوسیدگی سفید بر مقاومت فشاری موازی الیاف گردد. کاهش میزان آبکافت آنزیم لاکاز به دنبال حذف گروه‌های هیدروکسیل در اثر تیمار حرارتی چوب، محدودیت فعالیت قارچ عامل پوسیدگی سفید را به همراه دارد.

ویژگی مکانیکی مقاومت به ضربه نیز در اثر تیمار گرمایی کاهش می‌یابد که بیانگر اثر منفی این تیمار بر مقاومت به ضربه است. همچنین تیمار گرمایی دارای اثر بازدارندگی بر عملکرد قارچ عامل پوسیدگی سفید بر مقاومت به ضربه است. تغییرات ساختار شیمیایی چوب در اثر حرارت‌دهی با دمای بالا و نیز ترد و شکننده شدن ساختار چوب می‌تواند دلیل کاهش این ویژگی مکانیکی باشد. از سویی، تفاوت در کاهش این ویژگی مکانیکی می‌تواند ارتباط مستقیمی با کاهش وزن نمونه‌ها در اثر تیمار حرارتی داشته باشد (Kaygin *et al*., 2009).

بنابراین، به‌طورکلی می‌توان گفت که تیمار حرارتی با تغییر در ساختار فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی چوب می‌تواند سبب بهبود مقاومت بیولوژیکی، کاهش برخی خواص فیزیکی و مکانیکی و نیز پایداری بیشتر این ویژگی‌ها در مقابل اثرگذاری قارچ عامل پوسیدگی سفید گردد.

سپاسگزاری

برحسب ادب و احترام، از کلیه استادان و کارکنان موسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور و نیز شرکت مازند چوب آریا و حمایت‌های مادی و معنوی آنان در به انجام رسیدن این تحقیق، کمال تشکر و قدردانی را داریم.

References

-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.

-Ayata, U., Akcay, C. and Esteves, B., 2017. Determination of decay resistance against Pleurotus ostreatus and Coniophora puteana fungus of heat-treated scotch pine, oak and beech wood species. Maderas, Ciencia y tecnología. 19: 3. 309-316. https://doi.org/10.4067/s0718-221x2017005000026

-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. J. of the Indian Academy of Wood Science, 16: 2. 139-143. https://doi.org/10.1007/s13196-019-00237-w

-Ferraz, A., Córdova, A. M. and Machuca, A., 2003. Wood biodegradation and enzyme production by Ceriporiopsis subvermispora. Enzyme and Microbial Technology. 32: 1. 59-65. https://doi.org/10.1016/s0141-0229(02)00267-3

-Field, J.A., Jong, E., Feijoo-Costa, G. and Bont, J.A.M., 1993. Screening for ligninolytic fungi applicable to the biodegradation of xenobiotics. Trends Biotechnol. 11: 44-49. https://doi.org/10.1016/0167-7799(93)90121-o

-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. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.02.019

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

-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.

-Icel, B., Guler, G., Isleyen, O., Beram, A. and Mutlubas, M., 2015. Effects of industrial heat treatment on the properties of spruce and pine woods. BioResources. 10: 3. 5159-5173. https://doi.org/10.15376/biores.10.3.5159-5173

-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. https://doi.org/10.3390/f10121111

-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. https://doi.org/10.1080/07373930802565921

-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. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.11.006

-Militz, H., 2002. Thermal treatment of wood. European processes and their background, IRG/WP 02-40241. 33rd Annual Meeting, 12-17 May, Cardiff-Wales, 4: 1-17.

-The European Standard EN 113. 1997. Wood preservatives. Test method for determining the protective effectiveness against wood destroying basidiomycetes. https://doi.org/10.3403/2604290u

-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. https://doi.org/10.1080/17480272.2018.1450783

-Zamani, S.M., Hajihassani, R., Farzi, M., Mojerlou, S. and Ghahri, S., 2022. Effect of brown rot fungus on the functional characteristics of heat treated wood. Iranian Journal of Wood and Paper Industries. 13: 2. 161-170.

-Zarey, H.R., Hajihassani, H., Zamani, S.M. and Salehi, K., 2024. Effect of thermo-oil process on biological, physical and mechanical performance of produced thermo wood. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research. 39: 3. 236-252. https://doi.org/10.22092/ijwpr.2024.366260.1776