Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Wood and Forest Science and Technology

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

Investigation of hydro-thermal pretreatments effect on functional properties of densified wood

Reza Hajihassani[*1] | Saman Ghahri[2]

1. Corresponding Author, Assistant Prof., Wood and Forest Products Science Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran. E-mail: reza.hajihassani@gmail.com
2. Assistant Prof., Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran. E-mail: sghahri@gmail.com

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 02.05.2022
Revised: 03.20.2022
Accepted: 03.31.2022

Keywords:
Densification,
Functional properties,
Pretreatment,
Spring back,

ABSTRACT

Background and Objectives: Wood as a renewable material, with its various benefits, has always had different applications in human society. Humans have always considered wood as a natural and biodegradable material throughout history. However, wood is a natural material originating from different trees creates limitations on its properties such as moisture absorption, dimensional changes, biodegradation, degradation by ultraviolet radiation and weathering, etc. Therefore, this natural product may need to be modified to achieve the desired functionality and application. Different modification methods can improve the physical and mechanical properties of wood. Enhancement of light wood density by compression process is one of the wood modification methods that often improve the mechanical properties. However, spring back is the main subject in this process. There have been done numerous studies in this field, but no suitable method has been presented until now that can effectively control spring back. Therefore, the aim of this study was the improvement of the physical and mechanical properties of poplar wood (*Populus deltoides*) by using hydrothermal pretreatments; at the same time, spring back assessment under this process.

Materials and Methods: In the current study, Poplar wood (*Populous deltoids*) was initially cut into the timber in the wood and paper laboratory of the Alborz research complex and then changed into the pieces with dimensions of 45×7×4.2 cm^3 (longitudinal × tangential × radial). Afterwards, the wood specimens were hydrothermally treated at temperatures of 100 °C for three times of 0, 60, and 120 minutes. In the next step, the second pretreatment and also densification process was carried out under a hot press in the radial direction with a compression set of 40 percent. The pretreated poplar wood specimens were immediately compressed by the hot press at a temperature of 160, 180, and 200 °C for two times of 60 and 90 minutes. The press pressure was considered 50 kg/cm^2. The specimens were then physically and mechanically tested as density gradient, spring back after press and also conditioning, impact strength and compression parallel to the grain. The results were analyzed based on a complete randomized design (CRD) under a factorial experiment by SPSS software. The mean comparison was evaluated using Duncan's multiple range tests.

Results: Results assessment compared with other studies showed that this process, such as uniform structure and less density gradient, could reach

acceptable physical and mechanical properties. Moreover, the results revealed a reduction of spring back after press and conditioning and improved mechanical properties such as impact strength and compression parallel to the grain.

Conclusion: The densification process of low-density wood species with hydrothermal pretreatments improves the physical and mechanical properties and expands their functional domain.

Cite this article: Hajihassani, Reza, Ghahri, Saman. 2022. Investigation of hydro-thermal pretreatments effect on functional properties of densified wood. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 29 (1), 25-39.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/JWFST.2022.19914.1961
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

بررسی تأثیر پیش‌تیمارهای رطوبتی– حرارتی بر خواص کاربردی چوب فشرده‌سازی شده

رضا حاجی‌حسنی*[۱] | سامان قهری[۲]

۱. نویسنده مسئول، استادیار، بخش تحقیقات علوم چوب و فرآورده‌های آن، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. رایانامه: reza.hajihassani@gmail.com

۲. استادیار، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. رایانامه: sghahri@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۶
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۱۱

واژه‌های کلیدی:
بازگشت فنری،
پیش‌تیمار،
فشرده‌سازی،
ویژگی‌های کاربردی

چکیده

سابقه و هدف: چوب به‌عنوان یک ماده احیاءپذیر، با دارا بودن مزایای متنوع همواره دارای مصارف مختلفی در جامعه انسانی بوده است. با این وجود، این حقیقت که چوب یک ماده طبیعی است و از گونه‌های مختلفی تهیه می‌گردد، محدودیت‌هایی را در خواص (جذب رطوبت، تغییرات ابعادی، تخریب توسط عوامل مخرب زیستی، تخریب توسط اشعه ماورای بنفش و هوازدگی و ...) و کاربرد آن ایجاد می‌نماید؛ بنابراین این ماده طبیعی ممکن است برای به دست آوردن عملکرد و کاربرد مورد نظر نیاز به اصلاح و تغییر ساختاری داشته باشد. یکی از روش‌های اصلاح چوب‌های سبک، افزایش دانسیته آن با استفاده از فرایند فشرده‌سازی می‌باشد که غالباً خواص مکانیکی چوب را بهبود می‌بخشد؛ اما در فرایند فشرده‌سازی، چوب تمایل به بازگشت به حالت اولیه دارد. برای تعدیل بازگشت فنری و بهبود ثبات ابعادی چوب مطالعات و پژوهش‌های متعددی صورت پذیرفته است، ولی تاکنون روش مناسبی که بتواند میزان بازگشت فنری را به‌طور مؤثر کاهش داده و یا کنترل نماید و سبب پایداری ابعادی گردد ارائه نشده است. بنابراین این بررسی با به‌کارگیری پیش تیمارهای گرمابی- حرارتی سعی در بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی چوب صنوبر دارد؛ ضمن آن‌که به ارزیابی تأثیر روش نوین به‌کار گرفته‌شده بر کنترل بازگشت فنری و پایداری ابعادی نیز می‌پردازد.

مواد و روش‌ها: در این بررسی نمونه‌های مورد نظر از گونه چوبی صنوبر (*Populous deltoides*) تهیه شدند. چوب صنوبر ابتدا در آزمایشگاه چوب و کاغذ مجتمع تحقیقاتی البرز به الوار تبدیل گردید و سپس قطعاتی با ابعاد ۴۵×۷×۴/۲ سانتی‌مترمکعب (طولی×مماسی×شعاعی) از آن‌ها تهیه شد. در این بررسی به‌منظور پیش تیمار اولیه چوب صنوبر از آب جوش ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شد. زمان تیمار گرمابی در سه سطح صفر، ۶۰ و ۱۲۰ دقیقه در نظر گرفته شد. در مرحله بعد با استفاده از پرس گرم، دومین پیش تیمار و سپس عملیات فشرده‌سازی

نمونه‌های تیمار شده در راستای شعاعی و با ضریب فشردگی ٤٠ درصد انجام گرفت. میزان فشار پرس ۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع و زمان پرس ٦٠ و ۹۰ دقیقه در نظر گرفته شد. هم‌چنین از سه دمای پرس ١٦٠، ۱۸۰ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد استفاده گردید. آزمون‌های فیزیکی شامل اندازه‌گیری گرادیان دانسیته و بازگشت فنری نمونه‌ها پس از متعادل‌سازی بودند. مقاومت به ضربه و مقاومت به فشار موازی الیاف نیز از آزمون‌های مکانیکی می‌باشند که مورد ارزیابی قرار گرفتند. جهت تجزیه‌وتحلیل آماری نیز از آزمون فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی استفاده شد. تجزیه‌وتحلیل نتایج با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن مورد بررسی قرار گرفت.

یافته‌ها: بررسی نتایج و مقایسه آن با سایر پژوهش‌ها نشان دادند که با به‌کارگیری این فرایند می‌توان به خواص فیزیکی و مکانیکی قابل‌قبولی در نمونه‌ها دست یافت؛ به‌طوری‌که این فرایند می‌تواند سبب گرادیان دانسیته کم‌تر و ایجاد بافت همسان در نمونه‌ها گردد. هم‌چنین نتایج بیانگر کاهش میزان بازگشت فنری پس از پرس و نیز پس از متعادل‌سازی نمونه‌ها بودند. خواص مکانیکی نمونه‌ها از جمله مقاومت به ضربه و مقاومت فشاری موازی الیاف نیز در اثر این فرایند بهبود یافت.

نتیجه‌گیری: فرایند فشرده‌سازی گونه‌های چوبی سبک همراه با پیش تیمارهای رطوبتی- حرارتی سبب بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی می‌گردد و دامنه کاربرد چوب‌های سبک را وسعت می‌بخشد.

استناد: حاجی‌حسنی، رضا، قهری، سامان (۱۴۰۱). بررسی تأثیر پیش‌تیمارهای رطوبتی- حرارتی بر خواص کاربردی چوب فشرده‌سازی شده. *نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل*، ۲۹ (۱)، ۲۵-۳۹.
DOI: 10.22069/JWFST.2022.19914.1961

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
© نویسندگان.

مقدمه

چوب به‌عنوان یک ماده طبیعی و با خصوصیات منحصربه‌فرد، همواره در طول تاریخ از پرطرفدارترین مصالح در ساخت انواع سازه‌های چوبی بوده است؛ اما با توجه به این‌که خواص آن تحت‌تأثیر شرایط محیطی قرار می‌گیرد بنابراین در کاربرد آن محدودیت‌هایی را ایجاد می‌نماید. ازاین‌رو برای بهبود عملکرد این ماده طبیعی می‌تواند تغییرات ساختاری در آن ایجاد نمود. در این راستا روش‌های متعدد اصلاح چوب ابداع و هم‌چنان در حال شکل‌گیری می‌باشند. یکی از روش‌های اصلاح چوب‌های سبک، افزایش دانسیته آن با استفاده از فرایند فشرده‌سازی می‌باشد که غالباً خواص مکانیکی چوب را بهبود می‌بخشد؛ اما در فرایند فشرده‌سازی، چوب تمایل به بازگشت به حالت اولیه (Springback) دارد. برای تعدیل بازگشت فنری و ثبات ابعادی چوب مطالعات و پژوهش‌های متعددی صورت پذیرفته است. بدین‌منظور روش‌های اصلاح متفاوتی مانند تیمارهای حرارتی و رطوبتی و یا ترکیبی از این دو به‌کار گرفته‌شده است. نتایج مطالعات در زمینه‌های مختلف فرآیندهای حرارتی- رطوبتی و نیز حرارتی- رطوبتی- مکانیکی نشان می‌دهند که خصوصیات چوب مانند پایداری ابعادی، مقاومت، سختی سطح و دوام زیستی بهبود می‌یابد (۱۵).

نتایج پژوهش‌های کایماکچی و بایرام (۲۰۲۱) نشان داد که در فرایند تیمار حرارتی چوب صنوبر، با افزایش دمای تیمار، ویژگی‌های همکشیدگی و واکشیدگی، مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری کاهش می‌یابد (۱۰). پلیت و یورولماز (۲۰۲۱) در بررسی تأثیر فرایند حرارتی- مکانیکی بر خواص مکانیکی چوب صنوبر و نوئل نشان دادند که فرایند فشرده‌سازی سبب افزایش دانسیته و درنتیجه بهبود خواص مکانیکی می‌گردد، اما پیش‌تیمار حرارتی سبب کاهش دانسیته، سختی و مقاومت خمشی می‌گردد. هم‌چنین نتایج نشان داد که پیش‌تیمار حرارتی در دمای کم‌تر از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد دارای اثر مثبت بر مدول الاستیسیته بوده است (۱۶). نتایج بررسی‌های آلویرا و همکاران (۲۰۱۰) نشان داد که در فرآیندهای تیمار گرمابی، واکنش‌های مربوط به تغییر ساختار شیمیایی چوب و تجزیه برخی از بسپارها در درجه حرارت ۲۴۰-۱۶۰ درجه سانتی‌گراد، فشار ۳/۵MPa-۱، زمان ماندگاری چند دقیقه تا چند ساعت و میزان ماده خشک کم‌تر از ۲۰٪ انجام می‌گیرد (۱).

از جمله تیمارهای رطوبتی تیمار بخار می‌باشد که با حذف گروه‌های استیل همی‌سلولز و تولید اسید استیک سبب هیدرولیز همی‌سلولزها و کاهش گروه‌های هیدروکسیل می‌گردد (۱۱). همچنین حضور اسید استیک مشتق شده از همی‌سلولز عاملی برای افزایش تخریب لیگنین می‌باشد. تخریب اتصالات ß-O-4 در لیگنین سوزنی‌برگان در طول فرآیند گرمابی دلیل اصلی کاهش سفتی چوب می‌باشد (٤). از طرفی لیگنین نوآرایی شده موجب افزایش مقاومت به شکست در نمونه‌های تیمار شده می‌گردد و هم‌چنین مقاومت چوب تیمار شده به جذب آب را افزایش می‌دهد (۵ و ۱۱).

اصلاح گرمایی نیز یکی دیگر از روش‌های اصلاح دوستدار محیط‌زیست می‌باشد. تیمارهای گرمایی معمولاً در درجه حرارت ۲۶۰-۱۶۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌گیرد، زیرا دماهای پایین‌تر سبب تغییرات جزئی ویژگی‌های چوب و دماهای بالاتر منجر به تخریب آن می‌گردد (۱۲)، بنابراین مقدار حرارت و

زمان تیمار بستگی به نوع فرآیند، گونه چوبی، اندازه نمونه‌ها، درصد رطوبت چوب، خواص فیزیکی و مکانیکی موردنظر، مقاومت به حملات بیولوژیکی و ثبات ابعادی مورد نظر محصولات نهایی دارد.

حرارت‌دهی چوب در دامنه گرمایی ۲۶۰-۱۴۰ درجه سانتی‌گراد برای مدت زمان طولانی سبب کاهش برگشت‌ناپذیر جذب رطوبت توسط چوب می‌گردد (۷). بنابراین در تیمار گرمایی نیز، اصلاحات شیمیایی در ساختار چوب که در درجه حرارت بالا اتفاق می‌افتد؛ تغییرات مطلوبی را در ساختار فیزیکی چوب مانند کاهش همکشیدگی و واکشیدگی، رطوبت تعادل کم، افزایش مقاومت به هوازدگی و افزایش زیبایی چوب، رنگ تیره و مقاومت به تخریب بالاتر 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 (۱۳)، بنابراین برای برطرف نمودن این مشکل در تیمارهای گرمایی و گرمابی می‌توان از دیگر روش‌های اصلاحی از جمله اصلاح مکانیکی استفاده نمود.

فرآیند فشرده‌سازی چوب یک روش اصلاحی بسیار مؤثر برای افزایش دانسیته چوب می‌باشد و با افزایش دانسیته اغلب خواص مکانیکی چوب افزایش می‌یابد. انشاری و همکاران (۲۰۱۱) خواص مکانیکی سدر ژاپنی فشرده‌شده با ۵ ضریب فشردگی صفر، ۳۳، ۵۰، ٦٧ و ۷۰ درصد مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دادند که با افزایش ضریب فشردگی از ۳۳ درصد به ۵۰، ٦٧ و ۷۰ درصد، دانسیته به ترتیب به مقدار ۲۵، ۷۵، ۱۷۵ و ۲٦۱ درصد در مقایسه با دانسیته اولیه ($۳۲۲Kg/m^3$) افزایش یافت؛ که منجر به بهبود خواص مکانیکی گردید (۳).

در پژوهشی دیگر نشان داده شد که به‌کارگیری تیمار فشرده‌سازی همراه با تیمار بخار گرمایی نه‌تنها سبب بهبود ویژگی‌های فیزیکی چوب می‌گردد بلکه ضعف‌های مکانیکی ایجاد شده در اثر تیمار بخار گرمایی را نیز برطرف نموده و سبب بهبود ویژگی‌های مکانیکی می‌شود (۸).

محبی و همکاران (۲۰۰۹) در پژوهش‌های خود تأثیر تیمار ترکیبی گرمابی- مکانیکی بر چوب صنوبر را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دادند که افزایش دمای تیمار و نیز دمای پرس سبب کاهش بازگشت فنری نمونه‌ها گردید، ولی دمای تیمار بسیار مؤثرتر از دمای پرس بود. ایشان دلیل این امر را تغییر ساختار شیمیایی چوب (تخریب همی‌سلولزها، افزایش کریستالیته سلولز و افزایش پیوند عرضی در لیگنین) و آبگریز شدن آن عنوان نمودند. هم‌چنین این بررسی افزایش مقاومت‌های مکانیکی (مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته، مقاومت به ضربه و سختی) در اثر فرایند گرمابی- مکانیکی را نشان داد. دلیل افزایش مقاومت‌ها به خاطر افزایش دانسیته می‌باشد، ولی دلیل کاهش مقاومت‌ها با افزایش دمای تیمار به خاطر ترد و شکننده شدن لیگنین و نیز کاهش طول زنجیره سلولز می‌باشد (۱٤).

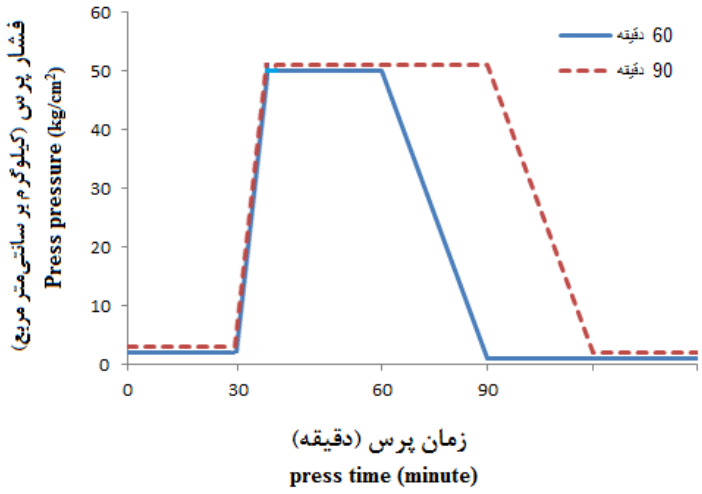
گونگ و همکاران (۲۰۱۰) اثر فشرده‌سازی و تیمار حرارتی بر روی چوب صنوبر را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که چوب فشرده‌شده‌ای که تحت تیمار حرارتی در دمای ۲۱۰-۱۹۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته، دارای دانسیته کم‌تری از چوب فشرده بدون تیمار حرارتی می‌باشد؛ با این وجود

متوسط دانسیته هر دو بالاتر از چوب فشرده نشده بدون تیمار حرارتی بود (٦).

در فرایند فشرده‌سازی، موضوع بازگشت فنری و پایداری ابعادی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد، ولی تاکنون روش مناسبی که بتواند میزان بازگشت فنری را به‌طور مؤثر کاهش داده و یا کنترل نماید و سبب پایداری ابعادی گردد ارائه نشده است. بنابراین این بررسی با به‌کارگیری پیش‌تیمارهای گرمابی- حرارتی قبل از فشرده‌سازی مکانیکی سعی در بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی چوب صنوبر دارد؛ ضمن آن‌که به ارزیابی تأثیر روش به‌کار گرفته‌شده بر کنترل بازگشت فنری و پایداری ابعادی نیز می‌پردازد.

مواد و روش‌ها

در این بررسی از گونه چوبی صنوبر (*Populus deltoides*) استفاده گردید. برای انجام پیش تیمار گرمابی- حرارتی و نیز فشرده‌سازی، صنوبرها به قطعاتی با ابعاد ٤٥×٧×٤/٢ (شعاعی×مماسی×طولی) سانتی‌مترمکعب تبدیل شدند. سپس برای انجام تیمار گرمابی نمونه‌های تهیه‌شده، از سه زمان تیمار صفر، ٦٠ و ١٢٠ دقیقه در آب جوش استفاده شد. لازم به ذکر است که تیمار رطوبتی صفر، غوطه‌وری در آب با دمای معمولی برای مدت زمان ٢٤ ساعت بوده است. به‌منظور انجام تیمار مکانیکی، نمونه‌های پیش تیمار شده با فرایند گرمابی بلافاصله به پرس گرم آزمایشگاهی از نوع Buerkle L 100 انتقال داده شدند تا تحت تیمار فشرده‌سازی قرار گیرند. تیمار فشرده‌سازی بر اساس شکل ١ تحت سه دمای پرس ١٦٠، ١٨٠ و ٢٠٠ درجه سانتی‌گراد و دو زمان پرس ٦٠ و ٩٠ دقیقه انجام شد. لازم به ذکر است که فشرده‌سازی نمونه‌ها در راستای ضخامت (جهت شعاعی) و به میزان ٤٠ درصد و با فشار پرس ٥٠ بار بوده است. ضخامت نهایی نمونه‌ها به مقدار ٢/٥ سانتی‌متر بود که توسط شابلون کنترل گردید. بدین‌ترتیب درمجموع ١٨ تیمار به‌دست آمد که با در نظر گرفتن ٣ تکرار برای هر تیمار، درمجموع ٥٤ نمونه آزمایشگاهی تهیه گردید.



شکل ١- روند فشرده‌سازی چوب صنوبر از زمان بسته شدن پرس گرم.

Figure 1. Densification process of poplar wood since hot press closing.

انجام آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های شاهد و تیمار شده نیز بر اساس استاندارد D143-09 ASTM انجام پذیرفت (۲). آزمون‌های مورد ارزیابی شامل اندازه‌گیری گرادیان دانسیته، میزان بازگشت فنری بلافاصله پس از پرس و پس از ۵ هفته متعادل‌سازی در شرایط آزمایشگاهی (رطوبت نسبی ۱±۶۵ درصد و درجه حرارت ۳±۲۰ درجه سانتی‌گراد)، مقاومت به فشار موازی الیاف و مقاومت به ضربه بودند. آزمون مقاومت به فشار موازی الیاف با استفاده از دستگاه INSTRON-1186 و با سرعت بارگذاری ۱/۸ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. مقاومت به ضربه نمونه‌ها نیز به روش آیزود مورد ارزیابی قرار گرفت.

در این بررسی گرادیان دانسیته با استفاده از لایه‌برداری نمونه‌های با ابعاد ۴۵×۲/۵×۲/۵ (شعاعی × مماسی × طولی) سانتی‌مترمکعب و بر اساس دانسیته لایه‌های برداشته‌شده مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین‌منظور ابتدا وزن نمونه‌های فشرده‌شده اندازه‌گیری شدند. سپس با استفاده از دستگاه گندگی به میزان یک میلی‌متر از هر طرف نمونه‌ها برداشته شد (درمجموع ۲ میلی‌متر) و مجدداً وزن نمونه اندازه‌گیری شد تا وزن لایه برداشته‌شده به دست آید. با توجه به این‌که طول، عرض و ضخامت لایه برداشته‌شده مشخص بوده است بنابراین با استفاده از حجم محاسبه‌شده و نیز وزن لایه‌های برداشته‌شده دانسیته این لایه‌ها محاسبه گردید. لازم به ذکر است که عملیات لایه‌برداری در ۱۰ مرحله صورت گرفت.

هم‌چنین برای اندازه‌گیری میزان بازگشت فنری (Springback) نمونه‌های تیمار شده بلافاصله پس از پرس و نیز پس از متعادل‌سازی از رابطه زیر استفاده گردید:

$$Sp = \frac{h_1 - h_2}{h_1} * 100 \qquad (۱)$$

که در آن، Sp بازگشت فنری (٪)، h_1 ضخامت نهایی در نظر گرفته‌شده در زیر پرس (cm) و h_2 ضخامت پس از خروج از پرس (cm).

جهت تجزیه‌وتحلیل آماری نیز از آزمون فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی استفاده شد. تجزیه‌وتحلیل نتایج با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

جدول ۱ خلاصه تجزیه واریانس مقاومت‌های فیزیکی و مکانیکی و اثرات مستقل و متقابل زمان تیمار گرمابی، زمان پرس و دمای پرس را در سطح آماری ۹۹ درصد نشان می‌دهد.

جدول ۱- خلاصه تجزیه واریانس خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های تیمار شده.

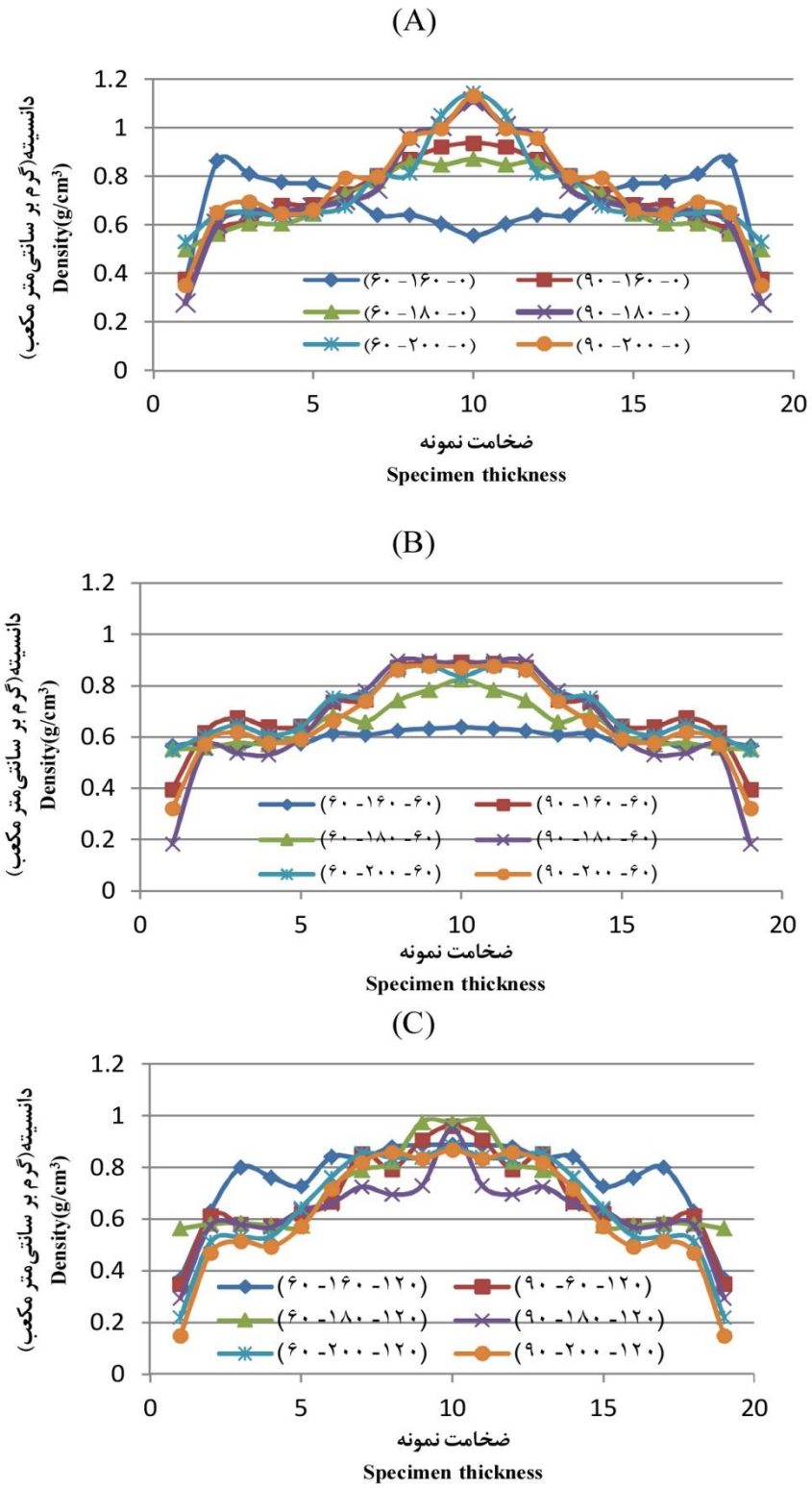
Table 1. Summarized result of ANOVA for physical and mechanical properties of treated specimens.

بازگشت فنری پس از متعادل‌سازی (٪) Springback after conditioning (%)	بازگشت فنری پس از پرس (٪) Springback after press (%)	مقاومت فشاری موازی الیاف (مگاپاسکال) Compression parallel to grain (Mpa)	مقاومت به ضربه (کیلوژول بر مترمربع) Impact strength (Kj/m^{2})	منبع تغییرات Source of variation
0.000*	0.000*	277 ns	377 ns	زمان تیمار گرمابی Hydro thermal time
0.000*	0.000*	860 ns	0.000*	زمان پرس Press time
0.000*	0.000*	816 ns	172 ns	دمای پرس Press temperature
0.000*	0.000*	106 ns	0.050**	زمان تیمار گرمابی × زمان پرس Hydro thermal time × Press time
0.000*	0.000*	777 ns	886 ns	زمان تیمار گرمابی× دمای پرس Hydro thermal time × Press temperature
0.000*	0.000*	0.002*	0.008*	زمان پرس × دمای پرس Press time × Press temperature
0.000*	0.000*	868 ns	941 ns	زمان تیمار گرمابی × زمان پرس × دمای پرس Hydro thermal time × Press time × Press temperature

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد

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

گرادیان دانسیته: یکی از شاخص‌ترین اثرات فشرده‌سازی افزایش دانسیته می‌باشد. در این تحقیق تغییرات دانسیته در لایه‌های مختلف نمونه‌های فشرده‌شده با فرایند گرمابی- مکانیکی مورد بررسی قرار گرفت. گرادیان دانسیته با استفاده از لایه‌برداری نمونه‌ها و بر اساس دانسیته لایه‌های برداشته‌شده مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۲ (A, B, C) تغییرات دانسیته نمونه‌ها در شرایط مختلف فرایند گرمابی- مکانیکی را نشان می‌دهند. شکل ۲ (A) که بیانگر تغییرات دانسیته در شرایط بدون تیمار گرمابی می‌باشد نشان می‌دهد که در دمای پرس ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد و زمان پرس ۶۰ دقیقه، دانسیته در بخش مرکزی کاهش می‌یابد. ولی در سایر شرایط تیمار که در شکل ۲ (B و C) نشان داده شده است ملاحظه می‌گردد که دانسیته بخش مرکزی دارای بیش‌ترین مقدار می‌باشد. روند تغییرات دانسیته در این شکل‌ها به‌صورت n می‌باشد که افزایش مقدار دانسیته در بخش مرکزی را نشان می‌دهد. در حقیقت پیش‌تیمار گرمابی می‌تواند عاملی مؤثر در افزایش میزان دانسیته در بخش مرکزی نمونه‌ها باشد. به‌عبارت‌دیگر پیش‌تیمار گرمابی در ترکیب با حرارت پرس می‌تواند گرادیان دانسیته کم‌تر و دانسیته یکنواخت‌تری را به‌همراه داشته باشد. دلیل افزایش دانسیته بخش مرکزی می‌تواند به خاطر فرار رطوبت و انتقال بهتر حرارت به مغز چوب و درنتیجه نرمی بیش‌تر بخش مرکزی و درنهایت فشردگی بیش‌تر آن باشد.

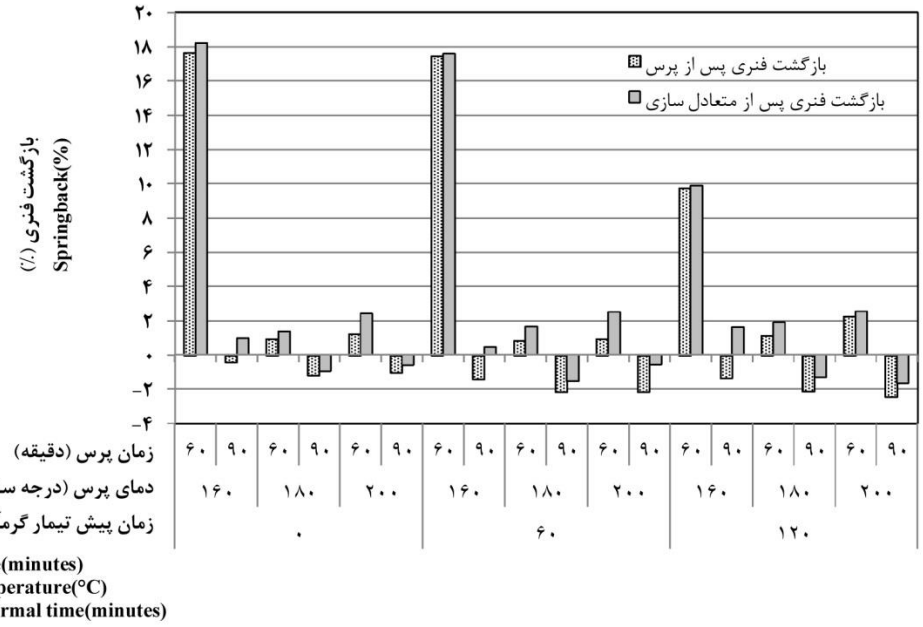


شکل ۲- گرادیان دانسیته نمونه‌های فشرده‌سازی شده چوب صنوبر

(از راست به چپ پیش‌تیمار گرمابی: عدد اول، دمای پرس: عدد دوم و زمان پرس: عدد سوم).

Figure 2. Density gradient of compressed poplar wood specimens (right to left hydro thermal pretreatment: first numbers, press temperatures: second numbers and press times: third numbers).

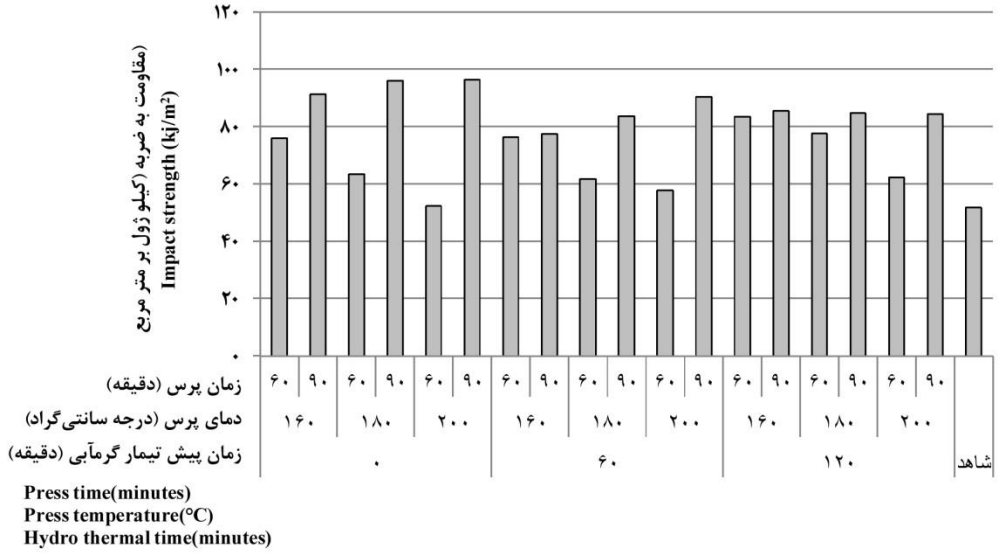
بازگشت فنری (Springback): یکی از اثرات مهم فشرده‌سازی، بازگشت فنری نمونه چوبی می‌باشد. در این بررسی تأثیر پیش تیمارهای گرمابی و نیز پیش تیمار حرارتی در مرحله پرس بر تغییرات بازگشت فنری مورد ارزیابی قرار گرفت؛ بنابراین میزان بازگشت فنری بلافاصله پس از پرس و نیز پس از متعادل‌سازی محاسبه گردید. نتایج نشان دادند که همه شرایط تیمار در سطح آماری ۹۹ درصد دارای اثر معنی‌دار بر میزان بازگشت فنری پس از پرس و نیز پس از متعادل‌سازی می‌باشد (جدول ۱). مقایسه تیمارها در شکل ۳ نشان می‌دهند که بیش‌ترین مقدار بازگشت فنری پس از پرس و نیز پس از متعادل‌سازی در هر سه زمان تیمار گرمابی صفر، ٦۰ و ۱۲۰ دقیقه، مربوط به دمای پرس ۱٦۰ درجه سانتی‌گراد و زمان پرس ٦۰ دقیقه می‌باشد؛ و این در حالی است که زمان تیمار گرمابی صفر، دمای پرس ۱٦۰ درجه سانتی‌گراد و زمان پرس ٦۰ دقیقه نیز دارای بیش‌ترین مقدار بازگشت فنری پس از پرس و نیز پس از متعادل‌سازی می‌باشد. در حقیقت تیمار گرمابی و نیز حرارت به‌کار گرفته‌شده در مرحله پرس سبب تغییر ساختار شیمیایی چوب (تخریب همی‌سلولزها، افزایش کریستالیته سلولز و افزایش پیوند عرضی در لیگنین)، پایداری ابعادی و درنهایت کاهش بازگشت فنری شده است (۹ و ١٤). هم‌چنین شکل ۳ نشان می‌دهد که مقدار بازگشت فنری در اغلب زمان‌های پرس ۹۰ دقیقه روند منفی داشته است. از طرفی نتایج بررسی بازگشت فنری نمونه‌ها نشان دادند که دمای پرس نیز دارای اثر معنی‌داری بر این خصوصیت می‌باشد؛ به‌طوری‌که بیش‌ترین و کم‌ترین میزان بازگشت فنری پس از پرس و نیز پس از متعادل‌سازی به ترتیب مربوط به دمای پرس ۱٦۰ و ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد بوده است. در حقیقت دمای پرس ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد می‌تواند دمای بهینه در کاهش میزان بازگشت فنری باشد به‌نحوی‌که تخریب ساختاری کم‌تری را نیز به همراه داشته باشد. مقایسه میانگین‌های بازگشت فنری پس از پرس و پس از متعادل‌سازی نیز نشان دادند که بیش‌ترین میزان بازگشت فنری مربوط به شرایط زمان تیمار گرمابی صفر دقیقه و دمای پرس ۱٦۰ درجه سانتی‌گراد بوده که در گروه A جدول دانکن قرار گرفت و کم‌ترین میزان بازگشت فنری مربوط به زمان تیمار گرمابی ۱۲۰ دقیقه و دمای پرس ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد بوده که در گروه C جدول دانکن قرار گرفت. نکته دارای اهمیت در شکل ۳، عدم اختلاف قابل‌توجه بازگشت فنری بلافاصله پس از پرس و پس از متعادل‌سازی می‌باشد که بیانگر تأثیر مثبت تیمار گرمابی و حرارت به‌کار گرفته‌شده در مرحله پرس بر ثبات ابعادی و کاهش بازگشت فنری می‌باشد (١٤).



شکل ۳- تأثیر ترکیب شرایط مختلف تیمار گرمابی- مکانیکی بر بازگشت فنری نمونه‌ها پس از پرس و متعادل‌سازی.

Figure 3. Effect of hydro-thermo- mechanical treatment on springback after press and conditioning.

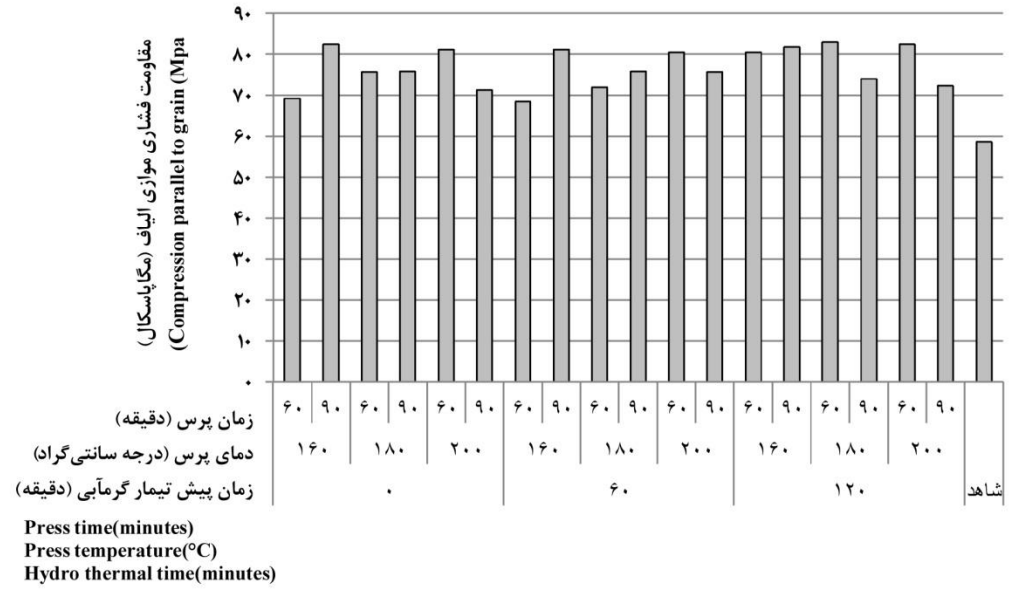
مقاومت به ضربه: نتایج به‌دست‌آمده نشان دادند که در تیمار گرمابی- مکانیکی، اثر مستقل زمان پرس بر مقاومت به ضربه در سطح آماری ۹۹ درصد معنی‌داری می‌باشد (جدول ۱). مقایسه تیمارها در شکل ٤ نشان می‌دهند که در هر سه زمان تیمار گرمابی صفر، ٦۰ و ۱۲۰ دقیقه، با افزایش زمان پرس از ٦۰ به ۹۰ دقیقه مقاومت به ضربه افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که بالاترین میزان مقاومت به ضربه مربوط به زمان تیمار گرمابی صفر، دمای پرس ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان پرس ۹۰ دقیقه و برابر با ۹٦/۳۳ کیلوژول بر مترمربع می‌باشد. کم‌ترین مقدار مقاومت به ضربه نیز مربوط به نمونه‌های شاهد و برابر با ۵۱/٦۷ کیلوژول بر مترمربع می‌باشد. به نظر می‌رسد که با افزایش زمان پرس، انتقال حرارت به نحو مطلوب‌تری صورت گرفته و درنتیجه می‌تواند منجر به پیوندهای عرضی لیگنین و نوآرایی آن گردد که درنهایت افزایش مقاومت به ضربه را به همراه دارد (۵ و ۱۱)، ضمن این‌که حذف همی‌سلولزها و افزایش درجه کریستالیته سلولز نیز می‌تواند در این امر نقش داشته باشد. بررسی مقایسه میانگین‌های مقاومت به ضربه نمونه‌ها نیز نشان دادند که بیش‌ترین مقدار مقاومت به ضربه مربوط به شرایط زمان پرس ۹۰ دقیقه بوده است که در گروه A جدول دانکن قرار گرفت و کم‌ترین میزان مقاومت به ضربه مربوط به نمونه‌های شاهد بوده و در گروه C جدول دانکن قرار گرفتند. هم‌چنین نتایج نشان دادند که اثر متقابل دما و زمان پرس و نیز اثر متقابل زمان پرس و زمان تیمار گرمابی بر مقاومت به ضربه دارای اثر معنی‌دار می‌باشند (جدول ۱). شکل ٤ نشان می‌دهد که در هر سه زمان تیمار گرمابی با افزایش هم‌زمان دما و زمان پرس، مقاومت به ضربه افزایش می‌یابد.



شکل ٤- تأثیر ترکیب شرایط مختلف تیمار گرمابی- مکانیکی بر مقاومت به ضربه.

Figure 4. Effect of hydro-thermo- mechanical treatment on impact strength.

مقاومت فشاری موازی الیاف: نتایج آنالیز داده‌ها نشان دادند که در فرایند گرمابی- مکانیکی، هیچ‌یک از فاکتورهای زمان تیمار گرمابی، دمای پرس و زمان پرس به‌تنهایی دارای اثر معنی‌داری بر مقاومت فشاری موازی الیاف نمی‌باشند و فقط اثر متقابل دما و زمان پرس در سطح آماری ۹۹ درصد بر این ویژگی مکانیکی دارای اثر معنی‌دار می‌باشد. مقایسه تیمارها در شکل ٥ نشان می‌دهند که در فرایند گرمابی- مکانیکی، تأثیر فاکتورهای مورد بررسی شامل زمان تیمار گرمابی، زمان و دمای پرس اثرات متفاوتی بر میزان مقاومت فشاری موازی الیاف نمونه‌ها دارند؛ به‌طوری‌که کم‌ترین میزان مقاومت فشاری موازی الیاف مربوط به نمونه‌ای شاهد و برابر با ۵۸/۵۷ مگاپاسکال می‌باشد. هم‌چنین در ترکیب شرایط مختلف تیمار، بالاترین میزان مقاومت فشاری موازی الیاف مربوط به شرایط زمان تیمار گرمآبی ۱۲۰ دقیقه، دمای پرس ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و زمان پرس ٦۰ دقیقه و برابر با ۸۲/۹٤ مگاپاسکال می‌باشد (شکل ٥). مقایسه میانگین‌های مقاومت فشاری موازی الیاف نیز نشان دادند که کم‌ترین میزان مقاومت فشاری موازی الیاف مربوط به نمونه‌های شاهد می‌باشد و بیش‌ترین میزان مقاومت فشاری موازی الیاف مربوط به شرایط زمان تیمار گرمابی ۱۲۰ دقیقه، دمای پرس ١٦۰ درجه سانتی‌گراد و زمان پرس ٦۰ دقیقه بوده است که به‌همراه سایر تیمارها در یک گروه قرار گرفتند. به‌عبارت‌دیگر تیمار گرمابی می‌تواند سبب افزایش مقاومت فشاری موازی الیاف در نمونه‌ها گردد. تیمار حرارتی همراه با تیمار فشرده‌سازی ضمن افزایش دانسیته چوب، سبب تغییر ساختار شیمیایی چوب (تخریب همی‌سلولزها، افزایش کریستالیته سلولز و افزایش پیوند عرضی در لیگنین) می‌گردد که درمجموع می‌تواند سبب افزایش مقاومت فشاری موازی الیاف گردد (١٤).



شکل ۵- تأثیر ترکیب شرایط مختلف تیمار گرمابی- مکانیکی بر مقاومت فشاری موازی الیاف.

Figure 5. Effect of hydro-thermo- mechanical treatment on compression parallel to grain.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این بررسی نشان دادند که فرآیند فشرده‌سازی سبب افزایش دانسیته نمونه‌های تیمار شده در مقایسه با نمونه‌های شاهد می‌گردد. هم‌چنین نتایج بررسی گرادیان دانسیته نمونه‌های تیمار شده با فرآیند گرمابی- مکانیکی نشان دادند که پیش‌تیمار گرمابی عاملی مؤثر در افزایش میزان دانسیته در بخش مرکزی نمونه‌ها می‌باشد. به‌عبارت‌دیگر پیش تیمار گرمابی در ترکیب با حرارت پرس می‌تواند گرادیان دانسیته کم‌تر و دانسیته یکنواخت‌تری را به همراه داشته باشد. ارزیابی میزان بازگشت فنری نمونه‌های پیش‌تیمار شده با فرایند گرمابی و نیز پیش‌تیمار حرارتی در مرحله پرس نشان دادند که پیش تیمارهای به‌کار گرفته‌شده می‌توانند در کاهش میزان بازگشت فنری بسیار مؤثر باشند. به‌طوری‌که بیش‌ترین و کم‌ترین میزان بازگشت فنری پس از پرس و نیز پس از متعادل‌سازی به ترتیب مربوط به نمونه‌های با زمان تیمار گرمابی صفر و ۱۲۰ دقیقه می‌باشند. هم‌چنین نتایج بررسی بازگشت فنری نمونه‌ها نشان دادند که دمای پرس نیز دارای اثر معنی‌داری بر این خصوصیت می‌باشد؛ به‌طوری‌که بیش‌ترین و کم‌ترین میزان بازگشت فنری پس از پرس و نیز پس از متعادل‌سازی به ترتیب مربوط به دمای پرس ۱۶۰ و ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد بوده است. نتایج بررسی مقاومت به ضربه نمونه‌های تیمار شده با فرایند گرمابی- مکانیکی نیز نشان دادند که زمان پرس دارای اثر معنی‌داری بر مقاومت به ضربه نمونه‌ها می‌باشد و با افزایش زمان پرس از ۶۰ به ۹۰ دقیقه، مقاومت به ضربه افزایش می‌یابد. هم‌چنین نتایج بررسی تأثیر فرایند گرمابی- مکانیکی بر مقاومت فشاری موازی الیاف نشان دادند که هرچند عمل فشرده‌سازی سبب افزایش این ویژگی می‌گردد اما هیچ‌یک از فاکتورهای زمان تیمار گرمابی، دمای پرس و زمان پرس به‌تنهایی دارای اثر معنی‌داری بر مقاومت فشاری موازی الیاف نمونه‌ها نمی‌باشند. بااین‌حال نتایج مقایسه میانگین‌های مقاومت فشاری موازی الیاف نشان دادند که تیمار گرمابی می‌تواند سبب افزایش مقاومت فشاری موازی الیاف در نمونه‌ها گردد.

منابع

1. Alvira, P., Tomás-Pejó, E., Ballesteros, M., and Negro, M.J. 2010. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: a review. Bioresource Technology. 101: 4851-4861.
2. American Society for Testing of Materials, ASTM D 143-09. 2014. Standard methods of testing small clear specimens of timber. 31p.
3. Anshari, B., Guan, Z.W., Kitamori, A., Jung, K., Hassel, I., and Komatsu, K. 2011. Mechanical and moisture-dependent swelling properties of compressed Japanese Cedar. Construction and Building Materials. 25: 1718-1725.
4. Assor, C., Placet, V., Chabbert, B., Habrant, A., Lapierre, C., Pollet, B., and Perre, P. 2009. Concomitant changes in viscoelasticity properties and amorphous polymers during the hydrothermal treatment of hardwood and softwood. J. of Agricultural and Food. Chemistry. 57: 6830-6837.
5. Biswas, A.K., Yang, W., and Blasiak, W. 2011. Steam pretreatment of Salix to upgrade biomass fuel for wood pellet production. Fuel Processing Technology. 92: 1711-1717.
6. Gong, M., Lamason, C., and Li, L. 2010. Interactive effect of surface densification and post-heat- treatment on aspen wood. J. of Materials Processing Technology. 210: 293-296.
7. 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. 105-119.
8. Hajihassani, R. 2017. Evaluation of physical and mechanical properties of glulam made from treated poplar wood by combined hygro thermo-mechanical modification. Dissertation thesis, Tarbiat Modares University.
9. Hakkou, M., Pétrissans, M., Zoulalian, A., and Gérardin, P. 2005. Investigation of wood wettability changes during heat treatment on the basis of chemical analysis. Polymer Degradation and Stability. 89: 1-5.
10. Kaymakci, A., and Bayram, C. 2021. Evaluation of heat treatment parameters effect on some physical and mechanical properties of poplar wood with multi-criteria decision making techniques. Bioresources. 16: 3. 4693-4703.
11. Lam, P.S. 2011. Steam explosion of biomass to produce durable pellet. Ph.D. Dissertation. The University of British Columbia. Vancouver, Canada.
12. 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.
13. Mitchell, P.H. 1988. Irreversible property changes of small loblolly pine specimens heated in air, nitrogen, or oxygen. Wood and Fiber Science. 20: 3. 320-355.
14. Mohebby, B., Sharifnia-Dizboni, H., and Kazemi-Najafi, S. 2009. Combined hydro-thermo-mechanical modification (CHTM) as an innovation in mechanical wood modification, in: Proceeding of fourth European conference on wood modification (ECWM4), Stockholm, Sweden. pp. 353-360.
15. Navi, P., and Sandberg, D. 2011. Thermo-hydro-mechanical processing of wood. Engineering sciences, 360p.
16. Pelit, H., and Yorulmaz, R. 2021. Influence of densification on mechanical properties of thermally pretreated spruce and poplar wood. Bioresources. 14: 4. 9739-9754.