University of Tehran

Journal of Forest and Wood Products

Online ISSN: 2383-0530

Home Page: https://jfwp.ut.ac.ir

Effect of densification on physical and mechanical properties of date palm wood impregnated with melamine formaldehyde Resin

Mahdi Maghsoodi[1] | Saeed Kazemi Najafi[2*] | Behbood Mohebby[3]

1. Department of Wood and Cellulose Products Industries, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran.
   Email: mahdi_maghsoodi@modares.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Wood and Cellulose Products Industries, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran.
   Email: skazemi@modares.ac.ir
3. Department of Wood and Cellulose Products Industries, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran.
   Email: mohebbyb@modares.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received: 02 January 2026
Revised: 13 February 2026
Accepted: 21 April 2026
Published online: 10 June 2026

Keywords:
Impregnation,
Densification,
Physical and mechanical properties,
Shape recovery.

ABSTRACT

Introduction: The long, thick, and cylindrical trunk of the date palm (*Phoenix dactylifera*) presents a potential alternative to the large trunks of conventional timber trees for lumber production. However, challenges arise due to its high porosity, incomplete wood structure, and varying density across different sections of the trunk. The aim of this research was to employ wood modification technologies to enhance the performance of date palm trunk wood. The primary objective of this study was to evaluate and improve the physical and mechanical properties of date palm (*Phoenix dactylifera*) wood through a two-stage treatment process involving impregnation with melamine-formaldehyde resin, followed by compression. This research seeks to offer an effective solution for increasing the added value and enhancing the utility of this agricultural residue as a raw material in the wood industry.

Method: In this study, peripheral wood from date palm trunks in the Behbahan region was collected and prepared. The samples were divided into three main groups: a control group (untreated), a group impregnated with melamine-formaldehyde resin, and a group that was first impregnated with melamine-formaldehyde resin and then densified at compression ratios of 15% and 30%. Following the treatments, key physical and mechanical properties, including the modulus of elasticity in bending, modulus of rupture, compressive strength parallel to the grain, hardness, water absorption, and dimensional stability, were measured and recorded. Microscopic images were taken to confirm resin penetration and examine the internal structure of the treated samples. One-way analysis of variance was used to determine significant differences among treatment means at a 95% confidence level, and, if significant differences were found, Duncan's multiple range test was employed for group comparisons.

Results: The results indicated that the densification technology, combined with melamine-formaldehyde resin impregnation, significantly improved the physical and mechanical characteristics of the date palm trunk wood. A notable increase in the density of the treated samples was observed. The modulus of rupture, compressive strength parallel to the grain, and hardness of the samples were substantially enhanced, with compressive strength increasing by over 100% and hardness increasing more than threefold. Furthermore, the combined treatment led to a significant reduction in water absorption and thickness swelling, demonstrating a considerable improvement in the hydrophobicity and dimensional stability of the date palm trunk wood. The findings also indicated that shape recovery and springback after densification were negligible, and microscopic observations confirmed the successful penetration of melamine-formaldehyde resin into the pores of the samples.

Conclusion: The findings of this research suggest that the two-stage modification process of resin impregnation and densification can be an effective approach for improving the physical and mechanical properties of date palm trunk wood and increasing its added value. Consequently, the thick and cylindrical trunk of the date palm can be considered a viable alternative to the substantial trunks of timber trees for lumber production.

Cite this article: Maghsoodi, M., Kazemi Najafi, S., Mohebby, B. (2026). Effect of densification on physical and mechanical properties of date palm wood impregnated with melamine formaldehyde Resin. *Journal of Forest and Wood Products*, 79 (1), 35-49. DOI: http//doi.org/10.22059/jfwp.2026.409289.1385

© The Author(s) **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/jfwp.2026.409289.1385

دانشگاه تهران

نشریهٔ جنگل و فرآورده‌های چوب

سایت نشریه: https://jfwp.ut.ac.ir

شاپا الکترونیکی: ۰۵۳۰-۲۳۸۳

اثر فشرده‌سازی بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چوب نخل خرما اشباع شده با رزین ملامین‌فرم‌الدهید

مهدی مقصودی[۱] | سعید کاظمی نجفی[۲*] | بهبود محبی[۳]

۱. گروه مهندسی صنایع چوب و فرآورده‌های سلولزی، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران. رایانامه: mahdimaghsoodi@modares.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی صنایع چوب و فرآورده‌های سلولزی، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران. رایانامه:skazemi@modares.ac.ir

۳. گروه مهندسی صنایع چوب و فرآورده‌های سلولزی، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران. رایانامه: mohebbyb@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۲
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۲۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۰۱
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۲۰

کلیدواژه:
اشباع‌سازی،
بازیابی شکل،
فشرده‌سازی،
ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی.

چکیده

مقدمه: تنهٔ بلند، قطور و استوانه‌ای نخل خرما (*Phoenix dactylifera*) آن را به‌عنوان یک جایگزین برای تنهٔ قطور درختان چوبی برای تولید الوار مطرح می‌سازد اما تخلخل زیاد، عدم تشکیل ساختار چوب کامل و تغییرات دانسیته در بخش‌های مختلف تنه چالش‌هایی را برای استفاده از آن به‌وجود آورده است. هدف از این پژوهش استفاده از فناوری‌های اصلاح چوب برای بهبود عملکرد چوب حاصل از تنهٔ نخل خرما است. هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی و بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی چوب نخل خرما (*Phoenix dactylifera*) از طریق اعمال یک تیمار دو مرحله‌ای شامل اشباع با رزین ملامین‌فرمالدهید (MF) و سپس فشرده‌سازی آن بود. این تحقیق به دنبال ارائه راهکاری مؤثر برای افزایش ارزش افزوده و کاربردی‌تر کردن این پسماند کشاورزی به عنوان یک ماده اولیه در صنایع چوبی است.

روش پژوهش: در این مطالعه، چوب پیرامونی تنهٔ نخل خرما از نخلستان‌های منطقه بهبهان جمع‌آوری و آماده‌سازی شد. نمونه‌ها به سه گروه اصلی تقسیم شدند: گروه شاهد (بدون تیمار)، گروهی که تنها با رزین ملامین‌فرمالدهید اشباع شدند، و گروهی که ابتدا با رزین ملامین‌فرمالدهید اشباع شدند و سپس با ضریب فشردگی ۱۵ درصد و ۳۰ درصد، فشرده شدند. پس از اعمال تیمارها، خواص کلیدی فیزیکی و مکانیکی از جمله مدول الاستیسیته خمشی، مدول گسیختگی، مقاومت فشاری موازی الیاف، سختی، جذب آب و ثبات ابعادی نمونه‌ها اندازه‌گیری و ثبت گردید. تصاویر میکروسکوپی به منظور تأیید نفوذ رزین و بررسی ساختار داخلی نمونه‌های تیمارشده تهیه شد. از آنالیز تجزیه واریانس یک‌طرفه برای تعیین اختلاف معنی‌داری بین میانگین تیمارها در سطح ۹۵ درصد استفاده شد و درصورت معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها، از آزمون چند دامنهٔ دانکن برای گروه‌بندی آنها استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که فناوری فشرده‌سازی به‌همراه اشباع با رزین ملامین‌فرم‌الدهید باعث بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چوب تنهٔ نخل خرما می شود. افزایش چشمگیر در دانسیته نمونه‌های تیمارشده افزایش قابل توجهی را نشان داد و مقاومت خمشی، مقاومت فشاری موازی الیاف و سختی نمونه‌هابه طور چشمگیری افزایش یافتند، به طوری که مقاومت فشاری بیش از ۱۰۰درصد و سختی تا بیش از سه برابر رشد کرد. همچنین، تیمار ترکیبی منجر به کاهش معنی‌دار در جذب آب و واکشیدگی ضخامت گردید که نشان‌دهنده بهبود قابل توجه آب‌گریزی و ثبات ابعاد چوب تنهٔ نخل خرما می باشد. هچنین نتایج نشان داد بازیابی شکل و بازگشت فنری نمونه‌ها بعد از فشردگی قابل توجه نیست و تصاویر میکروسکوپی نیز نفوذ رزین ملامین‌فرم‌الدهید در خلل و فرج نمونه‌ها را تایید کرده است.

نتیجه‌گیری: یافته‌های این تحقیق حاکی از آن است که فرآیند دو مرحله‌ای اشباع با رزین ملامین‌فرمالدهید و سپس فشرده‌سازی، یک روش کارآمد و مؤثر برای ارتقاء خواص فیزیکی و مکانیکی و افزایش ارزش افزوده چوب تنهٔ نخل خرما است و تنهٔ قطور و استوانه‌ای نخل خرما می‌تواند به‌عنوان یک جایگزین برای تنهٔ قطور درختان چوبی برای تولید الوار مطرح باشد.

استناد: مقصودی؛ مهدی، کاظمی نجفی؛ سعید، محبی؛ بهبود (۱۴۰۵). اثر فشرده‌سازی بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چوب نخل خرما اشباع شده با رزین ملامین‌فرم‌الدهید. *نشریهٔ جنگل و فرآورده‌های چوب*، ۷۹ (۱)، ۴۹-۳۵. DOI: https://10.22059/jfwp.2026.409289.1385

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
https://doi.org/10.22059/jfwp.2026.409289.1385

۱. مقدمه

نیاز روز افزون به چوب و فرآورده‌های چوبی از یک سو و افزایش جمعیت کشور، کمبود مادهٔ اولیهٔ چوبی (با توجه به محدودیت منابع تولید آن) را تبدیل به یک چالش اساسی به‌ویژه در ایران نموده است. استفاده از پسماندهای کشاورزی با توجه به تنوع، سطح زیرکشت، توزیع زمانی و مکانی در سطح کشور و حجم قابل دسترس آنها، می‌تواند برای کشور به‌عنوان یک راه حل مهم و مؤثر برای حل کمبود مادهٔ اولیهٔ چوبی باشد [۱].

زیست‌توده‌ها و پسماندهای کشاورزی با توجه به شکل قابل دسترس، غالباً برای تولید فرآورده‌های مرکب چوبی نظیر تخته‌خرده‌چوب و انواع تخته‌فیبر استفاده می‌شوند؛ اما از بین آنها، نخل به‌دلیل داشتن تنهٔ قطور، بلند و استوانه‌ای می‌تواند در تولید الوار و فرآورده‌های مشابه مورد استفاده قرار گیرد که با توجه به حجم قابل ملاحظهٔ دسترسی به تنهٔ نخل در کشور، این قابلیت می‌تواند بخش قابل توجهی از نیاز کشور به گرده‌بینه‌ها برای تولید الوار چوبی را مرتفع سازد.

گستردگی نخلستان‌های خرما در ایران بسیار زیاد است و از شرق کشور (استان خراسان جنوبی) تا جنوب و جنوب غربی (استان خوزستان) در دسترس هستند. مساحت نخلستان‌های ایران حدود ۲۱۸ هزار هکتار گزارش شده است و طبق گزارش فائو ۲۸ میلیون درخت خرما در این نخلستان‌ها وجود دارد [۲]. برخلاف آنچه در چوب درختان پهن‌برگ و سوزنی‌برگ مشاهده می‌شود، ساختار بافت نخل خرما به‌عنوان یک گیاه تک‌لپه‌ای کاملاً متفاوت است زیرا تنهٔ نخل از تجمع دمبرگ‌ها با ساختار آناتومی منحصربه فرد حاصل شده است. نخل خرما فاقد حلقهٔ کامبیوم و دوایر رویشی بوده و از دسته‌های آوندی در یک بافت پارانشیم تشکیل شده است [۳]. ویژگی‌های آناتومیکی و دانسیتهٔ چوب مناطق پیرامونی و مرکزی تنهٔ نخل با هم تفاوت دارند [۴] که می‌توانند روی فرآوری چوب حاصل از هر بخش به‌طور قابل ملاحظه‌ای تأثیرگذار باشند.

اگرچه دانسیتهٔ نسبتاً پایین چوب نخل، آن را برای برخی از کاربردها نظیر عایق‌های صوتی و حرارتی مناسب می‌سازد؛ اما خواص مکانیکی نسبتاً پایین، جذب آب بالا و مقاومت پایین در برابر میکروارگانیسم‌ها چالش‌های مهمی هستند که در استفاده از بافت لیگنوسلولزی نخل به‌عنوان فرآورده‌های الواری پیش روی مصرف‌کنندگان است. یکی از راهکارهای مؤثر برای بهبود ویژگی‌های مکانیکی و افزایش پایداری تنه‌های نخل، افزایش دانسیتهٔ آنها از طریق فشرده‌سازی می‌باشد. فشرده‌سازی باعث کاهش تخلخل چوب، افزایش دانسیته و بهبود مقاومت به سایش، مدول گسیختگی (MOR[1])، مدول الاستیسیته (MOE[2]) و قدرت نگهداری میخ و پیچ می‌شود [۴، ۵]. چالش اصلی روش فشرده‌سازی بازیابی شکل است که این پدیده به‌عنوان بازگشت فنری[3] یا اثر حافظهٔ شکل[4] شناخته می‌شود. به‌منظور کاهش بازگشت فنری در چوب‌های فشرده، استفاده از تیمار شیمیایی یا اشباع ساختار سلولی چوب توسط رزین‌هایی نظیر فنل‌فرم‌آلدهید، ملامین‌فرم‌آلدهید، رزین‌های طبیعی، واکس‌ها، وینیل‌های مایع و ترکیبات گوگردی مورد توجه قرار گرفته است که همزمان می‌توانند موجب افزایش چگالی، کاهش مکان‌های جذب آب و بهبود پایداری ابعادی چوب‌های فشرده شوند [۶]. استفاده از تیمار دو مرحله‌ای اشباع و فشرده‌سازی برای اصلاح چوب‌های سبک وزن و نیمه سنگین [۱۰-۷] و همچنین تنه‌های نخل به‌ویژه نخل روغنی [۱۴-۱۱] مورد توجه پژوهشگران قرار گرفت و از رزین‌ها و روش های مختلفی استفاده و درجات مختلفی از موفقیت نیز گزارش شد. در اغلب مطالعات از رزین‌های گرماسخت فنل‌فرمالدهید و ملامین‌فرمالدهید به‌عنوان مادهٔ اشباع‌کننده استفاده شده است. این رزین‌ها که در حین پرس گرم در زمان فشرده‌سازی به گیرایی کامل می‌رسند می‌توانند به‌طور تصادفی با هیدروکسیل‌های چوب واکنش دهند و سبب تقویت محصول تولید شوند [۱۵]. رزین ملامین فرم‌آلدهید به‌عنوان مادهٔ اشباع شونده به‌دلیل عملکرد مناسب، رنگ روشن، دما و زمان پرس کمتر و قیمت ارزان‌تر نسبت به رزین فنل‌فرم‌الدهید انتخاب بهتری به‌نظر می‌رسد. این رزین کاربردهای صنعتی گسترده‌ای دارد و دارای مزایای مختلفی همچون شفافیت و سختی زیاد، پایداری حرارتی و همچنین مقاومت در برابر خراش، سایش و رطوبت می‌باشد [۱۶]. از اشباع‌سازی با رزین ملامین‌فرمالدهید و سپس فشرده‌سازی، به‌طور موفقیت‌آمیزی برای بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چوب صنوبر [۸، ۱۰ و

[1] Modulus of Rupture
[2] Modulus of Elasticity
[3] Springback
[4] Shape memory

۱۵] و چوب بخش داخلی تنهٔ نخل خرما [۱۷] استفاده شده است. با توجه به مباحث مطرح شده، هدف اصلی پژوهش، بهبود ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی چوب پیرامونی تنهٔ نخل خرما به‌عنوان یک مادهٔ اولیهٔ جایگزین الوار چوبی و توسعهٔ کاربرد آن با استفادهٔ همزمان از روش اشباع‌سازی با رزین ملامین فرم‌الدهید و فشرده‌سازی است.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. مواد گیاهی و شیمیایی

چوب تنهٔ نخل خرما (*Phoenix dactylifera*) از نخلستان‌های شهرستان بهبهان(۵۰ درجه ۱۶ دقیقه ۲۵ ثانیهٔ شرقی؛ ۳۰ درجه ۳۷ دقیقه ۵۰ ثانیهٔ شمالی) تهیه شد. رزین ملامین‌فرم‌الدهید نیز از شرکت چسب‌ساز سامد مشهد تهیه شد که ویژگی‌های آن در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. ویژگی‌های رزین ملامین فرم‌الدهید مورد استفاده

مادهٔ شیمیایی	فرمول	گرانروی (ثانیه)	مواد جامد (درصد)	دانسیته (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	pH
ملامین فرم‌آلدهید	$C_4H_6N_6O$	۱۳	۵۵	۱/۲	۹/۵

۲-۲. تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها

برای خشک کردن چوب تنهٔ نخل، قطعات ابتدا ۳ روز در کورهٔ خلأ با دمای ۶۰ درجهٔ سانتی‌گراد و سپس یک هفته در دمای ۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد خشک شدند تا رطوبت آنها به کمتر از ۲۰ درصد برسد. پس از این مرحله، قطعات به ابعاد ۹۰ ×۳۵۰ میلی‌متر با ضخامت‌های ۲۹ و ۲۴ میلی‌متر (براساس میزان فشردگی نهایی ۲۰ میلی‌متر) برش داده شدند. لازم به ذکر است جهت یکنواختی دانسیتهٔ نمونه‌ها، نمونه‌گیری از ناحیهٔ نزدیک به پوست (ناحیهٔ پیرامونی تنه) انجام شد. سپس نیمی از نمونه‌ها در آون با دمای ۲±۱۰۳ درجهٔ سانتی گراد به‌مدت ۲۴ ساعت قرار گرفتند. نمونه‌های آزمونی جهت تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی مطابق استانداردهای مربوطه (جدول ۲) بعد از اشباع و فشرده‌سازی برش داده شدند.

جدول ۲. ابعاد نمونه‌های آزمونی مطابق استاندارد مربوطه

نوع آزمون	اندازه (ضخامت×پهنا× طول) (میلی‌متر)
آزمون سختی (ASTM-D1324)	۱۵۰×۵۰×۲۰
آزمون مقدار جذب آب و افزایش وزن (ISO4860 و ASTM-D4446-05)	۲۰×۲۰×۲۰
آزمون مقاومت خمشی (ISO 13061-4:2014)	۲۰×۲۰×۳۰۰
آزمون فشار موازی الیاف (ISO 13061-17: 2017)	۲۰×۲۰×۶۰
آزمون ضربه (ASTM D256)	۱۲×۲۰×۶۰
آزمون دانسیته (ASTM-D2395)	۲۰×۲۰×۲۰
آزمون چرخهٔ رطوبتی تر و خشک (ASTM-D 4446-05)	۲۰×۲۰×۲۰

۲-۳. اشباع با ملامین‌فرم‌الدهید

فرآیند اشباع‌سازی نمونه‌ها با رزین ملامین‌فرم‌آلدهید با درصد مادهٔ جامد ۵۵ در یک سیلندر اشباع آزمایشگاهی انجام شد. دلیل بالا بودن درصد مادهٔ جامد رزین به‌علت کاهش رطوبت نمونه‌ها در هنگام فشرده‌سازی بود. بدین‌منظور نمونه‌ها در داخل سیلندر قرار داده شدند و پس از بستن در سیلندر، ابتدا خلائی به اندازهٔ ۰/۸ بار و به‌مدت ۱۵ دقیقه اعمال شد و سپس شیر مخزن جهت ورود رزین به داخل سیلندر باز شد. در این مرحله، فشاری معادل ۳ بار و برای مدت ۵ دقیقه اعمال شد.

۲-۴. فشرده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌های بدون اشباع و نمونه‌های اشباع شده با ملامین‌فرم‌الدهید در دو سطح فشردگی ۱۵ و ۳۰ درصد، فشرده‌سازی شدند. فشرده‌سازی در دمای ۱۵۰ درجهٔ سانتی گراد و در مدت ۴۰ دقیقه اعمال شد. پس از اشباع نمونه‌ها، میزان جذب رزین (SU) با استفاده از رابطهٔ ۱ و مقدار افزایش وزن (WPG) نیز از طریق رابطهٔ ۲ محاسبه شد:

$$SU(\%) = \left(\frac{M_1 - M_2}{M_1}\right) \times ۱۰۰$$ (رابطهٔ ۱)

$$WPG(\%) = \left(\frac{W_2 - W_1}{W_1}\right) \times ۱۰۰$$ (رابطهٔ ۲)

SU: میزان جذب رزین (درصد)، M_2: وزن خیس نمونه بعد از اشباع (گرم)، M_1: وزن خشک نمونه قبل از اشباع (گرم)

WPG: افزایش وزن (درصد)، W_2: وزن خشک نمونه بعد از اصلاح (گرم)، W_1: وزن خشک نمونه قبل از اصلاح (گرم)

۲-۵. تعیین دمای مرکز نمونه‌ها حین فشرده‌سازی

دمای مرکز نمونه‌ها توسط دستگاه اندازه‌گیری دما Sunward Sun E ۹۹ تعیین شد. برای این هدف، سنسور ترموکوپل تیپK با قطر رزوه ۶ میلی‌متری و طول ۱۰ میلی‌متر در مرکز نمونه‌ها قرار داده شد و در حین پرس دمای مرکز نمونه‌ها ثبت شد.

۲-۶. سنجش ویژگی‌های فیزیکی

برای تعیین میزان فشردگی چوب تنهٔ نخل فشرده شده، ابتدا در راستای طول نمونه‌ها سه نقطه نشانه‌گذاری شد و سپس ضخامت نمونه در جهت فشرده‌سازی، قبل و بلافاصله پس از فشرده‌سازی با استفاده از کولیس با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد و درصد فشردگی آنها از طریق رابطهٔ ۳ محاسبه شد.

$$C = \frac{\left(T_0 - T_C\right)}{T_0} \times ۱۰۰$$ (رابطهٔ ۳)

C= فشردگی (درصد)، T_0 = ضخامت نمونه قبل از فشردگی(میلی‌متر) و T_C = ضخامت نمونه بعد از فشردگی (میلی‌متر)

برای تعیین میزان بازگشت فنری پس از فشرده‌سازی، ضخامت نمونه‌های فشرده شده در سه دورهٔ زمانی (بلافاصله پس از فشردن، ۲۴ ساعت و ۷ روز پس از فشرده‌سازی و متعادل‌سازی رطوبتی در در دمای ۲±۲۱ درجهٔ سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵±۶۵ درصد) و در سه نقطه از پیش تعیین‌شده در راستای طول نمونه و به کمک کولیس با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد تا میزان بازگشت فنری نمونه‌ها با گذشت زمان توسط رابطهٔ ۴ تعیین شود:

$$S = \frac{T_2 - T_1}{T_1} \times ۱۰۰$$ (رابطهٔ ۴)

S= میزان بازگشت فنری (درصد)، T_2= ضخامت پس از بازگشت فنری (میلی‌متر)، T_1= ضخامت پس از فشردگی (میلی‌متر)

۲-۷. تعیین گرادیان دانسیته

برای تعیین گرادیان دانسیته، نمونه‌هایی به ابعاد ۵×۵×۵ سانتی‌متر تهیه و به‌مدت یک هفته در شرایط آزمایشگاهی برای متعادل‌سازی قرار داده شدند. سپس از دستگاه Dense-Lab Mark[3] برای تعیین گرادیان دانسیته استفاده شد. دانسیتهٔ نمونه‌ها نیز براساس استاندارد ASTM-D2395 تعیین گردید.

۲-۸. جذب آب و واکشیدگی ضخامت

وزن ابعاد نمونه‌های فشرده‌شده و فشرده‌نشده قبل و بعد از ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب با دمای محیط اندازه‌گیری شدند. میزان جذب آب نمونه‌ها از طریق رابطهٔ ۵ و واکشیدگی حجمی با استفاده از رابطهٔ ۶ محاسبه شدند.

$$W_a(\%) = \left(\frac{W_2 - W_1}{W_1}\right) \times ۱۰۰$$ (رابطهٔ ۵)

$$S_V(\%) = \left(\frac{V_2 - V_1}{V_1}\right) \times ۱۰۰$$ (رابطهٔ ۶)

W_a: جذب آب (درصد)، W_2: وزن آب بعد از غوطه‌وری در آب (گرم) و W_1: وزن اولیه قبل از غوطه‌وری در آب (گرم)

S_v: واکشیدگی حجمی (درصد)، V_2: حجم چوب پس از غوطه‌وری در آب (سانتی‌متر مکعب) و V_1: حجم چوب قبل از غوطه‌وری در آب (سانتی‌متر مکعب)

۲-۹. ویژگی های مکانیکی

نمونه‌های مربوط به اندازه‌گیری ویژگی‌های مکانیکی ابتدا به‌مدت ۲ هفته در شرایط آزمایشگاه (دمای ۲±۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵±۶۵ درصد) مشروط‌سازی شدند. از دستگاه تست مکانیکی SANTAM-STM-20 (مدل DBBP و ظرفیت ۲۰۰۰ کیلوگرم) برای اندازه‌گیری ویژگی‌های مختلف استفاده شد. سرعت بارگذاری در آزمون‌های خمش و سختی ۴ میلی‌متر در دقیقه و در آزمون فشار موازی الیاف ۱/۵ میلی‌متر در دقیقه تنظیم شد. مقاومت به ضربه نیز با دستگاه SANTAM-SIT-D۲۰ (تهران، ایران) محاسبه شد.

۲-۱۰. تصویربرداری میکروسکوپی

برای بررسی شکل فشردگی و در هم رفتگی دیوارهٔ سلولی در مقطع عرضی نمونه‌ها و نفوذ رزین در آنها، با استفاده از تیغه مقاطعی از سطح نمونه‌ها برش داده شده و سپس توسط میکروسکوپ دیجیتال Dinolite تصویربرداری انجام شد.

۲-۱۱. تجزیه‌وتحلیل داده‌ها

با توجه به تیمارها و فرآیندهای اصلاحی انجام شده در مجموع ۵ تیمار مطابق جدول ۳ حاصل شد. تجزیه‌وتحلیل آماری نتایج در قالب طرح کاملاً تصادفی و با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد. از آنالیز تجزیه واریانس یک‌طرفه برای تعیین اختلاف معنی‌داری بین میانگین تیمارها در سطح ۹۵ درصد استفاده شد و درصورت معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها، از آزمون چند دامنهٔ دانکن برای گروه‌بندی آنها استفاده شد که با حروف لاتین در داخل نمودارها و جدول‌ها نمایش داده شده است.

جدول ۳. تیمار و کد تیمارها

کد تیمار	اشباع با ملامین‌فرمآلدهید	فشرده‌سازی (درصد)	
		۱۵	۳۰
شاهد	–	–	–
C15%	–	✓	–
C30%	–	–	✓
MF+C15%	✓	✓	–
MF+C30%	✓	–	✓

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

در جدول ۴ خلاصهٔ آنالیز واریانس داده‌های مربوط به ویژگی‌های اندازه‌گیری شده چوب تنهٔ نخل بعد از تیمارهای مختلف (فشرده‌سازی ۱۵درصد، فشرده‌سازی ۳۰ درصد، اشباع با ملامین‌فرم‌الدهید و فشرده‌سازی ۱۵درصد و اشباع با ملامین‌فرم‌الدهید و فشرده‌سازی ۳۰ درصد) نشان داده شده است.

۳-۱. درصد افزایش وزن و جذب رزین

میزان جذب رزین درنمونه‌های با ضخامت۲۳ میلی‌متر و ۲۹ میلی‌متر بلافاصله بعد از اشباع و قبل از فشرده‌سازی به‌ترتیب حدود ۶۸ و ۴۹ درصد اندازه‌گیری شد. پس از فشرده‌سازی در سطوح ۱۵ درصد و ۳۰ درصد، افزایش وزن نمونه‌ها به‌ترتیب حدود ۲۸ و ۱۹ درصد مشاهده شد. افزایش وزن کمتر نمونه‌ها با افزایش درصد فشرده‌سازی را می‌توان به خروج بیشتر رزین در هنگام

فشرده‌سازی (به‌علت پایین بودن ویسکوزیتهٔ رزین) از نمونه‌ها نسبت داد. در پژوهشی دیگر افزایش وزن نمونه‌های تهیه شده از سدر ژاپنی با ۲۵ درصد ملامین‌فرم‌آلدهید اشباع شده و فشرده شده را حدود ۶۰ درصد گزارش کردند [۷]. Ahmadi و همکاران (۲۰۲۶) نشان دادند که با افزایش غلظت رزین ملامین‌فرمالدهید، میزان جذب رزین در چوب بخش مرکزی تنهٔ نخل خرما افزایش می‌یابد و در غلظت ۲۵ درصد به حدود ۹۰ درصد می‌رسد. آنها همچنین گزارش کردند که با انجام فشرده‌سازی افزایش وزن کاهش یافته و در نمونه‌های اشباع شده با رزین ۲۵ درصد، این مقدار به حدود ۴۵ درصد رسیده است [۱۷].

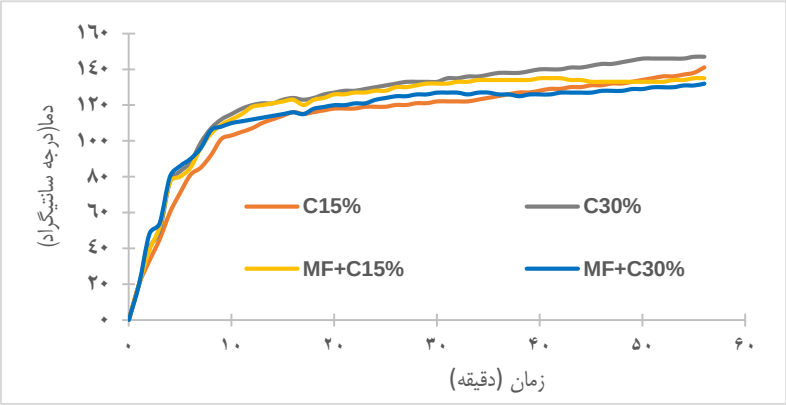
جدول ٤. خلاصهٔ آنالیز واریانس ویژگی‌های مورد بررسی

ویژگی	*P*	ویژگی	*P*
دانسیته	**۰/۰۰۰	مدول الاستیسیته	**۰/۰۰۱
بازگشت فنری بعد از ۲۴ ساعت	ns۰/۵۸۳	مدول گسیختگی	**۰/۰۰۰
بازگشت فنری بعد از ۱۶۸ ساعت	ns۰/۴۲۱	فشار موازی الیاف	**۰/۰۰۰
ضریب فشردگی بلافاصله بعد از فشردگی	**۰/۰۰۰	سختی	**۰/۰۰۰
ضریب فشردگی بعد از ۱۶۸ ساعت	**۰/۰۰۰	مقاومت به ضربه	**۰/۰۰۱
جذب آب بعد از ۲۴ ساعت	**۰/۰۰۰	واکشیدگی حجمی بعد از ۲۴ ساعت	**۰/۰۰۰

** معنی‌دار در سطح آماری بیش از ۹۹ درصد؛ ns: عدم معنی داری

۳–۲. دمای مرکز نمونه‌ها در حین پرس

شکل ۱ دمای مرکز نمونه‌ها را در هنگام پرس گرم نشان می‌دهد. برای تعیین مدت زمان پرس هنگام فشرده‌سازی، زمان مورد نیاز برای رسیدن دمای مرکز به ۱۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد مورد نیاز است. در اغلب نمونه‌ها بعد از گذشت زمان تقریبی ۸ دقیقه دمای مرکز نمونه‌ها به ۱۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد رسید. در ۱۵ درصد فشردگی بدون تیمار با ملامین فرم‌الدهید در زمان کمی طولانی‌تر (۹ دقیقه) به ۱۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد رسیده است. همچنین در نمونه‌های بدون اشباع با افزایش درصد فشرده‌سازی، انتقال دما تا حدودی با سرعت بیشتری صورت گرفته است و دمای بالاتری نیز ثبت شده است. در نمونه‌های اشباع شده و در درصدهای مختلف فشردگی روند افزایش دما تا حدود ۱۱۰ درجهٔ سانتی‌گراد شبیه هم هستند و بعد از آن منحنی افزایش دما از هم فاصله می‌گیرند؛ به‌طوری‌که در فشردگی بالاتر نمونه‌های تیمار شده با ملامین‌فرمالدهید دما کمی پایین‌تر است که دلیل احتمالی آن را می‌توان خروج بیشتر رزین و به‌تبع آن آب با افزایش درصد فشرده‌سازی و کاهش انتقال دما از طریق آب نسبت داد.



شکل ۱. اثر اشباع و فشرده‌سازی بر دمای مرکز نمونه‌ها در هنگام پرس

۳–۳. دانسیته

جدول ۵ اثر تیمارهای مختلف بر دانسیتهٔ خشک چوب تنهٔ نخل را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از تجزیه‌وتحلیل واریانس (جدول ۴) نشان داد که اثر تیمارهای مورد بررسی بر دانسیتهٔ چوب تنهٔ نخل معنی‌دار بوده است. مقایسهٔ تیمارها نشان می‌دهد، فشرده‌سازی

اثر قابل توجهی بر دانسیتهٔ چوب تنهٔ نخل دارد. همچنین افزایش دانسیتهٔ نمونه‌های اشباع شده و ۱۵درصد فشرده شده نسبت به نمونه‌های ۱۵درصد بدون اشباع و فشرده شده بیانگر نفوذ رزین ملامین‌فرم‌الدهید به تنهٔ نخل خرما می‌باشد. در مجموع با اشباع‌سازی چوب پیرامونی تنهٔ نخل خرما و فشرده‌سازی ۳۰ درصد، دانسیتهٔ آن حدود دو برابر افزایش یافت. براساس نتایج Lykidis و همکاران (۲۰۲۰) در اثر اشباع و فشرده‌سازی چوب صنوبر با ملامین‌فرم‌الدهید، دانسیتهٔ چوب شاهد از ۰/۵۹۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب به ۰/۹۷۱ گرم بر سانتی مترمکعب افزایش یافت. همچنین، درصد افزایش وزن نیز ۱۱/۱ درصد گزارش شد [۸]. در پژوهشی دیگری که روی چوب صنوبر انجام شد، نتایج نشان داد چوب صنوبر اشباع شده با رزین ملامین‌فرمآلدهید در غلظت ۷ و ۳۵ درصد به‌ترتیب ۱۰ و ۵۵ درصد افزایش وزن داشتند [۱۵]. Ahmadi و همکاران (۲۰۲۶) دانسیتهٔ چوب مرکزی تنهٔ نخل خرما را با اشباع‌سازی به‌وسیلهٔ رزین ملامین‌فرمالدهید با غلظت ۱۵ درصد و فشرده‌سازی حدود ۴ برابر افزایش دادند [۱۷].

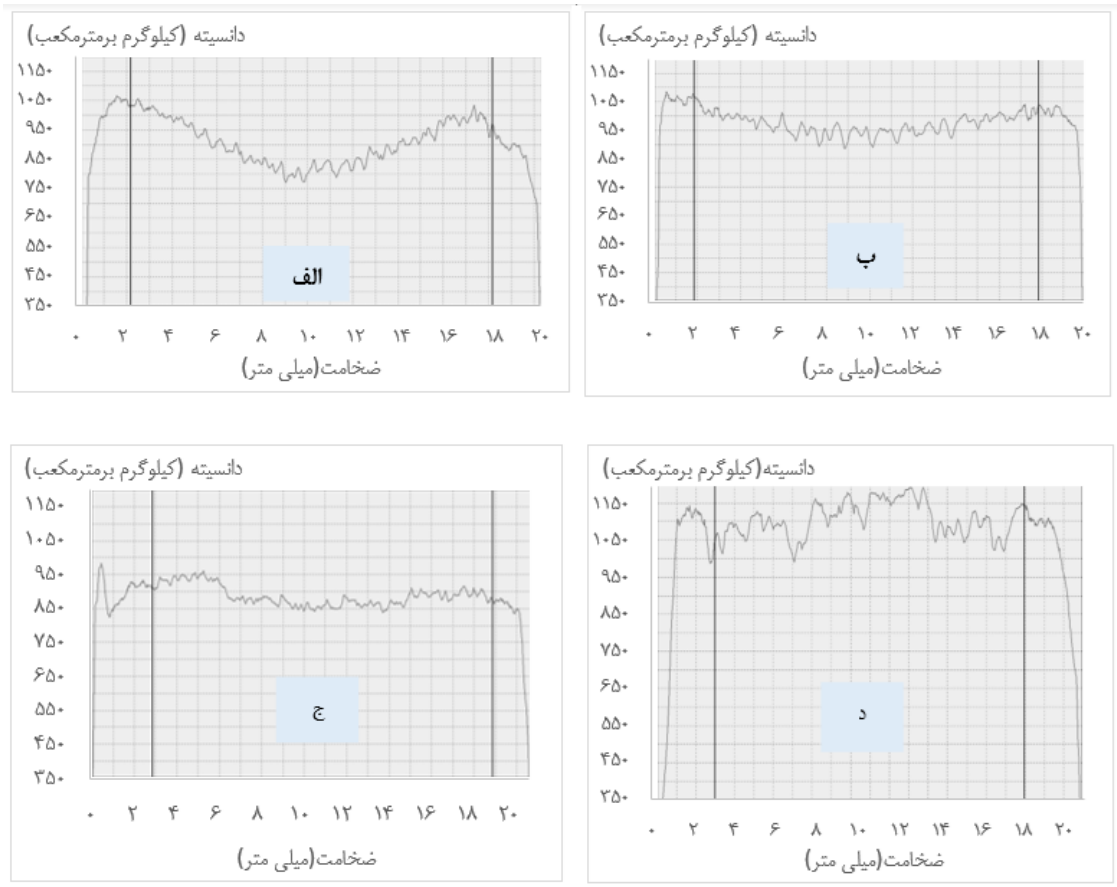
جدول ۵. میانگین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سطوح مختلف اشباع و فشرده‌سازی ۱۵ و ۳۰ درصد

تیمارها	شاهد	C15%	C30%	MF+C15%	MF+C30%
دانسیته خشک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۰/۵۰ (۰/۰۲)^{d}	۰/۷۶ (۰/۰۵)^{c}	۰/۹۰ (۰/۰۲)^{b}	۰/۹۲ (۰/۰۵)^{b}	۱/۰۱ (۰/۰۲)^{a}
مدول الاستیسیته (نیوتن بر میلی‌متر مربع)	۲۸۸۲/۳۳ (۳۸۸/۳۴)^{c}	۳۵۸۴/۹۰ (۷۵/۳۵)^{bc}	۳۸۶۱/۳۳ (۶۶۳/۴۰)^{bc}	۴۲۷۷/۶۶ (۵۶۱/۵۹)^{b}	۵۹۲۲/۲۰ (۸۷۱/۷۸)^{a}
مدول گسیختگی (نیوتن بر میلی‌متر مربع)	۳۰/۱۳ (۳/۵۰)^{d}	۳۵/۹۳ (۱/۸۰)^{b}	۴۱/۹۴ (۰/۴۴)^{c}	۳۸/۳۵ (۱/۳۴)^{b}	۴۸/۹۸ (۰/۵۸)^{a}
مقاومت فشار موازی الیاف (نیوتن بر میلی‌متر مربع)	۱۲/۷۳ (۲/۴۳)^{c}	۲۱/۸۷ (۱/۶۵)^{b}	۲۵/۱۳ (۱/۳۴)^{b}	۲۹/۸۵ (۱/۲۴)^{a}	۳۴/۰۹ (۴/۸۰)^{a}
سختی (نیوتن)	۱۷/۹۵ (۲/۶۸)^{c}	۳۷/۰۴ (۴/۱۱)^{b}	۴۲/۱۱ (۴/۶۱)^{b}	۴۵/۰۰ (۶/۳۵)^{b}	۵۲/۵۲ (۹/۸۶)^{a}
مقاومت به ضربه (ژول بر متر مربع)	۱۲۶/۹ (۳۴/۷)^{a}	۷۲/۷ (۱۱/۱)^{abc}	۱۰۰/۱ (۸/۸^{ab}	۴۰/۹ (۵/۱)^{c}	۵۳/۶ (۱۵/۳)^{c}
جذب آب بعد از ۲۴ ساعت (درصد)	۲۱۷/۳۷ (۱۰/۱۷)^{d}	۱۴۳/۳۶ (۲۴/۷۹)^{c}	۵۸/۱۱ (۸/۹۹)^{b}	۴۱/۶۹ (۴/۸۸)^{a}	۴۲/۱۴ (۳/۱۰)^{a}
واکشسدگی حجمی بعد از ۲۴ ساعت (درصد)	۷۱/۸۰ (۹/۰۲)^{c}	۸۹/۶۷ (۱۱/۹۵)^{b}	۴۵/۵۴ (۴۵/۱۳)^{a}	۲۴/۷۰ (۲/۱۵)^{a}	۲۸/۳۷ (۵/۱۶)^{a}

حروف لاتین گروه‌بندی آزمون دانکن را نشان می‌دهند. اعداد داخل پرانتز انحراف معیار هستند.

۳-۴. گرادیان دانسیته

گرادیان دانسیتهٔ نمونه‌های فشرده‌شده درشکل ۲ نشان داده شده است. همچنین مقادیر دانسیتهٔ میانگین، دانسیتهٔ حداکثر و حداقل هر یک از نمونه‌ها در جدول ۶ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نمونه‌های اشباع نشده گرادیان دانسیته شکل یکنواختی دارد به‌طوری که لایه‌های سطحی دانسیته بیشتر نسبت به لایه‌های مرکزی دارند که بیانگر فشردگی بیشتر در لایه‌های سطحی نمونه است. عمق گرادیان دانسیته با افزایش ضریب فشردگی کاهش یافته است. در نمونه‌های اشباع شده شکل یکنواخت گرادیان دانسیته مشاهده نمی‌شود که علت آن را می‌توان به نفوذ رزین ملامین‌فرمالدهید به منافذ قسمت‌های مرکزی نمونه‌ها نسبت داد. براساس مطالعات Lykidis و همکاران (۲۰۲۰) که بر روی فشرده‌سازی چوب صنوبر اشباع شده با رزین ملامین‌فرمالدهید انجام شد، در فشار ۲۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب پرس، نمونه‌های اشباع‌شده با آب حداقل و حداکثر دانسیتهٔ ۸۵۲ تا ۱۰۰۰ کیلوگرم داشتند در حالی‌که در نمونه‌های اشباع‌شده با ملامین‌فرم‌الدهید حداقل و حداکثر دانسیته برابر با ۸۸۵ تا ۹۵۱ کیلوگرم بر سانتی مترمکعب بود [۸].



شکل ۲. گرادیان دانسیتهٔ نمونه‌ها بعد از فشردگی الف) اشباع نشده با ضریب فشردگی ۱۵درصد، ب) اشباع نشده با ضریب فشردگی ۳۰ درصد، ج) اشباع شده با رزین با ضریب فشردگی ۱۵ درصد و د) اشباع شده با رزین با ضریب فشردگی۳۰ درصد

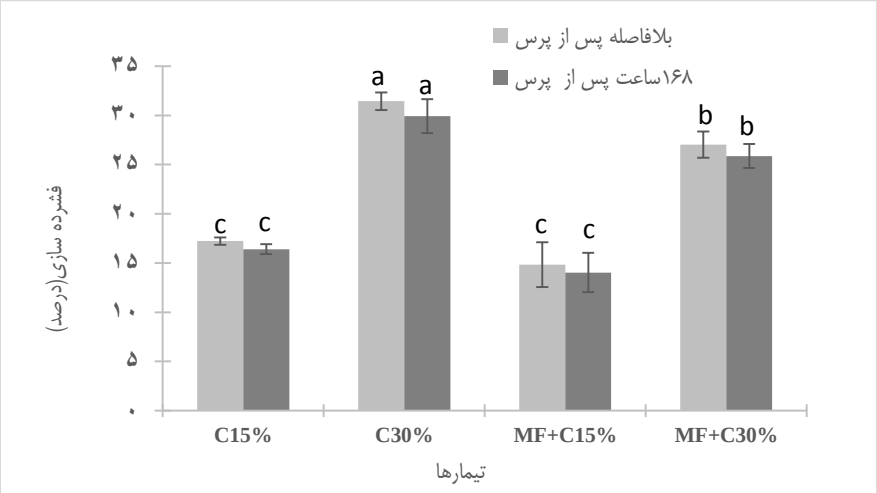
جدول ٦. خلاصهٔ گرادیان دانسیتهٔ نمونه‌های مورد بررسی

اشباع با رزین	ضریب فشردگی (درصد)	دانسیته (گرم بر سانتی‌متر مکعب)		
		حداقل	حداکثر	متوسط
اشباع نشده	۱۵	۰/۷۷۶	۱/۰۷۳	۰/۹۰۶
	۳۰	۰/۹۱۴۵	۱/۰۸۳	۰/۹۸۸
اشباع شده	۱۵	۰/۸۲۷۵	۱/۰۴۵۵	۰/۹۳۶
	۳۰	۰/۹۳۹	۱/۱۴۵	۱/۰۵۰

۳-۵. ضریب فشردگی

شکل ۳ ضریب فشردگی اندازه‌گیری شدهٔ نمونه‌ها را بلافاصله و بعد از ۱۶۸ ساعت از فرآیند پرس نشان می‌دهد. با دقت در نمودار مشاهده می‌شود که پس از گذشت ۱۶۸ ساعت متعادل‌سازی در شرایط آزمایشگاه میزان فشردگی تغییرات قابل ملاحظه‌ای را نشان نداد. این نکته نشان می‌دهد که در تنهٔ نخل فشرده شده؛ همچنان فشردگی همانند روز نخست حفظ شده است. براساس داده‌ها اختلاف معنی‌داری در ضریب فشردگی نمونه‌های ۱۵ درصد فشرده شده بدون اشباع و اشباع شده در بازهٔ زمانی ۱۶۸ ساعت بعد از پرس و بلافاصله بعد از پرس وجود ندارد اما بین نمونه‌های فشرده شده ۳۰ درصد بدون اشباع و اشباع شده تفاوت معنی‌داری وجود دارد به‌طوری‌که با اشباع و فشرده‌سازی، ضریب فشردگی بلافاصله و ۱۶۸ ساعت بعد از پرس نمونه‌های اشباع‌شده نسبت به نمونه‌های بدون اشباع کاهش یافت. علت را می‌توان به رزین ملامین‌فرم‌آلدهید نسبت داد زیرا هنگامی که رزین در منافذ سلول

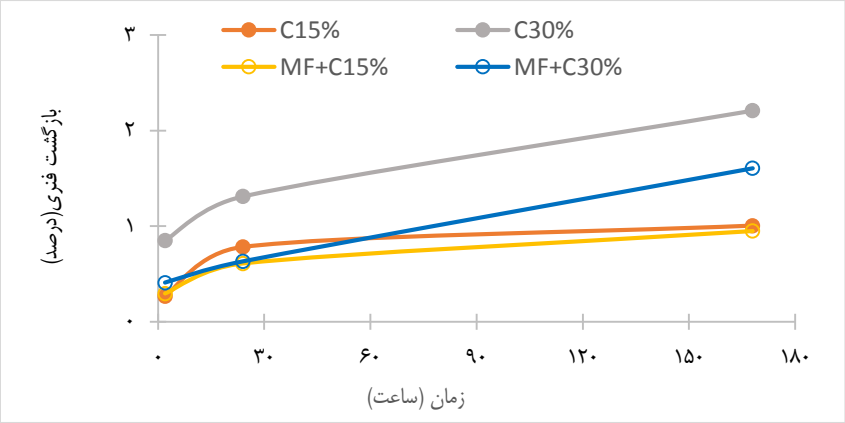
چوبی پلیمر می‌شود، فضای آزاد بین حفرات را پر می‌کند و باعث بازیابی شکل می‌شود [۱۸].



شکل ۳. ضریب فشردگی بلافاصله و ۱۶۸ ساعت پس از فرآیند پرس

۳-۶. بازگشت فنری

میزان بازگشت فنری بلافاصله، ۲۴ و ۱۶۸ ساعت پس از برداشتن نمونه‌ها از پرس در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بازگشت فنری نمونه‌ها در فشردگی ۱۵درصد، کمتر از ۱درصد است، با افزایش درصد فشردگی به ۳۰ درصد، بازگشت فنری تا حد ۲ درصد افزایش یافته است و افزودن ملامین فرم‌الدهید توانسته است بخشی از این افزایش را کاهش دهد. نتایج حاصل از تجزیه واریانس (جدول۴) نشان می‌دهد که اختلاف معنی‌داری بین بازگشت فنری ۲۴و ۱۶۸ ساعت بعد از فرآیند پرس در حالت اشباع و بدون اشباع وجود ندارد. پایین بودن بازگشت فنری در تنهٔ نخل خرما به ساختار ناهمگن، ترکیبات شیمیایی و تغییرات رطوبتی مرتبط است. بافت پارانشیمی آن پس از فشرده‌سازی بازیابی نمی‌شود و درصد بالای لیگنین و همی‌سلولز کم، خاصیت ارتجاعی را کاهش می‌دهد [۴]. همچنین، خروج آب و قفل‌شدن دستجات آوندی از بازگشت فنری جلوگیری می‌کند [۱۹]. در پژوهشی دیگر با فشرده‌سازی ۷۰ درصدی بخش داخلی تنهٔ نخل روغنی، تنها ۲/۴۱ درصد بازگشت ضخامت مشاهده شد [۲۰]. این درحالی است که Ahmadi و همکاران (۲۰۲۶) بازگشت فنری قابل توجهی (۵۶ درصد) را برای چوب بخش مرکزی تنهٔ نخل خرما گزارش نمودند. آنها توانستند با استفاده از اشباع سازی چوب بخش مرکزی تنهٔ نخل خرما با رزین ملامین فرمالدهید، بازگشت فنری را تا حدود ۱۲درصدکاهش دهند [۱۷].



شکل ٤. میزان بازگشت فنری بلافاصله و بعد از ۲۴ و ۱۶۸ساعت پس از فرآیند پرس

۳-۷. بررسی ویژگی‌های مکانیکی فیزیکی

۳-۷-۱. ویژگی‌های خمشی

اثر اشباع‌سازی و فشردگی بر مدول خمشی و مدول گسیختگی چوب تنهٔ نخل درجدول ۵ نشان داده شده است. براساس نتایج، فشردگی (به‌تنهایی) هر چند باعث افزایش مدول الاستیسیته شده است؛ اما این افزایش معنی‌دار نبوده است و استفادهٔ همزمان اشباع با رزین ملامین فرم‌الدهید و فشرده‌سازی باعث افزایش معنی‌دار مدول الاستیسیته شده است. به‌طور کلی مدول الاستیسیته یک چند سازهٔ متأثر از مدول الاستیسیته اجزای تشکیل‌دهندهٔ آن است و چون مدول الاستیستهٔ رزین ملامین‌فرم‌آلدهید پلیمر شده بیشتر از چوب تنهٔ نخل است، موجب افزایش مدول الاستیسیته نمونه‌ها شده است [۲۱]. جدول ۵ همچنین نشان می‌دهد که اثر فشرده‌سازی با و بدون اشباع‌سازی با رزین ملامین فرم‌الدهید بر مدول گسیختگی چوب پیرامونی تنهٔ نخل معنی‌دار بوده است و همانند مدول الاستیسیته، بیشترین مدول گسیختگی برای چوب‌های اشباع‌شده با رزین ملامین‌فرم‌الدهید و فشرده‌سازی ۳۰ درصد مشاهده شد. Ahmadi و همکاران (۲۰۲۶) نیز نتایج مشابهی را برای مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی چوب بخش مرکزی تنهٔ نخل خرما گزارش کردند به‌طوری‌که نمونه‌های فشرده شده و اشباع شده با رزین ملامین‌فرم‌الدهید با غلظت ۱۵ درصد بیشترین مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی را داشتند [۱۷]. نتایج پژوهش Ahmadi و همکاران (۲۰۱۹) بر چوب صنوبر نیز نشان داد که اصلاح چوب با رزین ملامین‌فرم‌الدهید سبب افزایش معنی‌دار مقادیر مدول الاستیسیتهٔ خمشی و مدول گسیختگی می‌شود [۱۰]. در مطالعه‌ای Epmeier و همکاران (۲۰۰۳) تقریباً ۱۰ درصد افزایش در مدول گسیختگی با اصلاح رزین ملامین‌فرم‌الدهید گزارش شد [۲۲]. در این میان، دانسیتهٔ چوب نیز یکی از مهم‌ترین عوامل اثرگذار بر ویژگی‌های خمشی چوب است. افزایش دانسیتهٔ چوب از طریق فشرده‌سازی باعث بهبود مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته می‌شود. چوب‌هایی با دانسیتهٔ بالاتر معمولاً مدول گسیختگی بیشتری دارند.

۳-۷-۲. مقاومت فشار موازی الیاف

اثر فشرده‌سازی با و بدون اشباع با رزین ملامین‌فرم‌الدهید بر مقاومت فشار موازی الیاف چوب تنهٔ نخل در جدول ۵ ارائه شده است. در واقع با استفاده از فناوری فشرده‌سازی مقاومت فشار موازی الیاف چوب تنهٔ نخل خرما به‌طور قابل ملاحظه‌ای (بیش از ۱۰۰ درصد) افزایش یافته است. اثر اشباع با رزین ملامین‌فرم‌الدهید سبب افزایش تأثیرگذاری بر مقاومت فشار موازی الیاف شده است. در مطالعه‌ای دیگر که اثر فشرده‌سازی بر خواص فیزیکی و مکانیکی قسمت داخلی تنهٔ روغن نخل اشباع‌شده با متیلن دی فنیل دی ایزوسیانات بررسی شده است، نتایج مشابهی گزارش شد [۱۳]. اشباع بافت تنهٔ نخل روغنی با رزین فنل‌فرم‌الدهید سبب بهبود مقاومت فشار موازی الیاف می‌شود. دلیل افزایش مقاومت فشار موازی الیاف را می‌توان به افزایش دانسیته نسبت داد [۲۳].

۳-۷-۳. سختی

اثر تیمارهای مختلف بر سختی چوب تنهٔ نخل خرما در جدول ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهد می‌شود، فشرده‌سازی سبب افزایش معنی‌دار سختی نمونه‌ها شده است و بیشترین مقدار سختی در نمونه‌های اشباع‌شده با رزین ملامین‌فرم‌الدهید و فشرده‌سازی ۳۰ درصد مشاهده می‌شود که از نظر مقداری بیش از سه برابر سختی نمونه‌های تیمار نشده (شاهد) می‌باشد. یکی از دلایل افزایش سختی نمونه‌های اصلاح‌شده افزایش دانسیتهٔ نمونه‌ها به‌ویژه در لایهٔ سطحی می‌باشد که با نتایج حاصل از گرادیان دانسیته مطابقت دارد. سختی یک ویژگی مکانیکی است که برای ارزیابی مناسب بودن گونه‌های چوبی به‌عنوان مصالح کف ساختمان‌ها استفاده می‌شود. نتایج مطالعات پیشین نیز نشان می‌دهد که با افزایش دانسیته، سختی سطح چوب اصلاح شده بهبود می‌یابد [۱۳].

۳-۷-۴. مقاومت به ضربه

اثر فشرده‌سازی با و بدون اشباع با رزین ملامین‌فرم‌الدهید بر مقاومت به ضربهٔ چوب تنهٔ نخل در جدول ۵ نشان داده شده است. براساس نتایج، فشردگی (به‌تنهایی) باعث تغییر معنی‌دار مقاومت به ضربه نشده است اما استفادهٔ همزمان اشباع با رزین ملامین‌فرم‌الدهید و فشرده‌سازی باعث کاهش معنی‌دار مقاومت به ضربه شده است به‌طوری که یک کاهش حدود ۵۰ درصدی

مشاهده می‌شود. تغییرات مقاومت به ضربه منطبق بر تغییرات مدول الاستیسیته است به‌طوری که با افزایش مدول الاستیسیته (سفتی) چوب تنهٔ نخل، مقاومت به ضربه کاهش یافته است [۲۳]. سایر پژوهش‌های انجام شده مانند Epmeier و همکاران (۲۰۰۴) کاهش مقاومت به ضربهٔ نمونه‌های اشباع شده با ملامین‌فرم‌آلدهید را گزارش کردند [۲۲]. Ahmadi و همکاران (۲۰۲۶) نتایج متفاوتی را برای چوب بخش مرکزی تنهٔ نخل خرما گزارش کردند به‌طوری‌که با اشباع‌سازی به‌وسیلهٔ رزین ملامین‌فرم‌الدهید و فشرده‌سازی مقاومت به ضربه افزایش یافت [۱۷].

۳-۸. اثر اصلاح بر جذب آب

اثر فشرده‌سازی و اشباع با رزین ملامین‌فرم‌الدهید بر جذب آب در جدول ۵ نشان داده شده است. بیشترین میزان جذب آب ۲۴ ساعت مربوط به نمونه‌های شاهد است، زیرا نمونه‌های فشرده نشده نسبت به نمونه‌های فشرده شده دارای خلل و فرج بیشتری هستند که با فشردگی کاهش می‌یابد. بنابراین همین نقش در چوب‌های فشرده شده نیز به‌خوبی نمایان است. نمونه‌های بدون اشباع با درصد فشردگی کمتر (۱۵درصد)، به‌دلیل فشرده‌شدن بخش‌های کمتری از ضخامت چوب، میزان جذب آب بیشتری را در مقایسه با نمونه‌های فشرده‌شده با درصد فشرده‌سازی ۳۰ درصد نشان دادند. نمونه‌های اشباع شده و فشرده شده نیز جذب آب کمتری را داشتند اما اختلاف زیادی در درصدهای مختلف فشردگی مشاهده نشد. بر اثر تیمار اشباع با ملامین‌فرم‌آلدهید، رزین خلل و فرج و منافذ سلولی و بین سلولی را که محل جذب آب است، پر می‌کند. همچنین، میزان هیدروکسیل قابل دسترس تنهٔ نخل کاهش می‌یابد. با تشکیل احتمالی پیوندهای کووالانسی رزین ملامین‌فرم‌الدهید با گروه‌های هیدروکسیل، دیگر این گروه‌ها به‌راحتی در دسترس مولکول‌های آب قرار نمی‌گیرند در نتیجه در شکل‌گیری پیوند هیدروژنی، مولکول‌های آب پیرامونی کمتر می‌شود. بنابراین، جذب آب و واکشیدگی ناشی از آن کاهش قابل توجهی می‌یابد [۸]. Ahmadi و همکاران (۲۰۲۶) نیر نشان دادند که با اشباع‌سازی چوب بخش مرکزی تنهٔ نخل خرما به‌وسیلهٔ رزین ملامین‌فرم‌الدهید و فشرده‌سازی جذب آب آن به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می یابد [۱۷].

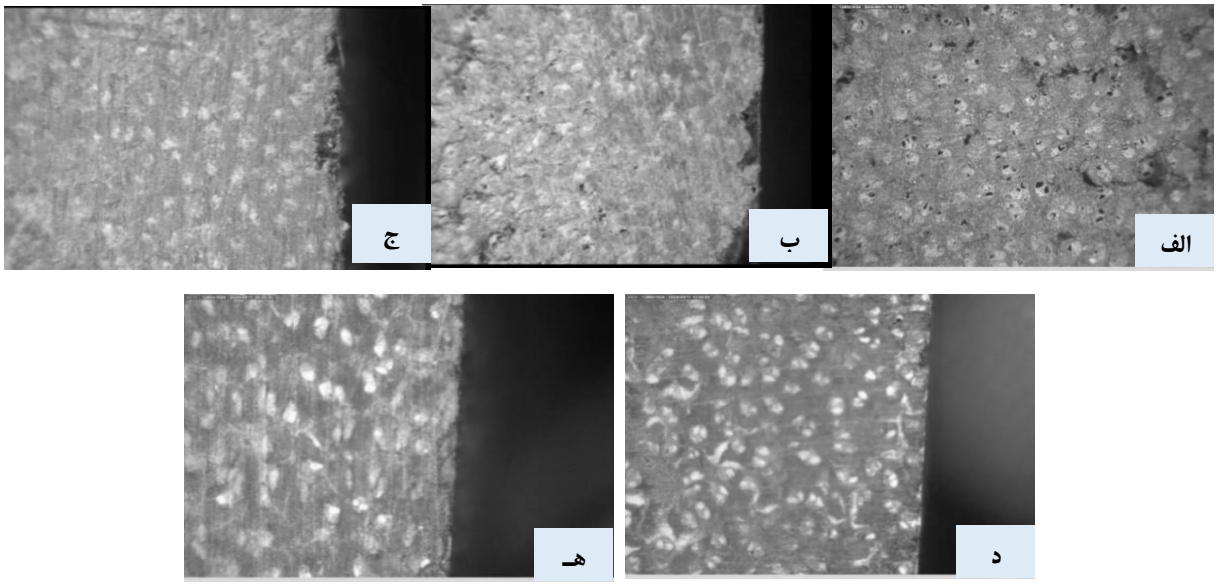
۳-۹. واکشیدگی حجمی

جدول ۵ واکشیدگی حجمی نمونه‌های فشرده‌شده تنهٔ نخل را بعد از ۲۴ ساعت نشان می‌دهد. در نمونه‌های اشباع نشده، واکشیدگی حجمی ابتدا با اعمال ضریب فشردگی ۱۵ درصد افزایش می‌یابد و با افزایش ضریب فشردگی به‌میزان قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند. نمونه‌های اشباع و فشرده‌شده واکشیدگی حجمی کمتری را نشان دادند که کمترین واکشیدگی حجمی در نمونه‌های اشباع شده با فشردگی ۱۵ درصد مشاهده می‌شود. در فشردگی ۳۰ درصد بخش بیشتری از رزین به‌دلیل فشار بالا از نمونه‌ها خارج می‌شود و به‌همین دلیل نمونهٔ اشباع‌شده با رزین در ضریب فشردگی ۳۰ درصد واکشیدگی حجمی بیشتری داشت. رزین ملامین‌فرم‌الدهید، با مسدود نمودن گروه‌های آبدوست چوب از طریق پیوند با سر قطبی، یک اثر اصلاحی و ضد واکشیدگی به‌وجود می‌آورد. اساساً اشباع با ملامین‌فرم‌الدهید سبب افزایش آب‌گریزی و ثبات ابعاد چوب می‌گردد [۲۳]. کاهش قابل ملاحظه‌ای برای واکشیدگی حجمی چوب بخش مرکزی تنهٔ نخل خرما اشباع شده به‌وسیله رزین ملامین‌فرم‌الدهید و فشرده‌سازی شده به‌وسیلهٔ Ahmadi و همکاران (۲۰۲۶) گزارش شد [۱۷].

۳-۱۰. بررسی میکروسکوپی

شکل ۵ الف تصویر مقطع عرضی چوب تنهٔ نخل خرما (فشرده‌سازی نشده) را نشان می‌دهد. در این تصویر فضاهای خالی به‌ویژه حفرات آوندی به‌وضوح قابل مشاهده است. شکل‌های ۵ الف و ب، به‌ترتیب تصایر مقاطع عرضی نمونه‌های بدون اشباع و فشرده‌شدهٔ تنهٔ نخل ضریب فشردگی ۱۵ و ۳۰ درصد را نشان می‌دهند. در فشرده‌سازی ۱۵ درصد تراکم بالای لایه‌های سطحی مشاهده می‌شود و خلل و فرج در این لایه تقریباً به‌طور کامل ناپدید شده‌اند ولی در لایه‌های درونی خلل و فرج کماکان مشاهده می‌شوند هرچند مقدار آنها کاهش یافته است. در فشرده‌سازی ۳۰ درصد خلل و فرج هم در لایهٔ سطحی و هم لایه‌های داخلی محدود شده‌اند که بیانگر تراکم سلولی بالاتر می‌باشد. تصاویر سطح مقطع نمونه‌های اشباع‌شده با رزین ملامین فرم‌الدهید و فشرده‌سازی شده در شکل‌های ۵

ج و د ارائه شده است. پر شدن کامل حفرات سلولی توسط رزین ملامین‌فرم‌الدهید در هر دو سطح فشردگی ۱۵ و ۳۰ درصد قابل مشاهده است که بیانگر این است رزین به‌خوبی در بافت چوب تنهٔ نخل خرما نفوذ کرده است. با مقایسهٔ دو شکل مشاهده می‌شود که رزین کمتری در بافت نمونه‌های با فشردگی ۳۰ درصد وجود دارد که می‌تواند ناشی از خروج رزین در اثر فشردگی بیشتر باشد.



شکل ۵. نمای مقطع عرضی تنهٔ نخل خرما (بزرگنمایی تصاویر ۶۳X)

الف- نمای مقطع عرضی تنهٔ نخل خرما فشرده نشده، ب- تصویر مقطع عرضی تنهٔ نخل خرما با فشردگی ۱۵ درصد،
ج- تصویر مقطع عرضی تنهٔ نخل خرما با فشردگی۳۰ درصد، د- تصویر مقطع عرضی تنهٔ نخل خرما اشباع‌شده با رزین ملامین فرم‌الدهید و فشردگی ۱۵ درصد و
هـ- تصویر مقطع عرضی تنهٔ نخل خرما اشباع‌شده با رزین ملامین فرم‌الدهید و فشردگی ۳۰ درصد

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر فشرده‌سازی چوب پیرامونی تنهٔ نخل خرما اشباع‌شده با ملامین‌فرمالدهید بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی بررسی شد. نتایج نشان داد که این فرآیند با افزایش دانسیته، بهبود خواص مکانیکی، کاهش جذب آب و افزایش ثبات ابعادی همراه است، به‌طوری‌که بیشترین بهبود در نمونه‌های اشباع‌شده با فشردگی ۳۰ درصد مشاهده شد. اگرچه با افزایش درصد فشردگی، بازگشت فنری افزایش یافت، اما اشباع با ملامین‌فرمالدهید این اثر را تا حدی کنترل کرد. فشرده‌سازی به‌تنهایی تأثیر محدودی بر مدول الاستیسیته داشت، در حالی‌که در نمونه‌های اشباع‌شده، مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی به‌طور معنی‌داری افزایش یافتند. همچنین، مقاومت فشار موازی الیاف بیش از ۱۰۰ درصد و سختی نمونه‌های اشباع‌شده و فشرده‌شده تا بیش از سه برابر نمونهٔ شاهد افزایش یافت، در حالی‌که مقاومت به ضربه روند کاهشی نشان داد. مشاهدات میکروسکوپی نیز تراکم سلولی و نفوذ مناسب رزین را تأیید کرد. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که تیمار دو مرحله‌ای اشباع و فشرده‌سازی روشی کارآمد برای بهبود عملکرد و افزایش ارزش افزوده چوب تنهٔ نخل خرما است و تنهٔ قطور و استوانه‌ای نخل خرما می‌تواند به‌عنوان یک جایگزین برای تنهٔ قطور درختان چوبی برای تولید الوار مطرح باشد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه تربیت مدرس، دانشکدهٔ منابع طبیعی در قالب پژوهانهٔ پایان‌نامه دانشجویی نویسنده اول و همچنین پژوهانهٔ برای سایر نویسندگان انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: دانشجو: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیهٔ پیشنویس مقاله؛ نویسنده دوم: استاد راهنمای پایان‌نامه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله؛ نویسنده سوم: استاد مشاور پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

References

[1] Shalbafan, A., Jafarnezhad, S. & Luedtke, J. (2018). Evaluation of low-density hybrid panels using expandable granules: effect of granules diameter and content. *European Journal of Wood and Wood Products*, 76(5), 1505-1514.

[2] Goleman, H. (2019). Investigation of the possibility of designing and manufacturing standard table and chair using palm trunk. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 10(4), 575-587. (In Persian)

[3] Hegazy, S., Ahmed, K. & Hiziroglu, S. (2015). Oriented strand board production from water-treated date palm fronds. *BioResources*, 10(1), 448-456.

[4] Mohebby, B., Sharifnia-Dizboni, H. & Kazemi-Najafi, S. (2009, April). Combined hydro-thermo-mechanical modification (CHTM) as an innovation in mechanical wood modification. In: Proceedings of the 4th European Conference on Wood Modification (ECWM4), Stockholm, Sweden, pp. 353-360.

[5] Mehmandoost, M. & Khazaian, A. (2014). The effect of chemical treatment and compression percent on mechanical properties of Paulownia compressed wood. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 5(2), 59-70. (In Persian)

[6] Altgen, M., Altgen, D., Klüppel, A. & Rautkari, L. (2020). Effect of curing conditions on the water vapor sorption behavior of melamine formaldehyde resin and resin-modified wood. *Journal of Materials Science*, 55(25), 11253-11266.

[7] Inoue, M., Ogata, S., Kawai, S., Rowell, R.M. and Norimoto, M., 1993. Fixation of compressed wood using melamine-formaldehyde resin. *Wood and Fiber Science*, 25(4), 404-410.

[8] Lykidis, C., Moya, R. & Tenorio, C., 2020. The effect of melamine formaldehyde impregnation and hot-pressing parameters on the density profile of densified poplar wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 78(3), 433-440.

[9] Schwarzkopf, M. (2021). Densified wood impregnated with phenol resin for reduced set-recovery. *Wood Material Science & Engineering*, 16(1), 35-41.

[10] Ahmadi, P., Afhami Sisi, D., Pourtahmasebi, K. & Izadiar, S. (2019). Physical and mechanical properties of poplar wood impregnated with melamine–formaldehyde resin. *Journal of Forest and Wood Products*, 72(3), 261. (In Persian)

[11] Ahamad, W.N., Salim, S., Lee, S.H., Abdul Ghani, M.A., Mohd Ali, R.A., Md Tahir, P., Fatriasari, W., Antov, P. & Lubis, M.A.R., 2023. Effects of compression ratio and phenolic resin concentration on the properties of laminated compreg inner oil palm and sesenduk wood composites. *Forests*, 14(1), 83.

[12] Hartono, R., Hidayat, W., Wahyudi, I., Febrianto, F., Dwianto, W., Jang, J. & Kim, N. (2016). Effect of phenol formaldehyde impregnation on the physical and mechanical properties of soft-inner part of oil palm trunk. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 44(6), 842-851.

[13] Mangurai, S.U.N.M., Hermawan, D., Hadi, Y.S., Sulastiningsih, I.M., Basri, E., Abdillah, I.B., Maulana, M.I., Purusatama, B.D., Park, S.Y., Lee, S.H., & Febrianto, F. (2022). Effect of densification on the physical and mechanical properties of the inner part of oil palm trunk impregnated with methylene diphenyl diisocyanate. *Scientific Reports*, 12(1), 15350

[14] Sharma, S.K., & Kelkar, B.U., (2021). Effect of densification on certain physical and mechanical properties of inner soft wood of *Borassus flabellifer L*. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 18(1), 39-44.

[15] Lykidis, C., Kotrotsiou, K. & Tsichlakis, A. (2020). Reducing set-recovery of compressively densified poplar wood by impregnation–modification with melamine–formaldehyde resin. *Wood Material Science & Engineering*, 15(4), 1-9.

[16] Merline, D.J., Vukusic, S. & Abdala, A.A. (2013). Melamine formaldehyde: curing studies and reaction mechanism. *Polymer Journal*, 45(4), 413-419.

[17] Ahmadi, P., Ebrahimi, Gh. Ashori, A. (2026). Enhanced properties of the inner part of date palm wood through double-stage treatment: synergistic effects of low-viscosity melamine–formaldehyde resin impregnation and densification. *Wood and Fiber Science*, 72(3), 1-14

[18] Yasuda, R. & Minato, K. (1995). Chemical modification of wood by non-formaldehyde cross-linking reagents. *Wood Science and Technology*, 28(2), 101-110.

[19] Choowang, R. & Hiziroglu, S. (2015). Properties of thermally-compressed oil palm trunks (*Elaeis guineensis*). *Journal of Tropical Forest Science*, 27(1), 39-46.

[20] Sulaiman, O., Salim, N., Nordin, N.A., Hashim, R., Ibrahim, M. & Sato, M. (2012). The potential of oil palm trunk biomass as an alternative source for compressed wood. *BioResources*, 7(2), 2688-2706.

[21] Behr, G., Bollmus, S., Gellerich, A. & Militz, H. (2017). Improvement of mechanical properties of thermally modified hardwood through melamine treatment. *Wood Material Science and Engineering*, 13(5), 262-270.

[22] Epmeier, H., Westin, M., Rapp, A.O. & Nilsson, T. (2003). Comparison of properties of wood modified by eight different methods: durability, mechanical and physical properties. In: Proceedings of the First European Conference on Wood Modification, April 2003, Ghent, Belgium, pp. 121-142.

[23] Khalil, H.P.S., Amouzgar, P., Jawaid, M., Hassan, A., Ahmad, F., Hadiyana, A. & Dungani, R. (2012). New approach to oil palm trunk core lumber material properties enhancement via resin impregnation. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 6(3), 299-308.