

Mechanical properties of date palm wood; behavior of some of its characteristics after thermal modification treatment

Mostafa Maleki Golandouz^{1*}, Ali Bayatkashkoli², Hadi Gholamiyan³, Mahmod Reza Hosseini Tabatabaei⁴ and Saeid Reza Farrokh Payam⁵

1*- Ph. D Wood and Paper Science and Technology Group, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, I.R. Iran, Email: maleky.mostafa@gmail.com

2- Prof Wood and Paper Science and Technology Group, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, I.R. Iran

3-Associate Professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran

4-Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Technology and Engineering, University of Zabol, Zabol, Iran

5-Associate Professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran

Received: 20 January 2025 Revised: 8 May 2025 Accepted: 24 May 2025 Published online: 19 September 2025

Abstract

Background and Objective: Date palm is one of the important sources of lignocellulosic materials in southern region of Iran. The structure of date palm wood is a monocotyledonous plant and is very different from the wood of dicotyledonous trees. Therefore, an environmentally friendly approach to date palm wood modification and the behavior of some mechanical properties for use in the wood and furniture industry was investigated.

Materials and Methods: Four date palms branches were collected from Zabol city, Sistan and Baluchestan province. The trunks were cut into four two-meter sections along the length for lightness and ease of transportation in the wood cutting workshop of the Faculty of Natural Resources, Zabol University. Test samples were prepared from different positions along the cross sections and at different heights of the trunk. The aforementioned samples were prepared for mechanical testing and thermal modification. To determine the mechanical properties before modification, tests of tensile strength parallel to the vascular bundles, tensile strength perpendicular to the vascular bundles, shear strength parallel to the vascular bundles, and compressive strength parallel to the vascular bundles were performed. The test specimens were modified for heat treatment in a heat chamber (oven) at 11 different temperatures (120 to 210°C) by maintaining a constant temperature for 2 hours. The some properties including flexural strength, modulus of elasticity, roughness meter, and resistance to screws and nails were tested before and after the thermal modification operation for the suitability in the furniture industry. Analysis of variance of heat treatment was performed at different temperatures.

Results: The results showed that the average mechanical properties before modification, tensile strength tests parallel to vascular bundles, tensile strength perpendicular to vascular



bundles, shear strength parallel to vascular bundles, and compressive strength parallel to vascular bundles were determined with an average of 85.07, 1.31, 3.58, and 19.79 kg/cm², respectively. During the modification operation, light smoke and a very fragrant odor with a pleasant aroma were emitted in the laboratory. This phenomenon was one of the signs of changes in the properties of date palm wood after modification. Also, the behavior of some properties, including the bending strength (MOR) of unmodified and modified date palm samples, was recorded with an average of 39.109 and 70.719 kg/cm², respectively. The highest average modulus of elasticity (MOE) was calculated to be 2356.38 and 2677.57 kg/cm², respectively. The modification process at different temperatures showed that in the temperature range of 160 °C, an increase in MOR and an increase in MOE occurred. However, with increasing heat treatment temperature in subsequent samples, the MOR and MOE values decreased. In the 210 °C treatment, the samples had almost a superficial burn state. Also, the screw resistance test showed an increase in resistance compared to the nail after modification. The results of the roughness test after modification, in the temperature range of 150 and 160 °C, witnessed a low level of surface changes and smoothness.

Conclusion: . This research, can be the beginning of entering into creating basic knowledge for thermal modification of date palm wood. Overall, it offers promising ways to tailor the properties of this lignocellulosic material to suit different applications while maintaining its renewable and environmentally friendly nature. Embracing these advances may pave the way for the development of these innovative and sustainable materials in the wood, furniture, and home interior industries in the coming years.

Keywords: Thermal modification, date palm texture, mechanical properties.

خواص مکانیکی چوب نخل خرما؛ رفتار برخی ویژگی‌ها بعد از عملیات اصلاح حرارتی

مصطفی ملکی گلندوز^{*۱} (id)، علی بیات کشکولی^۲ (id)، هادی غلامیان^۳ (id)، محمود رضا حسینی طباطبایی^۴ (id)

و سعیدرضا فرخ‌پیام^۵ (id)

*۱- نویسنده مسئول، دانش‌آموخته دکتری، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران،

پست الکترونیک: maleky.mostafa@gmail.com

۲- استاد، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۳- دانشیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۴- دانشیار، گروه عمران دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۵- دانشیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۳ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۶/۲۸

چکیده

سابقه و هدف: نخل خرما، یکی از منابع مهم مواد لیگنوسلولزی در ایران است. ساختار چوب نخل خرما از گیاهان تک‌په‌ای و بسیار متمایز از چوب درختان دولپه‌ای است. این ماده اولیه نیاز به مطالعه داشت، از این رو با رویکرد اصلاح نخل خرما دوستدار محیط‌زیست و رفتار برخی ویژگی‌های مکانیکی برای کاربرد در صنعت چوب و مبلمان تحقیق انجام شد.

مواد و روش‌ها: چهار نفر نخل خرما از استان سیستان و بلوچستان در شهر زابل تهیه شد. تنه‌ها در امتداد تنه به چهار قسمت دو متری برای سبکی و سهولت جابجایی در کارگاه برش چوب دانشکده منابع طبیعی دانشگاه زابل قطع‌زنی شد. نمونه‌های آزمونی از موقعیت‌های مختلف در امتداد مقاطع عرضی و در ارتفاعات مختلف درون تنه تهیه گردید. نمونه‌های مذکور برای آزمون مکانیکی و اصلاح حرارتی تهیه و آماده شد. برای تعیین خواص مکانیکی قبل از اصلاح، آزمون‌های مقاومت کشش موازی بسته‌های آوندی، مقاومت کشش عمود بر بسته‌های آوندی، مقاومت برشی موازی بسته‌های آوندی و مقاومت فشار موازی بسته‌های آوندی انجام شد. نمونه‌های آزمونی برای تیمار حرارتی در محفظه حرارتی (آون) در ۱۱ دمای متفاوت (۱۲۰ تا ۲۱۰ °C) با حفظ دمای ثابت به مدت ۲ ساعت و زمان یکسان اصلاح شد. رفتار برخی ویژگی‌ها از جمله مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته، زبری سنج و آزمون مقاومت به پیچ و میخ بعد و قبل از عملیات اصلاح حرارتی برای قابلیت در صنعت مبلمان آزمایش شد. تجزیه و تحلیل واریانس تیمار حرارتی در دماهای مختلف انجام شد.

نتایج: نتایج نشان داد میانگین خواص مکانیکی قبل از اصلاح، آزمون‌های مقاومت کششی موازی بسته‌های آوندی، مقاومت کششی عمود بر بسته‌های آوندی، مقاومت برشی موازی بسته‌های آوندی و مقاومت فشار بر موازی بسته‌های آوندی به ترتیب با میانگین ۸۵/۰۷، ۱/۳۱، ۳/۵۸ و ۱۹/۷۹ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع تعیین شد. در عملیات اصلاح، دود روشن و بوی بسیار معطر با رایحه خوشبو در آزمایشگاه پخش شد. این پدیده یکی از علائم تغییرات خواص نخل خرما بعد از اصلاح بود. همچنین رفتار برخی ویژگی‌ها از جمله مقاومت خمشی (MOR) نمونه‌های اصلاح‌نشده و اصلاح‌شده نخل خرما، به ترتیب با میانگین ۳۹/۱۰۹ و ۷۰/۷۱۹ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع ثبت شد. بالاترین عدد میانگین مدول الاستیسیته (MOE) به ترتیب برابر با ۲۳۵۶/۳۸ و ۲۶۷۷/۵۷ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع محاسبه شد. فرایند اصلاح در دماهای مختلف نشان داد، در محدوده دمایی ۱۶۰ °C افزایش MOR و افزایش MOE رخ داده است. ولی با افزایش دمای تیمار حرارتی در نمونه‌های بعدی مقدار MOR و MOE کاهش نشان داد. در تیمار ۲۱۰ °C نمونه‌ها تقریباً حالت سوختگی سطحی داشت. همچنین آزمون مقاومت به پیچ نسبت به میخ بعد از اصلاح افزایش مقاومت نشان داد. نتایج آزمون زبری سنج بعد از اصلاح، در محدوده دمایی ۱۵۰ و ۱۶۰ °C شاهد میزان تغییرات سطوح کم و نرمی ایجاد کرده بود.

نتیجه‌گیری: با اشاره به این تحقیق سرآغاز ورود به ایجاد دانش اساسی برای اصلاح حرارتی چوب نخل خرما است. به‌طورکلی، راه‌های امیدوارکننده‌ای برای تطبیق ویژگی‌های این ماده لیگنوسلولزی برای مطابقت با کاربردهای مختلف و درعین‌حال حفظ طبیعت تجدیدپذیر و سازگار با محیط‌زیست آن ارائه می‌دهد. استقبال از این پیشرفت‌ها ممکن است راه را برای توسعه این مواد نوآورانه و پایدار در سال‌های آینده در صنعت چوب، مبلمان و پوشش‌های داخلی منزل هموار نماید.

واژه‌های کلیدی: اصلاح حرارتی، چوب نخل خرما، خصوصیات مکانیکی.

مقدمه

نخل خرما (*Phoenix dactylifera* L) یک درخت گرمسیری و نیمه‌گرمسیری است که در آسیای غربی به‌طور وسیع کشت می‌شود (Adel et al., 2018). زیرگونه نخل‌ها را نمی‌توان به‌طور دقیق شناسایی کرد، اما با توجه به (Koelli, 2016) می‌توان فرض کرد که نخل‌ها از گونه picifera یا زیرگونه‌ای بین picifera و teera به دلیل ظاهر میوه آنها هستند. نخل‌ها یکی از فراوان‌ترین درخت‌ها در سطح کره زمین هستند و به‌طور متوسط سالانه به میزان ۲/۸-۲/۶ میلیون تن محصول تولید می‌کنند (Awad et al., 2021). به دلیل کمبود ماده اولیه چوبی در جهان و کشور ایران، از دیگر مواد طبیعی استفاده می‌شود (Harati et al., 2019 Moghadam) و یکی از منابع مهم مواد لیگنوسلولزی در تأمین ماده اولیه می‌تواند باشد. ساختار بافت نخل‌ها از گیاهان تک‌لپه‌ای و بسیار متمایز از چوب درختان دولپه‌ای است. کیفیت محصولات تولیدی از ساقه بافت نخل به دلیل ساختار آناتومی و شیمیایی غیرچوبی آن همانند مواد اولیه چوبی نیست (Fathi et al., 2017). گونه‌های چوبی معمولی دارای انواع سلول‌های محوری (فیبر، آوندها، پارانشیم و ...) و اشعه چوبی با جهت شعاعی هستند، نخل‌ها سلول‌های اشعه جهت‌دار شعاعی ندارند، بلکه فقط دسته‌های آوندی با جهت محور طولی دارند که در بافت پارانشیمی زمینه جاسازی شده‌اند. به‌طور معمول، بسته‌های آوندی از فیبر، آوند یا متاکسیلیم، پروتوکسیلیم، پروتوفلوم یا لوله‌های غربال، پارانشیم محوری، استگماتا و سلول‌های همراه تشکیل شده‌اند (Tomlinson, 1990; Lim, 1997). مطالعات Fathi و همکاران (۲۰۱۷) در مورد ویژگی‌های بیومتری، فیزیکی

و مکانیکی نخل خرما و تحقیقات Saadtnia و همکاران (۲۰۱۸) بر روی بررسی خواص آناتومیکی و آکوستیکی بافت نخل نشان می‌دهد، تغییرات تراکم دسته‌های آوندی در تنه نخل خرما متغیر است. این تغییرات بسته‌های آوندی باعث تغییر خواص بیومتری، آکوستیکی، فیزیکی و مکانیکی آن می‌گردد. همچنین تراکم دسته‌های آوندی و تعداد الیاف درون دسته‌ها، در اطراف تنه بیشتر از قسمت بافت مرکزی است. این ممکن است به دلیل ساختارهای آناتومیکی متفاوت باشد. گیاهان دولپه‌ای از ساختاری لانه زنبوری مانند تراکئید (سوزنی‌برگان) یا سلول‌های فیبری (پهن برگان) تشکیل شده‌اند، در حالی که بافت‌های نخل‌های تک‌لپه‌ای از دسته‌های آوندی (دارای سلول‌های منشوری لانه زنبوری و الیاف متراکم که در امتداد ساقه قرار گرفته‌اند) تشکیل شده‌اند که توسط بافت زمینه پارانشیمی (ساخته شده از پارانشیم چند وجهی با دیواره نازک مانند ساختار فوم مانند سلول بسته) احاطه شده‌اند (Gibson, 2012). به بیان دیگر، جایگزین مناسبی برای چوب نیست. از این‌رو، اهمیت نخل به محققان این امکان را داده تا تحقیقات متنوعی برای شناسایی و استفاده از ظرفیت نخل در صنعت چوب و کاغذ انجام دهند. براساس گزارش محققان، قابلیت استفاده از نخل به‌صورت خرده، الیاف و حتی الوار در صنعت چوب و کاغذ وجود دارد (Jahan Letibari et al., 1396). از سویی، تحقیقات اندک ولی بسیار سودمند تجارتي بر روی امکان استفاده از بافت نخل خرما انجام شده است که به دلایل تجارتي، نتایج زیادی از طرف شرکت‌ها گسترش نیافته است (Harati-Moghadam et al., 2019). بنابراین تولید انواع فراورده‌های مرکب چوبی از بافت نخل خرما امکان‌پذیر

از این پیشرفت‌ها ممکن است راه را برای توسعه این مواد نوآورانه و پایدار در سال‌های آینده مانند صنعت چوب، مبلمان و پوشش‌های داخلی منزل هموار کند.

مواد و روش‌ها

چهار نفر نخل خرما از استان سیستان و بلوچستان در شهر زابل تهیه شد. تنه‌های نخل به طول‌های دو متری قطع زنی و به کارگاه برش چوب دانشکده منابع طبیعی دانشگاه زابل منتقل گردید. مطابق استاندارد (ISO-24294) تنه‌ها در امتداد تنه به چهار قسمت بریده شدند. سپس، به طول ۶۰ سانتی‌متر قطع‌زنی و به تخته‌های کوچک به ابعاد ۶۰ × ۲۰ × ۱۵ اره شدند. علاوه بر این، نمونه‌ها از موقعیت‌های مختلف در امتداد مقاطع عرضی و در ارتفاعات مختلف درون تنه تهیه شد. تخته‌های برش داده شده برای رسیدن به رطوبت متعادل محیط به مدت (۱) ماه در فضای سر بسته کارگاه برش چوب نگهداری شد. نمونه‌ها در ابعاد نهایی برای آزمون در محور طولی تنه با شیب ۵ درجه برش و آماده گردید.

روش

اصلاح حرارتی

قبل از اصلاح حرارتی در اتاق کلیما (رطوبت $65 \pm 3\%$ و دمای $20 \pm 2^\circ\text{C}$) به مدت ۲ هفته نگهداری شد. تعداد تکرار هر نمونه برای هر آزمون مکانیکی ۳ عدد در نظر گرفته شد. اصلاح حرارتی در دو مرحله انجام شد: ۱- خشک کردن نخل خرما در دمای 100°C به مدت ۲۴ ساعت طبق استاندارد (ISO 13061-1) انجام شد (ISO 13061-2, 2014) و ۲- اصلاح حرارتی از 100°C درجه سانتی‌گراد تا دمای نهایی با سرعت $1/3^\circ\text{C/min}$ انجام شد. چوب نخل خرما برای اولین بار اصلاح می‌شد، اطلاعات و تجربه کافی وجود نداشت. از این رو، ضرورت تحقیق باعث شد در دماهای مختلف اصلاح خرما انجام شود تا بهترین تأثیرگذاری و دمای بهینه اصلاح مشخص گردد. بنابراین تا

بوده، اما کیفیت محصول تولیدی باید به دقت و براساس استانداردهای بین‌المللی مورد ارزیابی قرار گیرد (Hosseinkhani et al., 2015). براساس نوع مصرف و برای رفع عیب و افزایش کارآیی مواد می‌توان از روش‌های اصلاحی بهره برد (Hill et al., 2021). از این رو، به عنوان یک روش اصلاح چوب و سازگار با محیط‌زیست می‌توان استفاده بهینه کرد (Kacikova et al., 2020). برای این منظور در کاربردهای مکانیکی، برای بهبود و کارایی این ویژگی‌ها، نیاز به اصلاح است (Ali et al., 2021). اصلاح حرارتی شامل تغییر ساختار شیمیایی دیواره سلولی از طریق تأثیر گرما، فشار و رطوبت بدون وارد کردن مواد شیمیایی اضافی است. خواص مورد نظر چوب اصلاح شده با ترکیب دقیق انواع محیط‌های گرمایشی، مدت زمان فرایند، دمای نهایی و گونه‌های چوبی در حال اصلاح به دست می‌آید. این فرایند باعث افزایش خواص چوب، تغییر رنگ و استفاده از گونه‌های چوبی با کیفیت پایین‌تر می‌شود (Hasanagic et al., 2024). همچنین بر پارامترهای برش و کیفیت سطح، تأثیر قابل توجهی دارد (Ali et al., 2021). برای مثال، با اصلاح نمونه‌ها در دمای ۲۱۰ درجه سانتی‌گراد بهترین کیفیت سطح با حداقل مصرف انرژی در چوب پاداوک آفریقایی به دست می‌آید (Corleto et al., 2020). به طور خلاصه تحقیقات نشان می‌دهند که می‌توان با بهبود ثبات ابعادی به دلیل اصلاح حرارتی مواد لیگنوسلولزی، محصولات مهندسی شده تهیه کرد (He et al., 2019). رشد روزافزون نیازهای تحقیق و توسعه برای اشاعه و معرفی محصولات ساخته شده با ارزش افزوده بالا از مواد لیگنوسلولزی علاقه‌مندان را متوجه خود کرده است. با این وضعیت، نخل خرما در آینده به دلیل ظرفیت بازیافت، فراوانی محصول و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی، مورد تحقیق خواهد بود. از سویی، این مطالعه سرآغاز ورود به ایجاد دانش اساسی برای اصلاح حرارتی چوب نخل خرماست. به طور کلی، راه‌های امیدوارکننده‌ای برای تطبیق ویژگی‌های این ماده برای مطابقت با کاربردهای مختلف و درعین حال سازگار با محیط‌زیست آن ارائه می‌دهد. استقبال

(شعاعی، مماسی یا مخلوطی از آنها) به طور تصادفی انتخاب شد. ابعاد نمونه‌های خمشی $20 \times 20 \times 300$ mm انتخاب شد. نمونه‌ها پس از متعادل‌سازی و تثبیت رطوبت (دمای 25 ± 2 °C و رطوبت نسبی 65 ± 5 درصد) تحت بار خمشی متمرکز در وسط دهانه دستگاه قرار گرفت. سرعت بارگذاری ۵ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد. مقاومت خمشی از (رابطه ۱) و مدول الاستیسیته از (رابطه ۲) محاسبه شد.

MOR: مدول خمشی (گسیختگی) (N/mm^2),

MOE: مدول الاستیسیته (N/mm^2), ppl: بار در حد تناسب (N), p_u : بار نهایی (N), l: دهانه طول (mm), b: پهنا (mm), h: ارتفاع (mm), δ_{pl} : تغییر مکان وسط تیر در حد تناسب (mm).

آزمون کشش موازی بر بسته‌های آوندی

آزمایش تعیین استحکام کششی موازی بسته‌های آوندی طبق استاندارد (ASTM D143-14) انجام شد. نمونه‌ها بین فک‌های نگهدارنده گوه‌ای شکل، محکم شد. به دلیل محدودیت فاصله دهانه فک‌های دستگاه، ضخامت انتهای نمونه‌ها ساده در نظر گرفته شد. طراحی نمونه در (شکل ۱، د) آورده شده است. استحکام کششی از (رابطه ۳) محاسبه شد.

C_U = مقاومت در برابر کشش موازی با بسته‌های آوندی (نیوتن بر میلی‌متر مربع یا کیلوگرم نیرو بر سانتی‌متر مربع)

p_{max} = نیروی حداکثر برای شکست نمونه (نیوتن)

A = مساحت مقطع عرضی نمونه (میلی‌متر مربع)

(رابطه ۳)

$$C_U = \frac{P_{max}}{A}$$

دمای (210 °C) که در حد سوختن نمونه‌ها بود، اصلاح ادامه داشت. از سوی دیگر، دمای ذوب لیگنین 160 تا 170 °C است و محدوده‌های طرفین آن برای این تحقیق انتخاب و آزمون شد. دمای نهایی نمونه‌های مذکور برای تیمار حرارتی در محفظه حرارتی (آون) در 11 دمای متفاوت (120 تا 210 °C) با حفظ دما به مدت 2 ساعت و زمان یکسان انجام شد. در طول فرایند اصلاح و دماهای بالای به‌منظور جلوگیری از سوختن نمونه‌های نخل خرما از اسپری کردن آب برای تولید بخار استفاده شد. سپس آون خاموش شد. مرحله نهایی، کاستن حرارت بود. پس‌از آن، زمانی که دمای آون به 40 °C رسید، نمونه‌ها خارج شد. پس از اصلاح حرارتی، تمام نمونه‌های تنه نخل خرما در دمای 20 °C و رطوبت نسبی 65 درصد تا زمان آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشی آماده شد. مصرف انرژی یکی از پیامدهای منفی زیست‌محیطی اصلاح حرارتی نخل خرما است، ولی مقدار آلودگی این فرایند قابل توجه نیست. اصلاح چوب به‌عنوان یک روش مناسب سازگار با محیط‌زیست است. مقاومت کششی و فشاری چوب انواع نخل خرما، مقاومت خمشی آن عموماً دارای تنوع بالایی است و به علت ساختار غیرچوبی آن نمی‌توان از آن برای صنعت مبلمان زیاد استفاده کرد. برای پرداختن به این موضوع، نویسندگان مطالعاتی را بر روی خواص مکانیکی چوب نخل خرما طبیعی و اصلاح حرارتی‌شده انجام دادند.

آزمون‌های مکانیکی

خمش استاتیک و مدول الاستیسیته

اندازه‌گیری خواص مکانیکی به‌وسیله دستگاه آزمون مکانیکی اینسترون مدل ۱۱۸۶ مجهز به سیستم پردازش داده‌ها در آزمایشگاه مکانیک چوب گروه صنایع چوب دانشگاه زابل انجام شد. در حال حاضر هیچ روش و استاندارد آزمایش خاصی برای چوب نخل خرما در دسترس نیست؛ بنابراین تمام آزمایش‌های تحقیق مطابق آزمون‌های چوب انجام شد. این آزمون به شماره استاندارد (ISO-1333) انجام شد. نمونه‌های آزمون برای آزمایش

آزمون کشش عمود بر بسته‌های آوندی

برای تعیین مقاومت کشش عمود بر بسته‌های آوندی از استاندارد (ISO 3132-1975) پیروی شد. بارگذاری در جهت عمود بر بسته‌های آوندی انجام شد (شکل ۱، ج). با استخراج حداکثر مقاومت کشش عمود بر بسته‌های آوندی، از رابطه زیر محاسبه شد.

$$\text{رابطه ۴} \quad C_U = \frac{P_{\max}}{A}$$

C_U = مقاومت به فشار عمود بر بسته‌های آوندی (مگاپاسکال)

$P_{\max}$ = نیروی حداکثر برای شکست نمونه (نیوتن)

A = مساحت مقطع عرضی نمونه (میلی متر مربع)

آزمون برشی موازی بر بسته‌های آوندی

آزمایش نمونه آزمونیه مقاومت برشی موازی مطابق (شکل ۱، ب) است که بر اثر نیروی وارده در دو جهت مخالف هم سبب جدا شدن سطح مورد نظر شد. تنش حداکثر، حاصل تقسیم نیرو بر سطح جدا شده است. آزمون از رابطه (۵) تعیین شد.

$F_{\max}$ = نیروی حداکثر در نقطه شکست (نیوتن)

A = سطح مقطع صفحه برش (میلی متر مربع)

P = مقاومت برشی (نیوتن بر میلی متر مربع یا مترمربع)

$$\text{رابطه ۵} \quad P = \frac{F_{\max}}{A}$$



شکل ۱- آزمون مکانیکی نخل خرما، شامل مقاومت فشاری (A)، مقاومت برشی (B)، مقاومت کشش عمود بر بسته‌های آوندی (C)، مقاومت کشش موازی بسته‌های آوندی (D)

Figure 1. Mechanical test of date palm, including compressive strength (A), shear strength (B), tensile strength perpendicular to vascular bundles (C), tensile strength parallel to vascular bundles (D)

آزمون فشار موازی بسته‌های آوندی

آزمون مقاومت فشاری موازی با بسته‌های آوندی نمونه نخل خرما مطابق استاندارد (ISO-3787) انجام شد. ابعاد و

اندازه نمونه‌ها ($20 \times 20 \times 60 \text{ mm}^3$) انتخاب شد. سرعت دستگاه، عدد ۴/۲ نیوتن تنظیم شد. فشار و تغییر شکل نمونه‌ها در مدت $1/5$ تا 2 min/mm انجام شد. مطابق

تیمار جمعاً ۴۲ نمونه محاسبه زبری و براساس استاندارد (ISO-۴۲۸۷) تعیین شد. از دستگاه زبری سنج مدل SJ-201P ساخت کارخانه Mitutoyo ژاپن استفاده شد. نحوه کار با این دستگاه، بدین صورت است که توسط حسگر متحرک (سوزن) زبری سنج، با طی مسافت ۱۰ mm بر روی سطح نمونه‌های بافت نخل خرما در دمای ۱۲۰ تا ۲۱۰ °C (اصلاح شده) و نمونه شاهد (اصلاح نشده)، حرکت تماسی انجام و ثبت شد. بعد از اتمام حرکت دستگاه روی نمونه‌ها، مقدار و تعیین زبری سنج تعیین شد. تحلیل پارامترهای میانگین زبری سطح (Average Surface Ra) Roughness مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، زبری از (رابطه ۸) محاسبه شد.

$$Ra = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + \dots + y_n}{2n} \quad (\text{رابطه ۸})$$

تجزیه و تحلیل داده‌ها

آزمون مقاومت خمشی برای تمام تیمار (شاهد و ۱۲۰ تا ۲۱۰ °C) براساس طرح کاملاً تصادفی (CRD) طراحی شد. در تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها از برنامه بسته SPSS استفاده شد. تجزیه و تحلیل واریانس یک طرفه (ANOVA) برای داده‌ها انجام شد. تفاوت بین میانگین‌ها براساس آزمون حداقل تفاوت معنی دار (LSD) در سطح اطمینان ۹۵ درصد بررسی شد.

نتایج

مقاومت به کشش موازی بسته‌های آوندی

مقاومت کشش موازی بسته‌های آوندی نمونه‌های اصلاح نشده نخل خرما با میانگین ۸۵/۰۷ نیوتن بر مترمربع (N/mm²) در جهت طولی بسته‌های آوندها، تعیین شد. این مقدار میزان مقاومتی است که نخل خرما در مقابل نیروی کششی موازی با الیاف تا حد گسیختگی الیاف از خود نشان داد. طراحی نمونه آزمون در (شکل ۳، د) نشان داده شده است. همان‌طور که در (شکل ۲، د) مشاهده می‌شود یک

(شکل ۱، A) این آزمون از (رابطه ۶) محاسبه شد.

$\sigma_w =$ مقاومت موازی با الیاف (نیوتن بر میلی‌متر مربع یا کیلوگرم نیرو بر سانتی‌متر مربع)

$P_{max} =$ نیروی لازم برای فشار نمونه (نیوتن یا کیلوگرم نیرو)

$A =$ سطح مقطع نمونه (میلی‌متر مربع یا مترمربع)

$$\sigma_w = \frac{P_{max}}{A} \quad (\text{رابطه ۶})$$

مقاومت نگهداری پیچ و میخ

برای مقایسه توان نگهداری پیچ و میخ از عمق نفوذ یکسان در جهت عمود بر بسته‌های آوندی استفاده شد. آزمون‌ها توسط دستگاه آزمون مکانیکی با سرعت بارگذاری ۱/۵ min/mm انجام شد (شکل ۶). برای کشیدن نیرو، طبق استاندارد (BSEN ۱۳۸۳-۱۹۹۹) انجام شد. میخ‌های مورد استفاده به طول ۳۰ با قطر ۱/۶ mm و نیز پیچ‌ها به طول ۳۰ با ضخامت حدود ۳/۵ mm و هر دو از جنس فولاد بود. بیشینه توان نگهداری پیچ و میخ نیز از (رابطه ۷) محاسبه شد.

$$W = \frac{P_{max}}{L} \quad (\text{رابطه ۷})$$

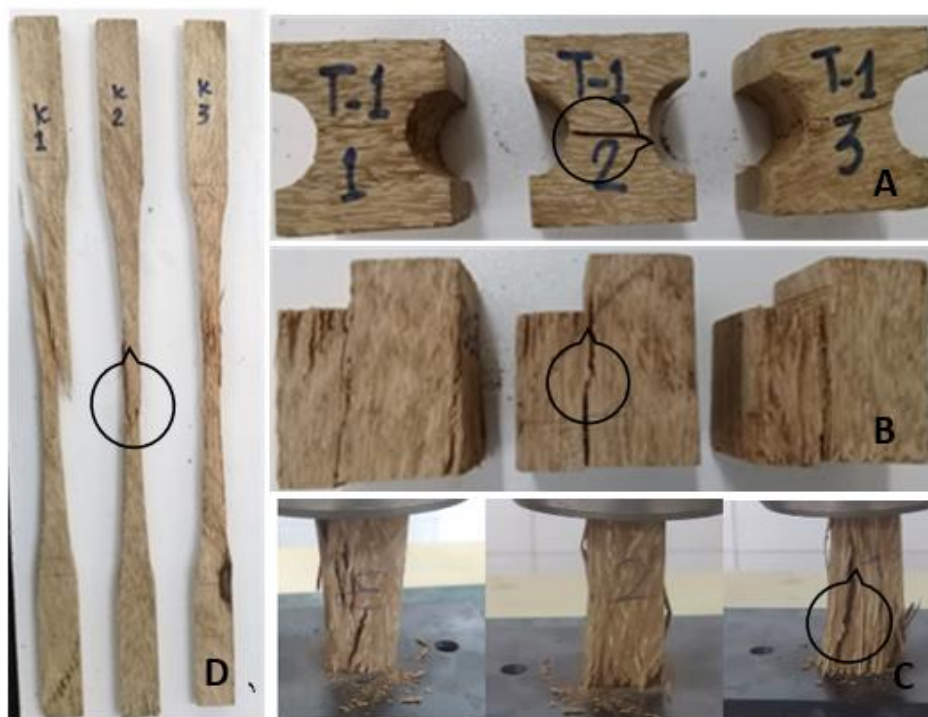
که در آن، W، توان نگهداری پیچ (N/mm)، P_{max} نیروی بیشینه و L در ازای نفوذ پیچ (mm) است.

تعیین زبری سنجی

برای اندازه‌گیری زبری سطح نمونه‌های نخل خرما اصلاح شده و شاهد، همچنین برای بررسی میزان تغییرات زبری با توجه به تأثیرگذار بودن رطوبت بر زبری سطح نخل خرما، ابتدا نمونه‌های آزمون در شرایط متعادل‌سازی (دمای ۲۵ ± ۲ °C و رطوبت نسبی ۵۶ ± ۵ درصد) قرار گرفت. نمونه‌ها در رطوبت تعادل حدود ۱۲ درصد آماده شد. نمونه هایی به ابعاد ۵×۵×۵ سانتی‌متر و ۳ نمونه تکرار برای هر

نقطه شکست تقریباً خطی (Fathi, 2017) بود؛ بنابراین، با توجه به رفتار مکانیکی، چوب نخل خرما را می‌توان به‌عنوان ترکیبی از مدل‌های اتصال موازی متشکل از دو عنصر، یعنی بسته‌های آوندی و بافت زمینه پارانشیمی، همگن و همسانگرد است (گیسون ۲۰۱۲) اشاره کرد. فرض بر این است که کشش (تحت بار)، بسته‌های آوندی و بافت زمینه تغییر شکل یکسانی دارند. به‌طور معمول، الیاف و بسته‌های آوندی، استحکام و سفتی بالایی دارند، در حالی که بافت زمینه (پرانشیم) دارای استحکام و سفتی کم و قابلیت تغییر شکل بالایی است (Fruehwald-Koenig and Heister, 2024).

شکست حالت خنجری یک‌طرف باریک، تیز و طرف دیگر پهن (دو‌حالتی) رخ داده است (شماره ۱). در نمونه دیگر، حالت تک شکست در عرض (شماره ۲) رخ داده است. یک نمونه شکست کششی، در ضخامت (شماره ۲) اتفاق افتاده است (Fruehwald-Koenig and Heister, 2024). سه الگوی متفاوت شکست کششی مشاهده شده (شکل ۲، د) را با تمام شکست‌های ناشی از زاویه بین بسته‌های آوندی و جهت تنش کششی اعمال شده نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل منحنی نمودار نشان داده می‌شود، منحنی تنش کششی (σ) - کرنش (ϵ) چوب نخل خرما (آزمایش شده به موازات بسته‌های آوندی)، از قسمت ابتدای بارگذاری تا



شکل ۲- الگوهای شکست پس از آزمایش نمونه‌های مکانیکی

Figure 2. Failure patterns after testing mechanical specimens

بر مترمربع (N/mm^2) به دست آمد. مقادیر از ۳/۴۴ تا ۳/۷۱ (N/mm^2) متغیر هستند. اثر اعمال نیرو نمونه آزمونی نخل در حالت برشی شکسته می‌شود. در این حالت قطعه نخل خرما یک قسمت در مقابل قسمت دیگر می‌لغزد

آزمون برشی موازی با بسته‌های آوندی نمودار منحنی مقاومت برش موازی با الیاف (بسته‌های آوندی) نخل خرما در (شکل ۳) نشان داده شده است. مقدار این آزمون قبل از اصلاح حرارتی با میانگین ۳/۵۸ نیوتن

مربوط به نخل خرما در (تصویر ۳) نشان داده شده است. مقادیر قبل از اصلاح حرارتی با میانگین ۱۹/۷۹ نیوتن بر مترمربع (N/mm^2) به دست آمد. مقاومت فشاری موازی با بسته‌های آوندی نخل خرما توسط فتی (۲۰۱۴) گزارش شده است. اثر مقاومت فشاری موازی با بسته‌های آوندی در برابر فشار، در منحنی (تصویر ۳) ترسیم شده است. همان‌طور که در (تصویر ۲) مشاهده می‌شود، الگوهای شکست نمونه آزمونی در طول آزمون مقاومت فشاری موازی با بسته‌های آوندی در حال کمانه شدن و جدا شدن است. نمودار و منحنی رفتار تنش-کرنش تراکم خطی است. از بار صفر تا بار نهایی یا شکست، این برای کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف معمولی است و با چوب‌های نرم و چوب‌های سخت با رفتار انعطاف‌پذیر و بدون رفتار بسیار متفاوت است. شکستگی حالت شکست را در دو نمونه از چوب نخل خرما در طول آزمون فشاری موازی با بسته‌های آوندی (تصویر ۲، C) نشان می‌دهد. همان‌طور که در (تصویر ۲) مشاهده می‌شود، بسته‌های آوندی بعد از اعمال نیرو در حال کمانه شدن هستند؛ زیرا پارانشیم کنار الیاف برای تثبیت و تحمل فشار خیلی ضعیف است (دیواره‌های سلولی بسیار نازک). به‌طور معمول، الیاف و بسته‌های آوندی، استحکام و مقاومت بالایی دارند. الیاف تحت فشار با یکدیگر کمانه می‌کنند (به‌صورت غیرمقارن نسبت به خط بین الیاف) و ماتریس (زمینه پرانشیم) در معرض تغییر شکل برشی قرار می‌گیرد؛ بنابراین کمانه شدن الیاف در ماتریس رخ داده است (Fruehwald-Koenig and Heister, 2024). علاوه بر کمانه شدن الیاف که توسط بارهای فشاری مکانیکی ایجاد می‌شود، کمانه شدن و انحراف الیاف ممکن است به دلیل تنش‌های انقباضی ایجاد شده در طول خشک کردن چوب نخل خرما نیز ایجاد شود. از نظر عملکرد ساختاری، مقاومت فشاری به موازات بسته‌های آوندی در (جدول ۳) نشان داده شده است.

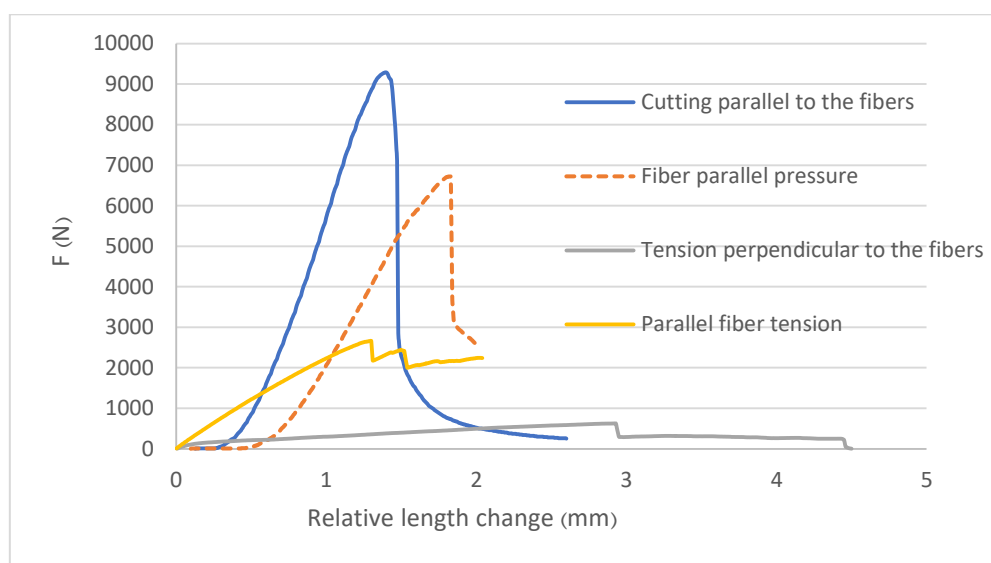
و در مقابل فشار بسته‌های آوندی دچار انحراف و جدا می‌شود. این وضعیت در (شکل ۲ B) قابل مشاهده است. زاویه بین جهت بسته‌های آوندی و جهت تنش کششی اعمال شده باعث می‌شود که مقادیر مقاومت بسیار کم اندازه‌گیری شود. به دلیل جهت‌گیری مارپیچی دسته‌ها با انحرافات در جهت شعاعی (Tomlinson, 1990; Gonzalez and Nguyen Ruggeberg et al, 2008)؛ عملیات نمونه‌های آزمایشی کوچک (که دسته‌های آوندی با فاصله منظم) باهم یکسان و کامل باشند امکان‌پذیر نیست (Fruehwald-Koenig and Heister, 2024).

آزمون کشش عمود بر بسته‌های آوندی

منحنی نمودار مقاومت کششی عمود بر بسته‌های آوندی نخل خرما در (شکل ۳) و الگوهای شکست پس از آزمون در (شکل ۲، A) نشان داده شده است. مقدار اندازه‌گیری شده این آزمون با میانگین ۱/۳۱ نیوتن بر میلی‌متر مربع (N/mm^2) تعیین شد. مقاومت در برابر کشش عمود بر بسته‌های آوندی نشان‌دهنده میزان چسبندگی عرضی بین بافت یا به عبارتی دیگر، چسبندگی جانبی (زمینه پرانشیمی) در چوب نخل خرماست. زاویه بین جهت بسته‌های آوندی و جهت تنش کششی اعمال شده باعث می‌شود که مقادیر مقاومت کم اندازه‌گیری شوند؛ بنابراین مقاومت در برابر کشش عمود بر بسته‌های آوندی عدد پایین ثبت و مشاهده شد. استحکام کششی کم چوب نخل خرما در این مطالعه ممکن است به دلیل زاویه بین جهت بسته‌های آوندی و جهت تنش کششی اعمال شده در نمونه‌های آزمایش کششی باشد که منجر به مقادیر مقاومت کششی می‌شود که بسیار کم اندازه‌گیری می‌شوند (Fruehwald-Koenig and Heister, 2024).

آزمون فشاری موازی با بسته‌های آوندی

نمودار مقاومت فشاری موازی با بسته‌های آوندی



شکل ۳ - منحنی آزمون‌های مکانیکی نخل خرما
Figure 3. Date palm mechanical test curve

نقطه شکست با توجه به نوع آزمایش (خمشی) متفاوت و نزدیک به رفتار چوب و حالت تک شکستگی (تصویر ۴) دیده شد. توجه به الگوهای شکست مشاهده می‌شود و در تیمارهای بالا با رنگ تیره و حالت ترد و شکننده (تصویر ۴) شده بود. شکست‌ها به صورت شکست دوحالتی (حالت خنجری) ([Fruehwald-Koenig and Heister, 2024](#)) رخ داده است. مقاومت خمشی مرتبط با تنش الیاف در نقطه شکست است. مطالعات نشان داده که ضخامت دیواره سلولی در یک دسته آوندی بیشتر از سلول‌های پارانشیمی اطراف است. بعلاوه نحوه پراکنش بسته‌های آوندی شاخصی تعیین کننده در مقاومت مکانیکی چوب نخل خرماست ([Ruggeberg et al, 2008](#)).

آزمون خمش استاتیک و مدول الاستیسیته

نمودار مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته در خمش مربوط به اصلاح نخل خرما در (شکل ۴) نشان داده شده است. مقاومت خمشی چوب نخل خرما طبیعی (اصلاح نشده) و اصلاح شده $33/60$ تا $47/06$ با میانگین $39/10$ مگاپاسکال تا $48/06$ تا $93/65$ با میانگین $70/71$ مگاپاسکال متغیر است. نتایج مقاومت خمشی سایر محققان $35/04$ مگاپاسکال را نشان داد. در گزارش Fathi (۲۰۱۷) چوب خرما در نواحی داخلی خواص کششی بالاتری (MOE/MOR) در مقایسه با مناطق بیرونی دارد. به طوری که بیشترین و کمترین مقدار مقاومت خمشی به ترتیب مربوط به نمونه‌های تیمار حرارتی در دمای 160°C و 210°C است. شکل نمودارها در نمونه‌های مختلف نخل پس از



شکل ۴- آزمون مقاومت خمشی قبل (A) و بعد از اصلاح حرارتی (B) و نمونه‌های نخل در دماهای مختلف (C)

Figure 4. Flexural strength test before (A) and after (B) thermal modification and (C) palm samples at different temperatures

بعلاوه نحوه پراکنش بسته‌های آوندی یک فاکتور تعیین‌کننده در مقاومت مکانیکی چوب نخل خرماست (Ruggeberg et al., 2008). در هنگام آزمایش نمونه‌ها، تغییر طول نسبی (کرنش) یا تغییر شکل حاصل از وارد شدن تنش به نمونه‌های نخل خرما پس از کم کردن و حذف نیروی وارد شده به برخی نمونه‌های اصلاح نشده و اصلاح شده در دمای پایین به حالت و وضعیت اول خود برگشتند و حالت الاستیک ایجاد شد. از سویی، نمونه‌ها سعی در ترمیم ناشی از تنش وارده داشتند. بعضی از نمونه‌ها تا حدی به حالت اول مشاهده شد، در نتیجه حالت الاستیسیته اتفاق افتاد، بنابراین حد الاستیک مانند سایر ویژگی‌های مختلف نخل مانند تنه و یا اطراف پوست Fathi و همکاران (۲۰۱۷) استحصال شده، متفاوت مشاهده شد. به بیان دیگر، تراکم دسته‌های آوندی و تعداد الیاف درون دسته‌ها، در اطراف تنه بیشتر از قسمت بافت مرکزی است.

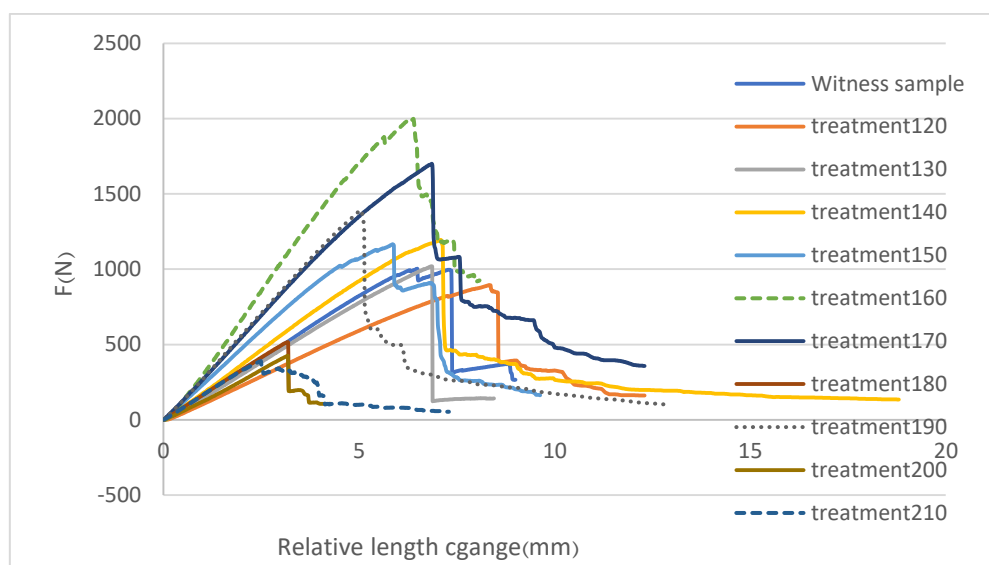
همان‌طور که در نمودار (شکل ۴) ملاحظه می‌شود، با زیاد شدن درجه حرارت اصلاح، (بالتر از 160°C) مقاومت خمشی رو به کاهش است. منابع علمی نشان می‌دهد که لیگنین در دمای 160°C درجه شروع به ذوب شدن می‌نماید و در دمای 170°C ، کامل ذوب شده و بیشتر از این دما شروع به سوختن می‌نماید، بنابراین دمای بیشتر و کمتر از این محدوده برای آزمایش انتخاب گردید. عملیات حرارتی ویژگی رطوبت‌سنجی نخل را کاهش می‌دهد، بنابراین خواص هم‌کشیدگی و واکشیدگی آن را کاهش می‌دهد، در نتیجه ثبات ابعادی را بهبود می‌بخشد. Kamboj و همکاران (۲۰۲۰) دریافتند که اصلاح حرارتی چوب بر پارامترهای برش و کیفیت سطح، تأثیر قابل توجهی دارد. با افزایش تعداد بسته‌های آوندی در واحد سطح بر خواص مکانیکی تأثیر می‌گذارد.

مطالعات نشان داده که ضخامت دیواره سلولی در یک دسته آوندی بیشتر از سلول‌های پارانشیمی اطراف است.

جدول ۲- خمش استاتیک و مدول الاستیسیته نمونه‌های نخل خرما در دماهای مختلف

Table 2- Static bending and modulus of elasticity of date palm samples at different temperatures

Static bending (MOR)			Modulus of elasticity (MOE)		Thermal modification
Average force	Average MOR	Average deviation (MOR)	Average deviation (MOE)	Average MOE	(°C)
834/34	39/10	7/33	1054/58	2356/37	Raw palm
862/33	40/42	4/14	208/39	709/29	120
866	40/59	8/30	160/73	1418/93	130
932	43/68	12/77	237/52	2014/34	140
1137/33	53/31	22/11	1698/75	2125/65	150
1508/67	70/71	22/60	1663/92	2677/57	160
993/67	46/57	30/55	769/75	2033/95	170
499	35/67	25/35	243/26	2020/82	180
803	29/18	25/20	2262/26	2022/33	190
622	22/45	2/63	156/77	1258/02	200
238/3	11/17	5/92	484/43	1062/63	210

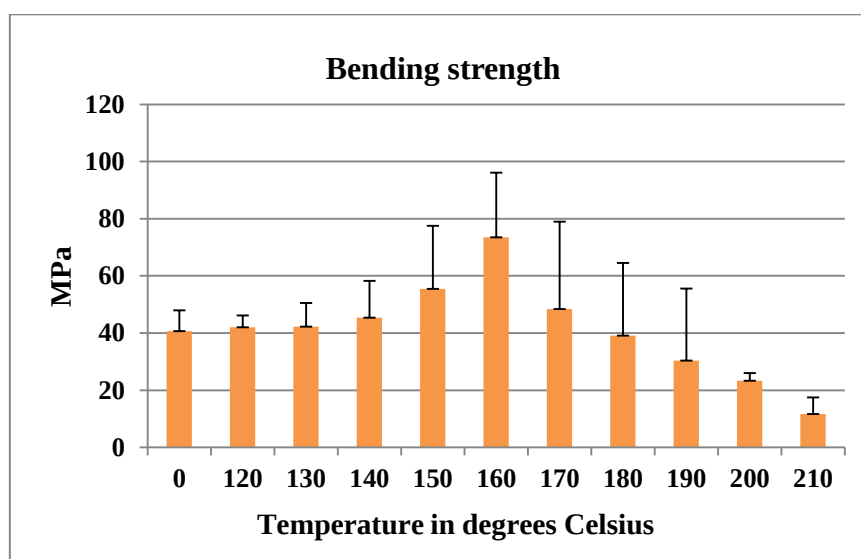


شکل ۵- منحنی نیرو خمش نخل خرما در دماهای مختلف

Figure 5. Bending force curve of date palm at different temperatures

سانتی‌گراد تحت تیمار قرار گرفت، MOR و MOE در مقایسه با نمونه شاهد افزایش یافت. در چوب نخل خرما این فاکتور، مانند سایر ویژگی‌ها با توجه به شرایط رویش تغییر می‌کند.

در تحقیقی دیگر، Wang و همکاران (۲۰۲۰) بر روی بامبو تحت عملیات حرارتی با بخار اشباع در دمای ۱۴۰، ۱۶۰ و ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ تا ۳۰ دقیقه قرار دادند. نتیجه گرفتند، هنگامی که نمونه در دمای ۱۴۰ درجه



شکل ۶- نمودار آزمون خمش قبل و بعد از اصلاح حرارتی

Figure 6. Bending test diagram before and after heat treatment

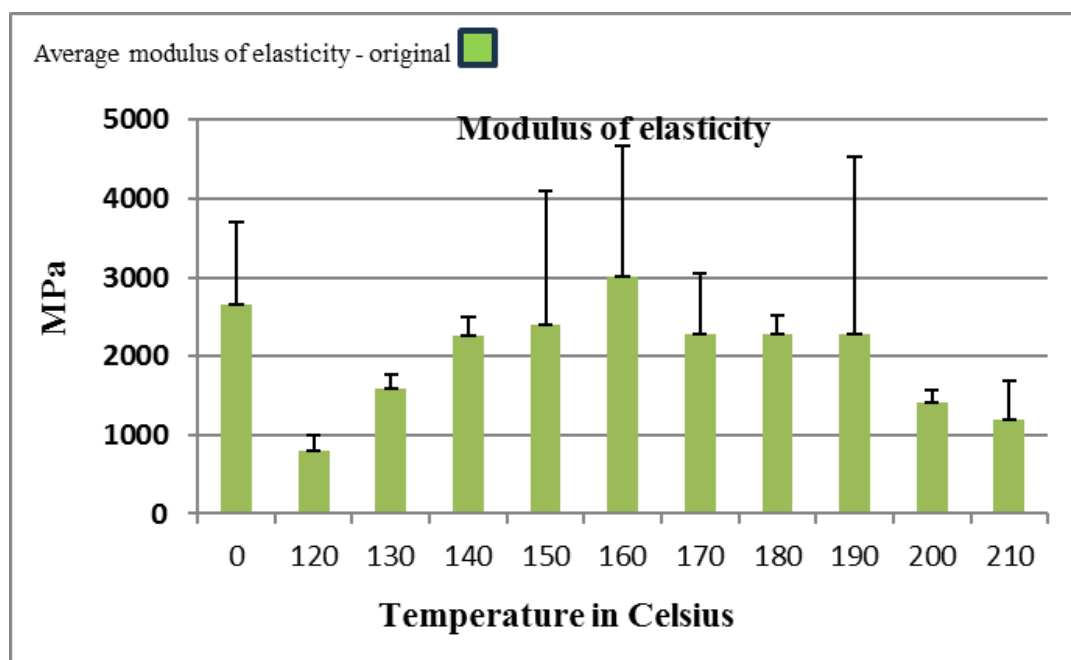
لیگنین در اصلاح با حرارت مشهود است، پیوندهای لیگنین (عمدتاً β -O-4) و گروه‌های متوکسیل شکافته می‌شوند و لیگنین در دماهای بالاتر سفت‌تر می‌شود (Sikora et al., 2018).

همچنین Esteves و Pereira (۲۰۰۹) در تحقیقات خود دریافتند که مدول الاستیسیته برای اصلاح‌های ملایم تر (دمای کم) افزایش می‌یابد و برای اصلاح با دمای بیشتر کاهش می‌یابد. Ali و همکاران (۲۰۲۱) دریافتند که در کاربردهای مکانیکی، برای بهبود ویژگی‌ها نیاز به اصلاح است. همچنین He و همکاران (۲۰۱۹) از اصلاح حرارتی، برای بهبود کیفیت چوب استفاده کردند. با توجه به نتایج تجزیه و تحلیل واریانس، مقاومت خمشی به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر دما قرار می‌گیرد. مقادیر میانگین مقاومت خمشی نمونه شاهد و نمونه‌های اصلاح شده قطعه مستقیم در (جدول ۳) نشان داده شده است. نمونه نخل خرما در سطح اطمینان ۹۵ درصد است. نمودار بارگذاری و موقعیت شکستگی نمونه‌های اولیه در (شکل ۶) نشان داده شده است. نتایج LSD نشان می‌دهد که مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته نمونه‌ها با یکدیگر تفاوت معنی‌داری داشتند و اختلاف میانگین در سطح ۰/۰۵

نمودار مدول الاستیسیته در خمش مربوط به اصلاح نخل خرما در (تصویر ۷) نشان داده شده است. این مقادیر برای نمونه شاهد با میانگین $2356/37$ کیلوگرم بر سانتی مترمربع مگاپاسکال تعیین شد. بیشترین مدول الاستیسیته مربوط به تیمار 160°C با مقدار $3011/89$ کیلوگرم بر سانتی مترمربع ثبت شد. مدول الاستیسیته (MOE) نخل خرما اصلاح شده در مقایسه با مدول گسیختگی (MOR) مستعد تحت تأثیر عملیات حرارتی بود. هنگامی که نمونه‌ها در دمای 160°C تحت اصلاح قرار گرفت، MOR و MOE در مقایسه با شاهد افزایش نشان دادیافت. اصلاحات انجام شده در دمای‌های مختلف نخل خرما مطابق (جدول ۲) در MOR و MOE میزان تغییرات مشاهده می‌شود. در نخل خرما مقادیری از همی سلولز، لیگنین و سلولز مشابه چوب-های سوزنی‌برگان و پهن‌برگان وجود دارد. با این حال، اصلاح حرارتی باعث افزایش محتوای نسبی مواد استخراجی، لیگنین و سلولز می‌شود، اما محتوای نسبی همی سلولز در چوب به دلیل افزایش دمای اصلاح حرارتی کاهش نشان می‌دهد (Gaff et al., 2019). بنابراین در دمای بالاتر تخریب لیگنین شروع می‌شود، اما لیگنین در برابر تخریب حرارتی کمی مقاوم‌تر است. با افزایش نسبی محتوای

های مختلف حول میانگین آنها در (جدول ۳) توصیف شده است. توجه به انحراف معیار داده‌ها، اعداد پایین‌تری نشان می‌دهد در نتیجه داده‌ها به میانگین نزدیک هستند و پراکندگی تیمار اندک و ارتباط معنی‌دار وجود دارد.

معنی‌دار بود. بنابراین تیمار در دمای 160°C عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌های دیگر داشت. در دماهای پایین در مقایسه با نمونه‌های شاهد و تیمار بهینه کاهش استحکام داشت. از سوی دیگر، تجزیه و تحلیل واریانس و نحوه پراکندگی (تغییرات) داده‌های تیمار حرارتی در دما-



تصویر ۷- نمودار مدول الاستیسیته قبل و بعد از اصلاح حرارتی نخل خرما

Figure 7. Modulus of elasticity before and after thermal modification of date palm

جدول ۳- تجزیه و تحلیل واریانس خمش استاتیک و مدول الاستیسیته نمونه‌های نخل خرما در دماهای مختلف

Table 3- Analysis of variance of static bending and modulus of elasticity of date palm samples at different temperatures

		Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.
temperature F max	Between Groups	3328859/748	10	332885/975	2/447	/039
	Within Groups	2993124/547	22	136051/116		
	Total	6321984/295	32			
Temperature (MOR)	Between Groups	19672/781	10	1967/278	2/447	/039
	Within Groups	17688/665	22	804/030		
	Total	37361/445	32			
Temperature (MOE)	Between Groups	7/088E8	10	7/088E7	/802	/629
	Within Groups	1/944E9	22	8/836E7		
	Total	2/653E9	32			

The mean difference is significant at the 0.05 level.*

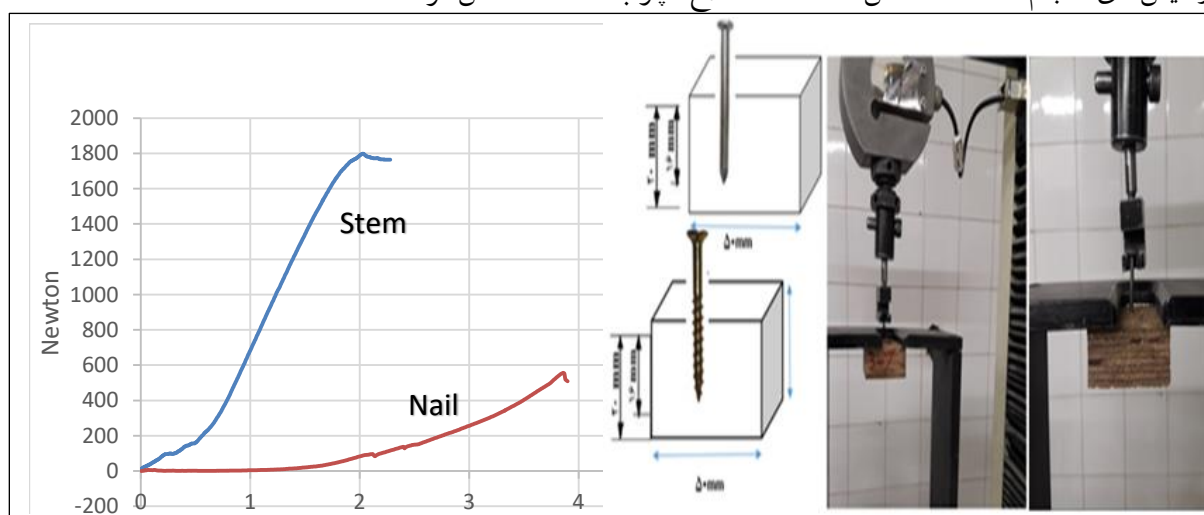
آزمایش مقاومت نگهداری پیچ و میخ

نمودار مقاومت آزمایش نگهداری پیچ و میخ مربوط به نخل خرما در (تصویر ۸) نشان داده شده است. این مقادیر برای نمونه‌های میخ و پیچ به ترتیب در بافت نخل قبل از عملیات اصلاح برای میخ با میانگین $23/68 \text{ N/mm}^2$ و برای پیچ با میانگین $92/85 \text{ N/mm}^2$ تعیین شد. قدرت نگهداری بیشتر پیچ در مقایسه با میخ به دلیل قطر بیشتر و بدنه شیاردار و حالت رزوه‌ای آن است. ارتفاع رزوه، فاصله پهلوها و زاویه رزوه تأثیرات قابل توجهی نشان می‌دهد (Hoelz et al., 2022). این شیارها در پیچ باعث افزایش سطح تماس آن با چوب نخل خرما می‌شود. رزوه‌های پیچ به بافت نخل فرو می‌رود، درگیر و تماس بیشتری ایجاد می‌کند و نیروی کشیدن پیچ همراه با برش بافت نخل خرما اتفاق می‌افتد. در نتیجه قدرت اتصال آن افزایش می‌یابد. در قدرت نگهداری پیچ، تراکم ماده چوبی و چسبندگی مقاومت برشی بافت نخل خرما اهمیت دارد. به عبارت دیگر، نخل بعد از اصلاح حرارتی تا حدودی مقاومت از خود نشان می‌دهد، به دلیل اینکه بافت نخل آمادگی بیشتری برای متراکم شدن لینگین دارد. اصلاح حرارتی در دمای 160°C تا حدی ساختار مقاومتی چوب نخل خرما را تغییر می‌دهد (Maleki-Galandouz et al., 2023). همچنین براساس آزمایش‌های انجام شده، مشخص شد که اصلاح چوب

می‌تواند ظرفیت باربری پیچ را برای بیرون کشیدن چوب جامد هم در زاویه 90° درجه با محورهای ناهمسانگردی چوب و هم در زوایای مختلف افزایش دهد (Strekalkin et al., 2024). این در حالی است که مقاومت نگهداری میخ بعد از اصلاح حرارتی در دمای بهینه 160°C و مقدار آزمون با میانگین $23/92 \text{ N/mm}^2$ تعیین گردید. قدرت نگهداری به صورت نیروی لازم برای بیرون کشیدن واحد طول میخ به ازای واحد طول نفوذ به نخل خرما تحت تأثیر اصلاح حرارتی است. قدرت نگهداری میخ به فرم، شکل و چسبندگی بافت نخل خرما و عمق نفوذ میخ در نخل بستگی دارد.

زبری سنج سطح

میزان زبری، برای تعیین بافت سطوح نخل خرما با تعیین میزان تغییرات عمودی بر سطح به سطح صاف واقعی در نمونه‌های آزمون اصلاح شده و نشده تعیین شد. نمونه‌ها (در دمای 120°C تا 210°C و نمونه شاهد) ارزیابی زبری سنج به روش تماسی انجام شد. این تماس در دو طرف نمونه‌های سنباده (۱۸۰) شده و نشده انجام گردید. این کمیت مهم در تعیین اثر متقابل حسگر دستگاه (سوزن) با سطح نخل خرما را تعیین می‌کند. حرکت سوزن مخصوص با توجه به تعدد نوسان‌ها و حداکثر جابجایی، زبری سطح را مشخص کرد.



شکل ۸- آزمون میخ و پیچ نخل خرما

Figure 8. Date palm nail and stem test

بعد از اصلاح و بدون پرداخت زبری ایجاد شده بود. نتایج بررسی پارامترهای زبری سطح نمونه‌های شاهد و تیمار شده با فرایند بخارگرمایی نشان داد که این فرایند بر زبری سطح اثرگذار بود و به‌طور معنی‌داری سبب افزایش زبری سطح نمونه‌های تیمار شده است ([Hajhassani et al., 2017](#)).

همان‌طور که در (جدول ۴) مشاهده می‌کنید تغییرات سطح در برخی دماها کم است، در این صورت سطح نرم و در بعضی از درجه حرارت اصلاح، تغییرات زیاد مشاهده شد، در نتیجه سطح زبر است. از این رو، اصلاح حرارتی در محدوده دمایی ۱۵۰ و ۱۶۰ °C سطح نمونه از نرمی برخوردار بودند. از سویی، همین نمونه تیمارها

جدول ۴- مشخصات زبری نمونه‌های تیمار شده در دماهای مختلف

Table 4- Roughness characteristics of samples treated at different temperatures

Treatments	Soft			Rough		
Temperature level	Ra	Rz	Rq	Ra	Rz	Rq
(Witness)	11.05	70.15	13.87	27.68	13.92	34.85
120	7.67	63.98	10.32	18.29	98.53	23.03
130	6.79	47.94	8.79	18.01	11.43	23.25
140	6.27	54.83	8.4	12.35	77.19	15.71
150	6.7	52.26	9.1	10.17	64.59	12.86
160	6.54	50.53	7.79	9.42	55.16	11.74
170	5.05	33.17	6.29	9.04	68.39	11.99
180	4.93	36.31	6.48	7.58	54	9.99
190	7.84	56.83	10.27	9.63	70.12	13.42
200	9.2	57.29	11.38	10.47	67.84	13.17
210	10.51	66.93	13.24	13.31	81.25	16.62

حرارتی چوب نخل خرما و مقایسه با سایر دماهای اصلاح و مشاهده در نتایج مشخص کرد، مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته در محدوده دمای (۱۶۰°C) دچار تغییرات شده است. به بیان دیگر، در طی عملیات اصلاح حرارتی، دود روشن و بوی معطر و خاص به علت تبخیر مواد استخراجی مانند موم‌ها، قندها و چربی‌ها در نخل خرما در فضای آزمایشگاه منتشر شد. نویسندگان وجود این پدیده را نشانه-های اولیه تغییرات در چوب نخل خرما می‌دانند (جدول ۲). مطالعات [Hajhassani](#) و همکاران (۲۰۱۷) نشان می‌دهد که بیشترین و کمترین مقدار مقاومت خمشی به ترتیب مربوط به نمونه‌های تیمار بخارگرمایی شده در دمای ۱۳۰°C و ۱۷۰°C است. در دسترس بودن چوب نخل خرما در ایران

در تیمارهای بالا با مشخص شدن میزان تغییرات زبری، رفتارهای اجزاء مکانیکی نخل خرما اصلاح و قبل اصلاح را می‌توان پیش‌بینی کرد. افزایش زیبایی نخل خرما بعد از اصلاح، به پیرو آن سبب افزایش ثبات ابعادی، بهبود و تغییر ویژگی‌های سطحی از دیگر نتایج اصلاح این تحقیق است.

بحث

این مطالعه بینش‌های مهمی را در مورد تأثیر و رفتار خواص مکانیکی چوب نخل خرما در طی عملیات اصلاح حرارتی نشان می‌دهد و شباهت‌ها و تفاوت‌ها را با گونه‌های چوب معمولی برجسته می‌کند. در بررسی ۱۱ دمای متفاوت (۱۱۰ تا ۲۱۰ درجه سانتی‌گراد) در طی عملیات اصلاح

۱۶۰°C تأثیرگذارترین تغییرات در چوب نخل خرما را نشان داد (Maleki-Galandouz et al., 2023). بنابراین تغییرات شیمیایی ناشی از اصلاح حرارتی می‌تواند بر رفتار و خصوصیات مکانیکی چوب نخل خرما در کاربردهای مختلف و خاص مورد استفاده تأثیرگذار باشد. مقادیر آزمون مقاومت فشاری بسته‌های آوندی قبل از اصلاح حرارتی با میانگین ۱۹/۷۹ نیوتن بر مترمربع به دست آمد. مقادیر آزمون مقاومت، برای نمونه‌های میخ و پیچ به ترتیب در چوب نخل خرما قبل از عملیات اصلاح برای میخ با میانگین ۲۳/۶۸ N/mm² و برای پیچ با میانگین N/mm² ۹۲/۸۵ تعیین شد. ارزیابی زبری سنج به روش تماسی انجام شد. از این رو، اصلاح حرارتی در محدوده دمای ۱۵۰°C و ۱۶۰°C سطح نمونه از نرمی برخوردار بود. با توجه به افزایش آگاهی زیست‌محیطی و کاهش منابع جنگلی و چوبی، تقاضای زیاد برای کالاهای چوبی با ارزش ساخته شده بالا از منابع تجدیدپذیر وجود دارد. با این وضعیت، چوب نخل خرما در آینده به همت تحقیق، توسعه و به دلیل ظرفیت بازیافت، فراوانی نخل و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی استثنایی، مورد توجه خواهد بود. به‌طورکلی، در طول عملیات اصلاح، به علت اینکه نخل در دمای بالا تقریباً ۱۶۰°C درجه سانتی‌گراد حرارت داده می‌شود، زنجیره‌های قندی شکسته و اسیدهای داخل بافت نخل خرما تجزیه شده و یک محصول فاقد از هر نوع مواد شیمیایی و مغذی برای حشرات به وجود می‌آورد و درعین حال سازگار با محیط‌زیست که سبب کاربردهای خاص نخل خرما اصلاح‌شده در مکان‌های مختلف مانند آرایه‌گری داخلی و صنعت مبلمان می‌شود.

Reference

- Adel, A., El-Shafei, A., Ibrahim, A. & Al-Shemy, M., 2018. Extraction of oxidized nanocellulose from date palm (Phoenix Dactylifera L.) sheath fibers: Influence of CI and CII polymorphs on the properties of chitosan/bionanocomposite films. *Industrial Crops and Products*, 124, 155-165. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.07.073>

فرصت‌های خوبی برای جایگزینی یا مکمل کردن گونه‌های چوبی رایج، به‌ویژه چوب‌های جنگل‌های شمال کشور و زراعت چوب فراهم می‌کند. رفتار برخی ویژگی‌ها از جمله مقاومت خمشی (MOR) نمونه‌های اصلاح نشده و اصلاح شده نخل خرما، به ترتیب با میانگین ۳۹/۱۰۹ و ۷۰/۷۱۹ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع ثبت شد. بالاترین عدد میانگین مدول الاستیسیته (MOE) به ترتیب برابر با ۲۳۵۶/۳۸ و ۲۶۷۷/۵۷ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع محاسبه شد. این ماده ظرفیت امیدوارکننده‌ای را به‌ویژه به‌عنوان ماده جامد و صفحه‌ای نشان می‌دهد. شاخص‌های عملکرد آن برای طراحی حداقل وزن، قابل مقایسه با بعضی از چوب‌های سبک است. خواص کششی و فشاری موازی و عمود بر بسته‌های آوندی و خواص خمشی به‌عنوان تابعی از دانسیته و موقعیت درون تته توصیف شده‌اند که نشان‌دهنده روابط معنی‌دار بین این خواص است. جدول ۲ مربوط به MOE را نشان می‌دهد. اصلاح حرارتی، ابتدا مدول الاستیسیته را افزایش می‌دهد ولی با افزایش دما (بالتر از ۱۶۰°C) و زمان اصلاح حرارتی مقدار MOE کاهش می‌یابد. به‌عبارتی‌دیگر، این کاهش مقاومت مکانیکی به دلیل کاهش طول زنجیره‌های سلولز و ترد و شکننده شدن لیگنین است (Mohebbi et al., 2009). از آنجایی‌که تمام مقاومت‌ها با سختی همبستگی زیادی دارند، مدول الاستیسیته را می‌توان برای درجه‌بندی مقاومت استفاده کرد. با توجه به ساختار یکنواخت و عدم وجود گره و معایب دیگر در چوب نخل، خواص بسیار مشابهی با نمونه‌های کوچک داشته باشد، همان‌طور که توسط آزمایش‌های خمش، فشار و کشش اولیه تأیید می‌شود. به‌طورکلی نتایج حکایت از آن دارد که اصلاح حرارتی در محدوده دمای

- Ali, M., Abdullah, U.H., Ashaari, Z., Hamid, N.H. & Hua, L.S., 2021. Hydrothermal modification of wood: A Review. *Polymers*, 13(16), 2612. <https://doi.org/10.3390/polym13162612>
- Amirou, S., Zerizer, A. and Pizzi, A., 2014. Investigation of Chemical, Physical and Mechanical Properties of Algerian Date Palm Wood. *Materials Testing Volume 56 Issue 3*. Published/Copyright: October 1. <https://doi.org/10.3139/120.110548>

- Alawar, A., Hamed, A.M. & AlKaabi, K., 2009. Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement. *Composites Part B: Engineering*, 40(7), 601-606. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2009.04.018>
- Awad, S., Zhou, Y., Katsou, E., Li, Y. & Fan, M., 2021. A critical review on date palm tree (*Phoenix Dactylifera* L.) fibres and their uses in bio-composites. *Waste and Biomass Valorization*, 12(6), 2853-2887. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01105-2>
- Corleto, R. Gaff, M. Niemz, P. Sethy, A. K. Todaro, L. Ditommaso, G. Razaei, F. Sikora, A. Kaplan, L. Das, S. Kamboj, G. Gasparik, M. Kacik, F. Jan, M. 2020. Effect of thermal modification on properties and milling behaviour of African padauk (*Pterocarpus soyauxii* Taub.) wood. *j mater res technol.* 9(xx):9315-9327. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.06.018>
- Esteves, B.M. & Pereira, H.M., 2009. Wood modification by heat treatment: A review. *Bioresources*. 4(1):370-404. <https://doi.org/10.15376/biores.4.1.370-404>
- Fathi, L., Bahmani, M., Saadat Nia, M.A., Poursertip, L. & Laden. 2017. A study on the biometric and mechanical structure of palm tree vascular groups (Case study: Ahvaz city). *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 8 (1), 109-118.
- Fruehwald-Koenig, K. & Heister, L., 2024. Macro- and micromechanical behavior of oil palm wood (*Elaeis guineensis* Jacq.): tensile, compression and bending properties. *European Journal of Wood and Wood Products* 82:1879-1899. <https://doi.org/10.1007/s00107-024-02131-w>
- Gaff, M., Kačik, F. and Gašparik, M., 2019. Impact of thermal modification on the chemical changes and impact bending strength of European oak and Norway spruce wood. *Composite Structures*. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.091>
- Gibson, L.J., 2012. The hierarchical structure and mechanics of plant materials. *J R Soc Interface* 9:2749-766. <https://doi.org/10.1098/rsif.2012.0341>
- Gholamiyan, H., 2020. The possibility of designing and constructing standard tables and chairs with palm trunk. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, Vol. 10, No. 4, Winter. In Persian.
- Gholamiyan, H., Gholampoor, B. & Rezvani, M.H., 2021. Identifying the effect of plasma treatment on the palm texture with application attitude in the furniture industry. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, Vol. 12, No. 1, Spring. In Persian
- Gonzalez, O.M. & Nguyen, K.A., 2016. Cocowood fibrovascular tissue system - another wonder of plant evolution. *Front Plant Sci* 7:1141. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01141>
- Hajhassani, R, Mohebbi, B., Najafi, S.K. and Navi, P., 2017. Evaluation of physical and mechanical properties of wood modified by steam-thermal process. *Iranian Quarterly Journal of Wood and Paper Science Research*. Volume 32, Issue 1, Page 12-1
- Hasanagic, R., Mujanic, S., Alibasic, N., Suljadzic, A., Koricic, H., Fathi, L. & Bahmani, M., 2024. Analysis of the Hygroscopicity of Thermally Modified Wood: Alterations, Characterizations, and Implications for Enhanced Performance. In: Ademovic, N., Aksamija, Z., Karabegovic, A. (eds) *Advanced Technologies, Systems, and Applications IX*. IAT 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1143. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-71694-2_46
- Hoelz, K., Dorner, P.T. & Hohlweg, J., 2022. Influence of thread parameters on the withdrawal capacity of wood screws to optimize the thread geometry. *Eur. J. Wood Prod.* 80, 529-540. <https://doi.org/10.1007/s00107-022-01792-9>
- Harati-Moghadam, Z., Mansouri, H.R. and Kazemi Najafi, S., 2019. Production of phenol-urea-formaldehyde resin (PUF) and investigation of its resistive properties in particleboard. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 9 (4): 609-619
- He, Zh., Wang, Zh., Qu, L., Qian, J. & Yi, S., 2019. Modeling and simulation of heat-mass transfer and its application in wood thermal modification. *Results in Physics*, Volume 13, 102213. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102213>
- Hill, C., Altgen, M. & Rautkari, L., 2021. Thermal modification of wood—A review: Chemical changes and hygroscopicity. *Journal of Materials Science*, 1-34. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05722-z>
- Hosseinkhani, H., 2015. Production of gypsum board reinforced with palm pruning fiber (*Phoenix dactylifera*). *Scientific-Research Quarterly of Iranian Wood and Paper Sciences Research*, - 1 (30): 60-71. In Persian.
- Jahan Latibari, L., hosenzadeh, A., Nourbakhsh, A., Kargarfard, A., and Golbabaee, f., 1996. Investigation of the characteristics of particle board made from palm waste. *Iranian Wood and Paper Science Research*. 148 (1): 110-50. In Persian
- ISO 13061-2., 2014. Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood samples - Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization, Geneva,

- Switzerland; 2014. <https://doi.org/10.3403/30497458u>
- Kacalkova, D., Kubovsky, I., Ulbrikova, N. & Kacalk, F., 2020. The Impact of Thermal Treatment on Structural Changes of Teak and Iroko Wood Lignins. *Applied Sciences*, 10(14), 5021. <https://doi.org/10.3390/app10145021>
- Kamboj, G. Gasparík, M. Gaff, M. Kacík, F. Sethy, A. K. Corleto, R. Macku, J. 2020. Surface quality and cutting power requirement after edge milling of thermally modified meranti (*Shorea spp.*) wood. *Journal of Building Engineering*, 101213 <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101213>
- Koelli, N., 2016. Density and Moisture Distribution in Oil Palm Trunks from Peninsular Malaysia. BSc-Thesis, University of Hamburg
- Lim, S. & Fujii, T., 1997. A note on the structure of oil palm trunk by scanning electron microscopy. *J Trop for Prod* 3:105–109
- Maleki-Galandouz, M., Bayat-Kashkouli, A., Farrokhpayam, S.R., Hosseini Tabatabai, M.R. & Gholamian, H., 2023. The effect of heat treatment on the physical, chemical and anatomical characteristics of date palm wood. *Journal of wood and paper industries of Iran*. Volume 14, Number 2, Fall 1402, Page 1-111. In Persian. [10.22034/ijwp.2023.1996125.1603](https://doi.org/10.22034/ijwp.2023.1996125.1603)
- Mohebbi, 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 4th European Conference on Wood Modification (ECWM4)*. 27-29th April, Stockholm, Sweden, pp. 353-360. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2011.03.011>
- Ruggeberg, M.R., Speck, T., Paris, O., Lapierre, C., Pollet, B., Koch, G. and Burgert, I., 2008. Stiffness gradients in vascular bundles of the palm *Washingtonia robusta*, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 275, 2221–2229. <https://doi.org/10.1098/rspb.2008.0531>
- Saadtnia, M.A., Sattari, N., Roohnia, M. and Bahmani, M., 2018. Acoustically quality evaluation of date palm samples from the pith to the bark. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 9 (1): 65-74. (In Persian).
- Strekalkin, A., Lukina, A., Lisyatnikov, M. & Martinov, V., 2024. Studies of Screw Behavior in Modified Wood. In: Vatin, N., Roshchina, S., Serdjuks, D. (eds) *Proceedings of MPCPE 2022. MPCPE 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 335. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30570-2_19
- Sikora, A., Kacalk, F., Gaff, M., Vondrová, V., Bubeníková, T. and Kubovsky, I., 2018. Impact of thermal modification on color and chemical changes of spruce and oak wood. *Journal of Wood Science*, 64(4), 406-416. <https://doi.org/10.1007/s10086-018-1721-0>
- Srivaro, S., Rattanarat, J., Noothong, P., 2018b. Comparison of the anatomical characteristics and physical and mechanical properties of oil palm and bamboo trunks. *J Wood Sci* 64:186–192. <https://doi.org/10.1007/s10086-017-1687-3>
- Sydor, M., 2019. Geometry of wood screws: a patent review. *Eur J Wood Prod* 77(1):93–103. <https://doi.org/10.1007/s00107-018-1362-4>
- Tomlinson, PB., 1990. *The structural biology of palms*. Oxford University Press, Oxford.
- Wu, J., Wang, X. & Fei, B., 2021. The mechanical properties and thermal conductivity of bamboo with freeze–thaw treatment. *J Wood Sci* 67, 66.
- Wang, X., Cheng, D. & Huang, X., 2020. Effect of high-temperature saturated steam treatment on the physical, chemical, and mechanical properties of moso bamboo. *J Wood Sci* 66, 52. <https://doi.org/10.1186/s10086-020-01899-8>
- Yan, J., Zhang, L. & Li, X., 2022. Effect of temperature on color changes and mechanical properties of poplar/bismuth oxide wood alloy during warm-press forming. *J Wood Sci* 68, 25. <https://doi.org/10.1186/s10086-022-02032-7>
- Zhang, J., Koubaa, A., Xing, D., Liu, W., Wang, Q., Wang, X. M. & Wang, H., 2020. Improving lignocellulose thermal stability by chemical modification with boric acid for incorporating into polyamide. *Materials and Design* 191,108589. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108589>