

اثر اصلاح حرارتی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و آناتومی چوب نخل خرما

مصطفی ملکی گلندوز^{*۱}

علی بیات کشکولی^{*۲}

سعید رضا فرخ پیام^۳

محمودرضا حسینی طباطبایی^۴

هادی غلامیان^۵

^۱ دانشجوی دکتری، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

^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 زابل، زابل، ایران

^۴ استادیار، گروه عمران دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

^۵ استادیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

مسئول مکاتبات:

ali.bayatkashkoli@uoz.ac.ir

Maleki.mostafa@uoz.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۲

چکیده

این مطالعه باهدف بررسی تأثیر اصلاح حرارتی بر خواص فیزیکی، شیمیایی و آناتومیکی بافت نخل خرما انجام شد. پس از برش تنه نخل خرما، برای انتخاب بهینه‌ترین دما، اصلاح حرارتی در ۱۰ دمای مختلف بین ۱۲۰ الی ۲۱۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۲ ساعت صورت پذیرفت. برای ارزیابی تغییرات انجام‌شده، ابتدا بررسی میکروسکوپی و سپس آزمون‌های استاندارد دانسیته، خواص شیمیایی و طیف‌سنجی FTIR انجام شد. بررسی آناتومی نشان داد که بعد از اصلاح حرارتی در دمای بهینه (۱۶۰ °C)، ترک و لکه‌های سیاه‌رنگ در حفرات آوندی مشاهده شد. این اصلاح منجر به تغییرات اساسی در ساختار مورفولوژی بافت می‌گردد. اصلاح در محدوده دمایی ۱۶۰ °C باعث تغییرات دانسیته اندک چوب نخل خرما شد. اما با افزایش اصلاح حرارتی در دمای بیشتر از آن، میزان دانسیته کاهش معنی‌داری داشت. آنالیز طیف‌سنجی FTIR بافت نخل خرما، تغییرات شیمیایی را پس از اصلاح نشان داد. باندها، تغییرات میزان گروه‌های عاملی هیدروکسیلی در سلولز و پیشرفت واکنش تراکم لیگنین را نشان دادند. اصلاح حرارتی بافت نخل باعث بهبود خصوصیات کاربردی آن شده و می‌تواند از آن به‌عنوان یک روش اصلاح سازگار با محیط‌زیست برای قابل‌استفاده نمودن نخل در صنعت مبلمان نام برد.

واژگان کلیدی: نخل خرما، اصلاح حرارتی، خصوصیات شیمیایی، خصوصیات آناتومیکی، طیف‌سنجی مادون‌قرمز.

مقدمه

۱۰۰ سال رشد کند [۳]. این درختان به‌خاطر فراوانی در مناطق جنوبی ایران به‌عنوان یکی از منابع مواد لیگنوسلولزی، در تأمین ماده اولیه شناخته شده و به‌عنوان منبع جایگزین مواد چوبی برای مصارف مختلف می‌توان از آن استفاده کرد [۴]. بعضی مردم از قسمت‌های مختلف این درخت برای کاربردهای مختلف مانند طناب، زنبیل و سبد در زندگی روزمره استفاده می‌کنند [۳]. بافت نخل به‌عنوان یک گیاه تک‌په‌ای دارای ساختار آناتومی

نخل خرما (*Phoenix dactylifera* L) یک درخت گرمسیری و نیمه‌گرمسیری است که در آسیای غربی به‌صورت گسترده یافت می‌شود [۱]. این درخت یکی از فراوان‌ترین درخت‌ها در سطح کره زمین بوده که به‌طور متوسط سالانه به میزان ۲/۶-۲/۸ میلیون تن محصول تولید می‌کند [۲]. تعداد درختان نخل در جهان بیش از ۱۰۰ میلیون برآورد شده است و هر نخل می‌تواند بیش از

خصوصیات مکانیکی، استحکام، دوام در برابر موربانه‌ها و قارچ‌ها و همچنین پتانسیل آن برای استفاده در ساخت و مصالح ساختمانی جوانب مثبت و منفی دارد [۱۱]. اصلاح حرارتی چوب بر پارامترهای برش و همچنین کیفیت سطح، تأثیر قابل توجهی دارد [۱۵]. برای مثال، با اصلاح نمونه‌ها در دمای ۲۱۰ درجه سانتی‌گراد بهترین کیفیت سطح با حداقل مصرف انرژی در چوب پاداوک آفریقایی به دست می‌آید [۱۶]. این روش‌های اصلاحی به خاطر نقش حفاظتی و ضد رطوبتی، باعث دوام محصولات تیمار حرارتی شده می‌شوند و نیز شرایطی را برای اتصال بهتر عناصر ساختاری چوب و دوام بیشتر محصولات تیمار شده ایجاد می‌کنند [۱۷ و ۱۸]. اصلاح حرارتی چوب برای بهبود کیفیت چوب استفاده می‌شود [۱۹]. اصلاح حرارتی می‌تواند قابلیت پرداخت سطح بافت تنه نخل را بهبود بخشد [۱۷]. به طور خلاصه، می‌توان با بهبود ثبات ابعادی به‌خاطر اصلاح حرارتی مواد لیگنوسولوزی، محصولات مهندسی شده تهیه کرد [۲۰] و یا اینکه می‌توان از پلاسمای در بهبود فرآورده‌های غیرچوبی نظیر بافت نخل استفاده نمود تا جایگزینی برای چوب باشند [۲۱].

به‌رحال افزایش آگاهی زیست‌محیطی منجر به افزایش علاقه و استفاده از مواد زائد کشاورزی در توسعه کامپوزیت‌های پایدار برای کاربردهای مختلف شده و درخت خرما نیز به‌عنوان فراوان‌ترین محصول کشاورزی در نظر گرفته می‌شود [۲]؛ بنابراین پیدا کردن روشی بهینه با بررسی پتانسیل استفاده از نخل خرما برای کاربرد و گسترش در صنایع تولیدی بارزش افزوده بالاتر مورد توجه می‌باشد. همچنین با در نظر گرفتن این تمایز و کمبود منابع جنگلی و مهم‌تر از آن قیمت بالای چوب‌های صنعتی، امکان استفاده و جایگزینی چوب نخل خرما به‌عنوان ماده اولیه لیگنوسولوزی ارزشمند بعد از عملیات اصلاحی و افزایش کارایی با رویکرد دوام قابل قبول در صنعت مبلمان وجود دارد. در این پژوهش، این موضوع بررسی می‌شود.

مواد و روش‌ها

چهار نفر (اصله) نخل خرما از استان سیستان و بلوچستان در شهر زابل تهیه شد. تنه‌های نخل به طول-

منحصر به فرد و کاملاً متفاوتی از دیگر چوب‌ها است که می‌توان علت آن را وجود دسته‌های آوندی در بافت‌های پارانشیمی مربوط دانست [۵]. ساختار بافت نخل‌ها از گیاهان تک‌لپه‌ای و بسیار متمایز از چوب درختان دولپه‌ای است. کیفیت محصولات تولیدی از ساقه بافت نخل به‌خاطر ساختار آناومی و شیمیایی غیرچوبی آن همانند مواد اولیه چوبی نبوده [۶] و به این خاطر جایگزین مناسبی برای چوب نیست. اهمیت نخل به محققان این امکان را داده تا تحقیقات متنوعی برای شناسایی و استفاده از پتانسیل نخل در صنعت چوب و کاغذ انجام دهند. بر اساس گزارش محققان، قابلیت استفاده از نخل به‌صورت خرده، الیاف و حتی الوار در صنعت چوب و کاغذ وجود دارد [۷]؛ بنابراین نیاز به بررسی پتانسیل استفاده از نخل خرما در کاربردهای مختلف برای تشویق صنایع به تولید محصولات با ارزش افزوده از درخت خرما در آینده دور از ذهن نیست [۴]. 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 به بیرون نشر نکرده است [۶]. تولید انواع فرآورده‌های مرکب چوبی از بافت نخل خرما امکان‌پذیر بوده، اما کیفیت محصول تولیدی باید به‌دقت و بر اساس استانداردهای بین‌المللی مورد ارزیابی قرار گیرد [۸]. بر اساس نوع مصرف و برای رفع عیب و افزایش کارایی مواد می‌توان از روش‌های اصلاحی استفاده کرد [۹]. اصلاح چوب به‌عنوان یک روش مناسب با سازگار با محیط‌زیست است [۱۰]. مواد چوبی یک ماده ساختمانی ایده‌آل بوده، زیرا تجدیدپذیر و سبز است. با این حال، به‌خاطر ثبات ابعاد و دوام پایین، استفاده از آن در کاربردهای ساختاری محدود است؛ بنابراین، اصلاح برای بهبود موارد فوق‌الذکر لازم است [۱۱]. از طرف دیگر، یکی از فناوری‌های تجاری برای بهبود پایداری و دوام چوب، اصلاح حرارتی محسوب می‌شود [۱۰]. برای این منظور در کاربردهای مکانیکی، برای بهبود و کارایی این ویژگی‌ها، نیاز به اصلاح است [۱۲]. همچنین در طی این اصلاح حرارتی، محتویات درصد مواد تشکیل‌دهنده نظیر سلولز، لیگنین و مواد استخراجی تغییر می‌کند [۱۳ و ۱۴]. عملیات حرارتی بر روی خصوصیات چوب مانند ثبات رنگ، ثبات ابعادی،

ها به ابعاد نهایی $20 \times 20 \times 300$ میلی‌متر در محور طولی تنه با شیب ۵ درجه برش داده شده و قبل از تیمار حرارتی، در اتاق کلیما (رطوبت $3 \pm 65\%$ و دمای $20 \pm$ °C) به مدت دو هفته نگهداری شدند (شکل ۱). لازم به ذکر است تعداد تکرار هر نمونه برای هر آزمون ۳ عدد در نظر گرفته شد.

های دو متری قطع زنی و به کارگاه برش چوب دانشکده منابع طبیعی دانشگاه زابل منتقل گردید. سپس، تنه نخل‌ها به طول ۶۰ سانتی‌متر قطع زنی و به تخته‌های کوچک به ابعاد $60 \times 20 \times 15$ سانتی‌متر تبدیل شدند. تخته‌های برش داده شده جهت رسیدن به رطوبت متعادل محیط به مدت ۱ ماه در فضای سرپیسته کارگاه صنایع چوب نگهداری شد. برای قرارگیری نمونه‌ها در آون، نمونه-



شکل ۱- مراحل تبدیل تنه نخل خرما به نمونه‌های آزمایشگاهی

نمونه در حالت تعادل رطوبت، V_0 حجم خشک نمونه است.

$$D_h = \frac{m_h}{V_h} \quad (1)$$

$$D_0 = \frac{m_0}{V_0} \quad (2)$$

اصلاح حرارتی

اصلاح حرارتی بافت نخل خرما در سه مرحله اساسی انجام شد. نمونه‌های مذکور برای تیمار حرارتی در محفظه حرارتی (آون) در ۱۱ دمای متفاوت (۱۱۰ تا ۲۱۰ درجه سانتی‌گراد) در آزمایشگاه شیمی گروه صنایع چوب دانشگاه زابل اصلاح شدند. در مرحله اول، قبل از اینکه اصلاح حرارتی شروع شود، رطوبت نخل تا صفر کاهش پیدا می‌کند. از این رو خشک کردن نخل خرما طبق استاندارد ۱ - ISO ۱۳۰۶۱ در آون انجام شد [۲۲]. مدت‌زمان این مرحله تقریباً بستگی به میزان رطوبت اولیه بافت نخل دارد. مرحله دوم اصلاح حرارتی با درجه حرارت نهایی از دمای $120 \text{ }^\circ\text{C}$ تعریف شده و با حفظ دما در محفظه حرارت (آون)، عملیات اصلاح

خصوصیات فیزیکی (رطوبت و دانسیته)

برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی، نمونه‌های مکعبی به ابعاد $20 \times 20 \times 20$ میلی‌متر از پنج محل در امتداد قطر تنه از ۳ ارتفاع (پایین، میانی و بالا) از درخت نخل تهیه شد. از بین آن‌ها سه مکعب به صورت تصادفی انتخاب شدند. خشک کردن چوب به‌خاطر بادهای گرم و خشک زابل تا هشت درصد امکان‌پذیر است. قطعات تنه نخل تا رسیدن به رطوبت (۸/۶) درصد در فضای کارگاه دسته‌بندی شدند. نمونه‌های تر برای حفظ رطوبت در کیسه پلاستیکی و در یخچال نگهداری شدند. برای تعیین جرم حجمی، نمونه‌ها در حالت کاملاً خشک (D_0) و در هوای آزاد (D_h) طبق استاندارد (ISO ۳۱۳۱) و بر اساس فرمول‌های زیر مورد ارزیابی قرار گرفتند. درصد رطوبت (MC) و دانسیته هر نمونه، قبل و بعد از اصلاح حرارتی، بر اساس استانداردهای ISO 13061-1 [۲۲] و ISO 13061-2 [۲۳] محاسبه شد، رابطه (۱) و (۲). در این معادله، M_0 جرم نمونه خشک، m_h جرم نمونه در حالت تعادل، V_h حجم

عملیات اصلاح و به‌منظور جلوگیری از سوختن بافت نخل در طول فرایند، از اسپری کردن آب برای تولید بخار استفاده شد. ایجاد بخار آب مانع وقوع فعل‌وانفعالات شیمیایی در داخل بافت نخل شده و معایب خشک‌کردن را به حداقل می‌رساند؛ در نهایت نمونه‌ها تا رطوبت ۴ تا ۷ درصد متعادل‌سازی شدند.

بر روی هر یک از نمونه‌های بافت نخل خرما به مدت دو ساعت انجام شد. شکل ۲ شکل ظاهری نمونه‌ها پس از عملیات اصلاح حرارتی (۱۱ درجه حرارت متفاوت) را نشان می‌دهد. این تیمارهای اصلاحی با حفظ دما در مدت‌زمان برابر انجام شد. مرحله سوم و نهایی، کاستن حرارت است. در دماهای بالای



شکل ۲- نمونه‌های آزمایشگاهی اصلاح حرارتی بافت نخل خرما

استیک و کلرید سدیم (NaClO_2) لیگنین از نخل خرما و هولو سلولز جدا سازی و تنشین شد.

ویژگی‌های آناتومی بافت نخل خرما

نمونه‌های نخل خرما قبل از اصلاح از یک ساقه سالم تهیه و برای جلوگیری از رشد قارچ، در هوای آزاد خشک شدند. برای برخی از نمونه‌ها، مواد در محلول (۱:۱:۲) ۹۵٪ اتانول: گلیسرول: آب، نرم شدند. روش‌های مختلفی برای آماده‌سازی استفاده شد. لایه‌های بسیار نازک از مقاطع عرضی و طولی نمونه‌ها با میکروتوم کشویی، برداشته شدند. نمونه‌ها با سافرانین رنگ‌آمیزی شدند. لام‌های تهیه‌شده به کمک میکروسکوپ دوربین‌دار در آزمایشگاه آناتومی دانشگاه تهران عکس‌برداری انجام شد. بعد از آماده‌سازی سطح مقطع نخل، در نهایت تصاویر ماکروسکوپی نیز تهیه گردید.

طیف‌سنجی FTIR-

طیف‌سنجی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه FT-IR مدل ۱۵۴ MB-Bomem به دست آمد. برای این منظور، آرد چوب از نمونه‌های

ترکیب شیمیایی نخل

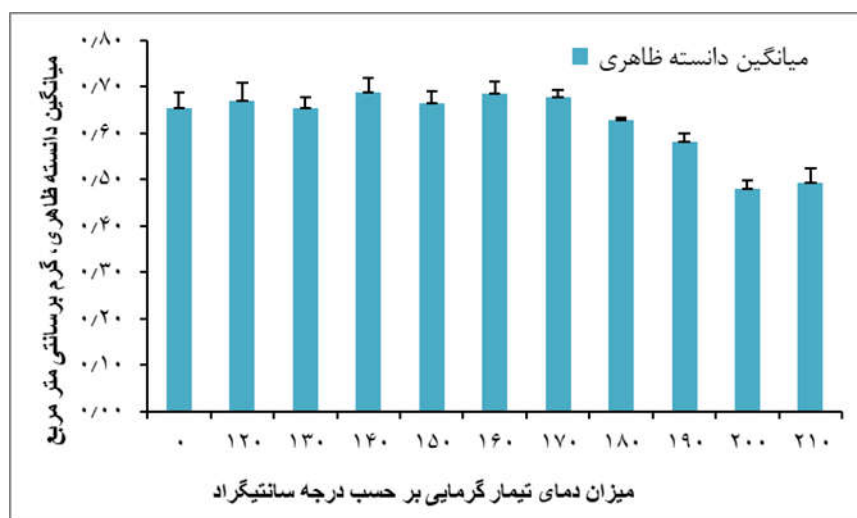
برای اندازه‌گیری ویژگی‌های شیمیایی بافت نخل، ابتدا دیسکی از تنه آن تهیه و دیسک‌ها تبدیل به تراشه‌های کوچک‌شده و در نهایت این تراشه‌ها در یک آسیاب آزمایشگاهی به آرد چوب تبدیل شدند. در این تحقیق، آرد موردنیاز بر اساس استاندارد TAPPI آیین‌نامه T257 cm-85، برای آزمایش‌ها آماده شد. میزان مواد استخراجی چوب نخل بر اساس استاندارد TAPPI - آیین‌نامه T204cm-88، اندازه‌گیری شد. مطابق این آیین‌نامه، از ترکیب حلال‌های استون و اتانول با نسبت یک حجم اتانول، دو حجم استون، برای بیرون‌کشیدن مواد استخراجی از نخل استفاده شد. درصد سلولز با استخراج سلولز مطابق روش کروشنر - هافر به کمک اسید نیتریک ۶۵ درصد و الکل اتانول ۹۶ درصد در سه مرحله انجام شد. تعیین درصد لیگنین از بافت تنه نخل بر طبق استاندارد TAPPI آیین‌نامه T222 om-98، انجام شد. مطابق این آیین‌نامه حلال موردنیاز برای استخراج لیگنین اسیدسولفوریک ۷۲ درصد تعیین شد. در این روش، طی چند مرحله با کمک اسید

بحث و نتایج

دانسیته

تغییرات در میزان دانسیته نخل خرما عامل بسیاری از تفاوت‌ها در خواص فیزیکی و مکانیکی است؛ بنابراین سعی شد از قسمت مختلف تنه نخل خرما برای دانسیته انتخاب شود. بررسی نتایج تغییرات دانسیته به‌خاطر اصلاح حرارتی نخل خرما نشان داد، در دمای 160°C ، میانگین دانسیته برابر با مقدار $0/68 \text{ kg/m}^3$ می‌باشد و پایین‌ترین دانسیته در دمای اصلاح حرارتی 210°C با میانگین $0/49$ گرم سانتی‌متر مربع به دست می‌آید. دانسیته نمونه شاهد نخل خرما $0/63 \text{ kg/m}^3$ تعیین گردید. در شکل ۳ تغییرات دانسیته نمونه‌ها در دمای مختلف اصلاح آمده است.

تهیه‌شده از یک پیچ‌گوشتی برقی مجهز به مته با قطر ۳ میلی‌متر و به میزان عمق نفوذ ۲-۳ میلی‌متر در نمونه به دست آمد. آرد چوب به‌دست‌آمده برای انجام آزمون FT-IR در آون با دمای 103°C درجه سانتی‌گراد و به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند تا کمترین رطوبت را داشته باشند. سپس قرص‌هایی با قطر ۱۳ میلی‌متر توسط آرد چوب و KBr^{-1} ساخته شد. در نهایت طیف نمونه‌ها در محدوده طیفی $4000-500 \text{ cm}^{-1}$ - با قدرت تفکیک 4 cm^{-1} و تعداد ۱۱ اسکن تهیه شد. طیف‌ها با استفاده از نرم‌افزار Easy Bomem-Win ویرایش شدند.



شکل ۳- دانسیته نخل خرما بعد از اصلاح حرارتی در دماهای مختلف؛ دمای صفر درجه سانتی‌گراد، نشان‌دهنده دانسیته نمونه شاهد است.

دماهای مختلف با استفاده میکروسکوپ نوری بررسی شد (شکل ۴). پیش از اصلاح، بافت خرما از دسته‌های آوندی اولیه که در درون ملاتی از بافت‌های پارانشیمی قرار دارد، تشکیل شده است. در نخل خرما بعد از اصلاح حرارتی، جداره دیواره سلولی نرم شده بود که این امر احتمال چین‌خوردگی و ترک در دسته‌های آوندها را افزایش می‌دهد (شکل ۴). از طرف دیگر سلول‌های آوندی پیش از اصلاح باز و تمیز بودند؛ ولی پس از اصلاح حرارتی مواد تیره رنگی در داخل آوندها دیده شد که احتمالاً موادی

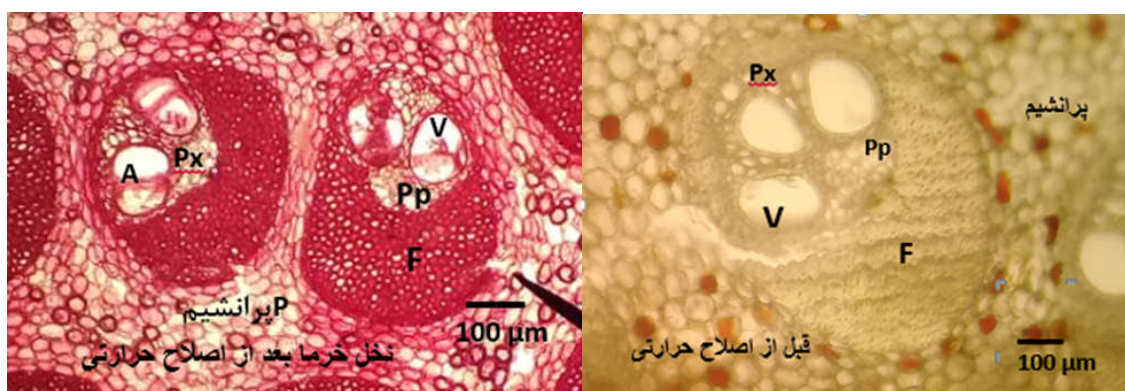
بررسی میکروسکوپی بافت نخل خرما پیش و

پس از اصلاح

نخل‌ها کامیوم ندارند و از این رو فاقد رشد پسین و چوب حقیقی‌اند. بافت نخل از دسته‌های آوندی اولیه درون بافت زمینه پارانشیمی تشکیل شده است. یک دسته آوندی شامل؛ آوند (V)، فیبر (F)، آبکش اولیه (Pp) و چوب اولیه (Px) است که در یک بافت زمینه‌ای پارانشیمی (p) احاطه شده است (تصویر ۴) [22]. ساختار میکروسکوپی نخل خرما قبل و بعد از اصلاح حرارتی در

طی عملیات حرارتی از نخل جدا شدند. این مواد جابه‌جا شده یکی از تأثیرات تیمار حرارتی محسوب می‌شود. این مواد می‌توانند عامل ثبات ابعادی و عدم ترشوندگی باشند؛ اما می‌توان با پرداخت کاری با رنده کاری از بین برد؛ بنابراین مقادیر بیشتر مواد استخراجی در نخل در حین عملیات اصلاح، نیز می‌تواند بر تغییرات رنگ آن تأثیر بگذارد. تأثیر جابه‌جایی شیمیایی بر اندازه تغییر رنگ در طول مرحله اصلاح حرارتی قابل مشاهده است.

قندی یا روغن بودند. بررسی میکروسکوپی عناصر سلولی با تهیه مقاطع میکروسکوپی و به‌وسیله میکروسکوپ نوری نشان داد که نخل تیمار شده حساس به شکاف درونی (Collapse) در شرایط تیمار بود. بر اثر تیمار حرارتی ممکن است مواد استخراجی از دیواره سلولی خارج شده و درون حفره آوندی رسوب کرده باشد. همچنین ممکن است تیمار حرارتی باعث واکنش‌های شیمیایی شده و ساختار مواد استخراجی را تغییر داده باشد. در اثر تیمار، مقادیر بیشتر مواد استخراجی مانند موم‌ها، چربی‌های نخل در



تصویر ۴- آناتومی نخل خرما قبل اصلاح حرارتی و بعد از اصلاح

سلولز و لیگنین را نشان می‌دهد. نمونه شاهد نخل خرما نمونه A0 در شکل نشان داده شده است جذب کششی پیوند هیدروژنی قوی (O - H) در 3411 cm^{-1} و جذب کششی برجسته C - H در حدود 2969 cm^{-1} (شکل 5) دیده می‌شود. جذب در 1243 cm^{-1} مربوط به حلقه سیرینجیل با کشش C-O در لیگنین و 1328 cm^{-1} مربوط به تراکم حلقه‌های سیرینجیل و گویاسیل هم‌زمان باهم است. (شکل 5) همچنین، خمش C-H در سلولز و همی سلولز و تغییر شکل C-H در لیگنین در ناحیه 1380 cm^{-1} قابل مشاهده است. همچنین ارتعاشات ساختار آروماتیکی C-H لیگنین و کربوهیدرات‌ها در طول موج 1425 cm^{-1} و تغییرات C-H در لیگنین و کربوهیدرات‌ها در طول موج 1064 cm^{-1} خود را نشان می‌دهد. در ناحیه 1047 cm^{-1} کشش C-O در سلولز و همی سلولز و تغییر شکل در صفحه C-H آروماتیکی، نوع گویاسیل درست شده است.

ترکیبات شیمیایی تنه نخل خرما

بسیاری از خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی نخل را می‌توان با مراجعه به ترکیبات شیمیایی پلیمری درک کرد. در اکثر موارد اصلاح نخل، این اجزای پلیمری تا حدی اصلاح می‌شوند. نتایج حاصل از اندازه‌گیری ترکیبات شیمیایی و تعیین درصد مواد تشکیل‌دهنده بافت نخل خرما بر اساس استانداردهای مربوطه در جدول ۱ آورده شده است.

طیف‌سنجی ATR-FTIR

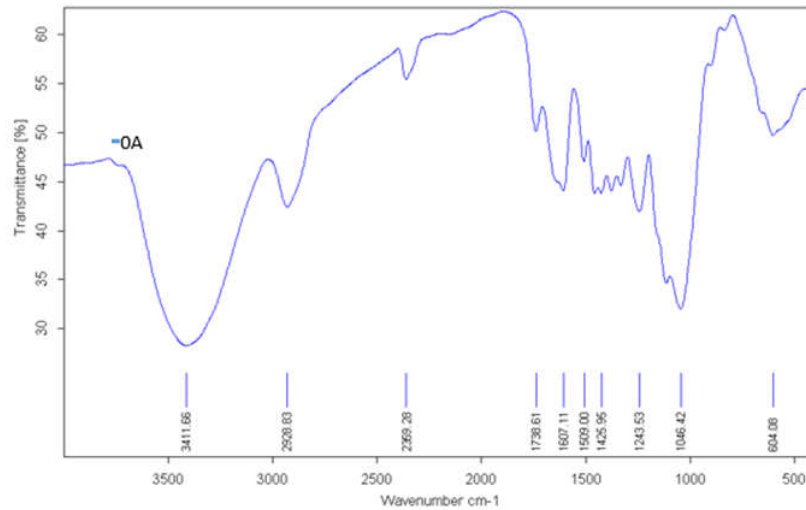
طیف‌سنجی FTIR پرکاربردترین فن در تجزیه و تحلیل گروه‌های عاملی است؛ زیرا این فن برای تعیین شدت پیوندها و گروه‌های عاملی خاص در ساختار پلیمری مناسب است. تغییر شدت باندهای طیف ATR-FTIR بین دامنه $5000\text{-}4000 \text{ cm}^{-1}$ وجود دارند شکل 5. اطلاعات به‌دست آمده از پیک‌ها ترکیباتی همچون سلولز، همی

جدول ۱- ترکیب شیمیایی تشکیل‌دهنده بافت نخل خرما

شاخص اندازه‌گیری شده	میزان (درصد)	استاندارد یا روش
تهیه آرد چوب	-	T257 cm-85
لیگنین	۲۲/۸۲	استاندارد آیین‌نامه T222om-98TAPPI
سلولز	۴۰/۲۱	روش کروشنر و هافر (اسید نیتریک غلیظ و الکل اتانول)
همی سلولز	۱۹/۵۲	روش کلرید
مواد استخراجی	۱/۲۵	استاندارد آیین‌نامه TAPPI۹om-۲۸۰T

جدول ۲- مشخصه پیک‌های طیف‌سنجی را نشان می‌دهد.

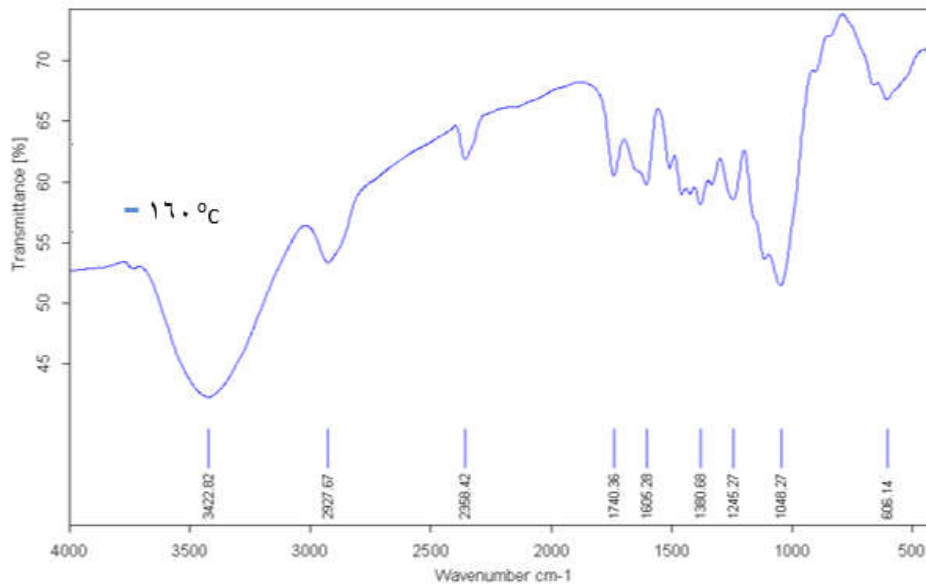
مشخصه	طول موج (cm-1)	توضیحات گروه‌های عاملی
سلولز - همی سلولز	1029	ارتعاشات کششی C-O
سلولز - همی سلولز	1056	ارتعاشات کششی C-C, C-O
سلولز - همی سلولز	1110	کشش نامتقارن C-O-C
سلولز - همی سلولز	1159	کشش نامتقارن C-C, C-O
لیگنین - سلولز - همی سلولز	1234	در ارتعاشات کششی C-O و خمش و گهواره‌ای CH ₂ سلولز و همی سلولز و خمش CH حلقه سرینجیل لیگنین
لیگنین - سلولز - همی سلولز	1273	در ارتعاشات کششی C-O و خمش و گهواره‌ای CH ₂ سلولز و همی سلولز و خمش CH حلقه سرینجیل لیگنین
لیگنین	1330	کشش pH-CH ₃ مربوط به حلقه سرینجیل
سلولز - لیگنین	۱۳۷۵	کشش آلیفاتیک C-H در متیل و فنل OH
سلولز - لیگنین	۱۳۷۵	خمش CH
سلولز - آمورف و بلور	۱۴۲۵	ارتعاشات ساختار آروماتیک ترکیب‌شده با C-H در صفحه خمش و کشش
سلولز	۱۴۲۸	حرکت قیچی وار CH ₂
لیگنین	۱۴۶۰	خمش غیرمتقارن CH ₃ در گروه‌های متوکسیل
لیگنین	۱۴۶۳	خمش نامتقارن در CH ₃
لیگنین	۱۵۰۹	لرزش حلقه آروماتیک
لیگنین	۱۵۱۲	خمش حلقه آروماتیک C=C
لیگنین	۱۵۱۴	ارتعاشات کششی C=C ساختار آروماتیکی
لیگنین	۱۶۰۸	ارتعاشات کششی C=C ساختار آروماتیکی
لیگنین	۱۶۵۵	کشش مزدوج C-O
همی سلولز	۱۷۳۶	ارتعاشات کششی C=O غیر مزدوج کتون آلدئید و کربوکسیل ها
	۱۷۳۸	مربوط به کشش C=O غیر مزدوج و مرتبط با گروه‌های کربنیل، آلدئید و کتون موجود در لیگنین و همی سلولزها (زایلان)
لیگنین - سلولز - همی سلولز	۲۸۴۱	ارتعاشات کششی متقارن C-H مرتبط با متیل و متیلن
لیگنین - سلولز - همی سلولز	۲۹۳۴	ارتعاشات کششی متقارن C-H مرتبط با متیل و متیلن
سلولز - همی سلولز	۳۴۲۱	ارتعاشات کششی O-H



شکل ۵- طیف نمونه A۰ (شاهد) اصلاح نشده

سلولز و همی سلولز و سایر پیک‌های مختلف را می‌توان به حرکت کششی متقارن و نامتقارن پیوندهای O-C و C-C نسبت داد. همچنین، خمش C-H در سلولز و همی سلولز و تغییر شکل C-H در لیگنین در ناحیه 1380 cm^{-1} تشکیل یافته است. این پیک تغییرات در دمای 160°C قابل مشاهده است. از طرف دیگر اطلاعات به دست آمده طیف‌ها (شکل ۶) مشخص کرد که تخریب سلولز و همی سلولز، بیشتر از لیگنین صورت گرفته که می‌توان این امر را به اثر اصلاح حرارتی در نخل نسبت داد.

تفاوت در شدت پیک‌ها در نمونه‌های اصلاح حرارتی نخل خرما با نمونه شاهد اصلاح حرارتی در این محدوده طول موج‌ها (شکل ۷) به وضوح نشان داده شده است. در بیشتر طیف‌ها و نمونه‌های اصلاح شده، مطابق شکل ۳ پیوند C = O جذب قوی در طیف‌های FT-IR cm^{-1} 1740 نشان می‌دهد و عدد موج دقیق به گروه عملکردی نظیر آلدهید بستگی دارد. 1740 cm^{-1} موقعیت ساختاری آن، با اعداد موج کمتر برای C = O مزدوج است. در پیک‌های شکل ۶ تغییر شکل H-C حلقه گلوکزی

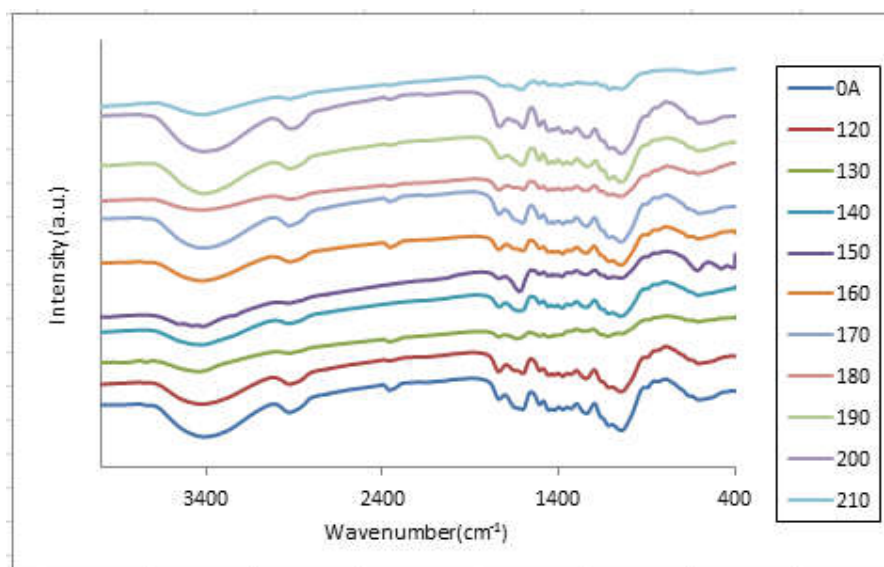


شکل ۶- طیف نمونه اصلاح شده دمای 160°C

در این تحقیق، اثرات عملیات اصلاح حرارتی بر ویژگی‌های شیمیایی نخل بسته به گام‌های دمایی، متفاوت نشان داد. طیف‌های ATR-FTIR داده‌های متعلق به اجزای اصلی نخل نشان می‌دهد نمونه‌های تیمار شده در دمای بالا (۲۰۰ درجه سانتی‌گراد) با نمونه‌های اصلاح شده در دماهای پایین (۲۰۰ درجه سانتی‌گراد) که در شکل ۷ نشان داده شده است، متفاوت است. لازم به ذکر است که به خاطر حجیم بودن تحلیل طیف‌ها از آوردن بعضی از طیف‌ها صرف‌نظر شد. چون هدف تحقیق انتخاب بهینه و مناسب‌ترین دما بود در نتیجه بیشتر در روی دمای 160°C متمرکز شد.

اثر تغییرات شیمیایی بر اساس طیف ATR-FTIR نمونه‌های نخل خرما اصلاح شده با حرارت در ارتباط با OH سلولز، گروه‌های عملکردی و ساختار آروماتیک لیگنین است.

نتایج نشان می‌دهد اصلاح حرارتی پیوندهای لیگنین (عمدتاً β -O-4) و گروه‌های متوکسیل را می‌شکنند و لیگنین را در دماهای زیاد سفت می‌کند. مقدار بیشتر مواد استخراجی در نخل عملیات اصلاح حرارتی شده نیز می‌تواند بر رنگ آن تأثیر بگذارد؛ بنابراین، فهمیدن تأثیر تغییرات شیمیایی بر رنگ نخل (شکل ۴) در طول اصلاح حرارتی برای افزایش کاربرد نخل اصلاح شده مفید خواهد بود.



تصویر ۷- مقایسه باندهای طیف ATR-FTIR در دماهای مختلف

تغییرات در میزان دانسیته با تغییر عواملی نظیر ضخامت دیواره سلولی، تعداد و پراکنش و قطر حفرات دسته‌های آوندی و همچنین ضخامت دیواره سلول‌های پارانشیمی تعیین می‌شود. نتایج مطالعات طارمیان و همکاران (۲۰۱۳) نشان می‌دهد که میانگین مساحت حفرات آوندی به طور فاحشی در ناحیه مرکز تنه بیشتر از ناحیه پوست بود. بیشترین مقدار دانسیته پایه در نزدیکی مرکز تنه و کمترین مقدار در نزدیک پوست مشاهده شد [۱۷]. مقدار دانسیته پایه در نزدیکی مرکز حدود $1/6$ برابر آن در نزدیکی پوست بود. اختلاف معنی‌داری بین مقادیر

نتیجه‌گیری

بررسی آناتومی بافت نخل در تیمار اصلاحی 160°C نشان داد که پس از تیمار حرارتی، لکه‌های سیاه در حفرات آوندی ایجاد شده و بافت ترک برمی‌دارد. این اصلاح منجر به تغییرات اندک در ساختار مورفولوژیکی می‌گردد. از دیگر نتایج این تحقیق می‌توان به اصلاح حرارتی در محدوده دمای 140°C الی 160°C اشاره کرد که منجر به افزایش دانسیته به مقدار 0.168 gr/cm^3 در بافت نخل خرما گردید؛ اما با ادامه افزایش اصلاح حرارتی، دانسیته کاهش یافت. علاوه بر اثر اصلاح حرارتی،

دانسیتة پایه نمونه‌ها در نزدیک به پوست، میانی و نزدیک به مرکز تنه مشاهده شد.

اصلاح حرارتی نخل خرما یک روش مناسب و جایگزین سازگار با محیط‌زیست، برای تقویت و بهبودبخشیدن به چندین خصوصیات بدون استفاده از مواد شیمیایی است. 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 [۱۳]. گروه‌های کربنیل و کربوکسیل جدید در نتیجه اکسیداسیون تشکیل می‌شوند. پیوندهای لیگنین (عمدتاً β -O-4) و گروه‌های متوکسیل را می‌شکند در نتیجه لیگنین در دماهای بالاتر سفت‌تر می‌شود [۱۴]. استرهایی که تشکیل شده‌اند عمدتاً به سفت شدن لیگنین مرتبط هستند. همچنین استری شدن گروه‌های هیدروکسید باعث کاهش رطوبت نخل و در نتیجه بهبود پایداری ابعادی و دوام آن می‌شود. از طرفی تغییراتی که پس از عملیات اصلاح حرارتی اتفاق می‌افتد، نشان از واکنش و بیشتر شدن لیگنین است.

نتایج بررسی آنالیز شیمیایی بافت نخل خرما نشان داد، در اثر اصلاح حرارتی تغییرات شیمیایی زیادی در نخل رخ داده است. نتایج طیف‌سنجی نشان داد که در ناحیه 1046 cm^{-1} کشش C-O در سلولز و همی سلولز و تغییر شکل در صفحه C-H آروماتیکی، نوع گواپاسیل اتفاق افتاده است. باید توجه داشت یک جذب دوتایی از ارتعاشات کششی C-H در محدوده 2911 cm^{-1} و یک جذب کششی O-H قوی و گسترده در محدوده 3350 cm^{-1} متمرکز شده است که نشان‌دهنده تغییرات در افزایش دما در حین اصلاح حرارتی است. کمترین میزان تخریب لیگنین با توجه به اصلاح بهینه در دمای 160°C رخ داده است. همان‌طوری که در (شکل-۶) گزارش شده است، پیوندهای لیگنین (عمدتاً β -O-4) و گروه‌های متوکسیل از هم باز می‌شوند و لیگنین در دماهای بالا اصلاح حرارتی سفت می‌شود [۱۴]. از داده‌های طیف‌ها می‌توان نتایج خوبی مشاهده کرد که یک جذب دوتایی از ارتعاشات کششی C-H در محدوده 2927 cm^{-1} و یک جذب کششی O-H قوی و گسترده در محدوده 3420 cm^{-1} در دمای 160°C متمرکز شده است که نشان‌دهنده

تغییرات در افزایش دما و در ارتباط با OH سلولز، گروه‌های عاملی و ساختار لیگنین است. به‌طور کلی نتایج حاکی از آن است که کمترین میزان تخریب لیگنین به ترتیب در دمای 140°C تا 160°C رخ داده است. مطالعات Yin J و همکاران (2017)، از دست‌دادن ساختار آروماتیک C = O در دمای 160°C و بالاتر ثبت شده است [25]. بنابراین تغییراتی که پس از عملیات اصلاح حرارتی اتفاق می‌افتد، نشان از بیشتر شدن واکنش و سفتی لیگنین است. محققان معتقد هستند اصلاح حرارتی باعث افزایش محتوای نسبی مواد استخراجی، لیگنین و سلولز می‌شود [۱۳]. اثرات عملیات اصلاح حرارتی بر پیک‌های کربوهیدرات و لیگنین در طی اصلاح با دماهای مختلف متفاوت است. اما ترکیبات نسبی همی سلولز در نخل به دلیل افزایش دمای اصلاح کمی محسوس است [۱۳]. بنا به گزارش سایر محققان در دمای اصلاح، به‌ویژه 210°C تأثیر قابل توجهی بر ترکیبات شیمیایی و مقاومت خمشی چوب پاداوک داشت. تغییر تا دمای 180°C باعث کاهش قابل توجهی در مقاومت خمشی نمی‌شود، اما با اصلاح نمونه‌ها در دمای 210°C درجه سانتی‌گراد، کاهش استحکام و مقاومت سختی قابل توجه بود [۱۶]. در دماهای بیشتر مطابق شکل ۴ اکثر طیف‌ها حذف شدند؛ بنابراین ساختار ماده هم حذف شده است.

هرچند در دمای بالاتر تخریب لیگنین شروع می‌شود؛ اما لیگنین در برابر تخریب گرمایی کمی مقاوم‌تر است، در تحقیقات محققین آمده، با افزایش نسبی محتوای لیگنین در اصلاح با حرارت مشهود است، پیوندهای لیگنین (عمدتاً β -O-4) و گروه‌های متوکسیل شکافته می‌شوند و لیگنین در دماهای بالاتر متراکم می‌شود [۱۴]. به عبارت دیگر تغییرات در باندهای نمونه اصلاح حرارتی نشان‌دهنده واکنش‌پذیری و سفتی در لیگنین و تغییرات میزان گروه‌های عاملی هیدروکسیلی در سلولز است. از طیف‌های به‌دست‌آمده می‌توان به تخریب همی سلولزها که منجر به کاهش گروه‌های هیدروکسیل آزاد و تغییر پلی‌ساکاریدها و لیگنین اشاره کرد. استری شدن گروه‌های هیدروکسیل باعث کاهش مقدار رطوبت و در نتیجه بهبود پایداری ابعادی و دوام بافت نخل می‌شود؛ بنابراین، برای کاربردهای مکانیکی و بهبود این ویژگی‌ها نیاز به اصلاح

تغییرات اصلاحی، بافت نخل را به‌منظور استفاده در آرایه‌گری داخلی و مبلمان بعضاً هم برای مصارف خارجی به‌ویژه حفظ در برابر عوامل زیستی و شاید بیشتر از موارد که گفته شد کاربرد داشته باشد. چراکه توانایی نخل اصلاح‌شده در محیط زندگی بسیار گسترده خواهد بود. علاوه بر این، بیشتر فرآیندهای اصلاح سازگار با محیط‌زیست نیستند. اصلاح حرارتی، به‌عنوان یک روش اصلاح چوب سازگار با محیط‌زیست است [۱۱]. لذا مصارف نخل در پایان چرخه مصرف خود هم قابل بازیافت و استفاده مجدد هستند. این امر کمک به منابع چوبی و لیگنو سلولزی کشور است.

است [۱۲]. در طول عملیات اصلاح، به علت اینکه نخل دردمای بالا تقریباً 160°C درجه سانتی‌گراد حرارت داده می‌شود، زنجیره‌های قندی شکسته و اسیدهای داخل بافت نخل خرما تجزیه‌شده و یک محصول فاقد از هر نوع مواد شیمیایی و مغذی برای حشرات به وجود می‌آورد که سبب کاربرد نخل اصلاح‌شده در مکان‌های مختلف نظیر آرایه‌گری داخلی و مبلمان می‌شود.

کاملاً واضح است که گاهی اختلاف در بین تحقیقات مختلف وجود دارد و لذا رسیدن به نتیجه مطلوب همواره مشکل است. اما از نتایج به‌دست‌آمده این تحقیق اطلاعات ذی‌قیمتی در حوزه صنعت چوب می‌دهد. چون این

منابع

- [1] Adel, A. El-Shafei, A. Ibrahim, A. and 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.
- [2] Awad, S. Zhou, Y. Katsou, E. Li, Y. and 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.
- [3] Alawar, A. Hamed, A. M. and AlKaabi, K., 2009. Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement. *Composites Part B: Engineering*, 40(7), 601-606.
- [4] Tengberg, M. 2012. Beginnings and early history of date palm garden cultivation in the Middle East. *Journal of Arid Environments*, 86 139-147.
- [5]. Ramle, S.F.M. Sulaiman, O. Hashim, R. Arai, T. and Kosugi, A., 2015. Characterization of parenchyma and vascular bundle of oil palm trunk as function of storage time. *Lignocellulose...*44-33:1
- [6] Fathi, L. Bahmani, M. Saadat Nia, M. A. Poursertip, L. and 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.
- [7] Jahan Letibari, L. hosenzadeh, a, noubakhsh, A. Kargarfard, A. And Golbabaie, 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)
- [8] Hossein Khani, 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)
- [9] Hill, C. Altgen, M. and Rautkari, L., 2021. Thermal modification of wood—A review: Chemical changes and hygroscopicity. *Journal of Materials Science*, 1-34.
- [10]. Kacalkova, D. Kubovsky, I. Ulbrikova, N. and Kaelk, F., 2020. The Impact of Thermal Treatment on Structural Changes of Teak and Iroko Wood Lignins. *Applied Sciences*, 10(14), 5021.

- [11] Lee, S. H. Ashaari, Z. Ang, A. F. and Halip, J. A., 2017. Dimensional stability of heat oil-cured particleboard made with oil palm trunk and rubberwood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 75(2), 285-288.
- [121] Lee, S. H. Ashaari, Z. Wei, C. L. Halip, J. A. Ang, A. F. Tan, L. P. Chin, K. L. and Tahir, P. M., 2018. Thermal treatment of wood using vegetable oils: A review. *Construction and Building Materials* 181.408–419
- [12] Ali, M. Abdullah, U. H. Ashaari, Z. Hamid, N. H. and Hua, L. S., 2021. Hydrothermal modification of wood: A Review. *Polymers*, 13(16), 2612.
- [13] Gaff, M. Kačík, F. and Gašparík, M., 2019. Impact of thermal modification on the chemical changes and impact bending strength of European oak and Norway spruce wood. *Composite Structures*.
- [14] Sikora, A. Kacik, 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.
- [15] Kamboj, G. Gašparík, M. Gaff, M. Kačík, F. Sethy, A. K. Corleto, R. and Macků, J., 2020. Surface quality and cutting power requirement after edge milling of thermally modified meranti (*Shorea spp.*) wood. *Journal of Building Engineering*, 101213.
- [16] Corleto, R. Gaff, M. Niemz, P. Sethy, A. K. Todaro, L. Ditommaso, G. Razaeei, F. Sikora, A. Kaplan, L. Das, S. Kamboj, G. Gašparík, M. Kačík, 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.
- [17] Tarmian, A. Forouzan, Z. Sepehr, A. GHolamiyan, H. And children R., 2013. Investigation of some physical characteristics, anatomy and drying behavior of boards obtained from old palm trees (*Phoenix dactylifera L.*) in Bam city. *Iranian Journal of Wood and Paper Sciences* 3 (28): 508- 498. (In Persian)
- [18] Gholamiyan, H. The possibility of designing and constructing standard tables and chairs with palm trunk. 2020. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, Vol. 10, No. 4, Winter. (In Persian)
- [19] Zhang, J. Koubaa, A. Xing, D. Liu, W. Wang, Q. Wang, X. M. and Wang, H., 2020. Improving lignocellulose thermal stability by chemical modification with boric acid for incorporating into polyamide. *Materials and Design* 191, 108589
- [20] He, Zh. Wang, Zh. Qu, L. Qian, J. and Yi, S., 2019. Modeling and simulation of heat-mass transfer and its application in wood thermal modification. *Results in Physics*, Volume 13, 102213
- [21] Gholamiyan, H. Gholampoor, B. and 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)
- [22] ISO 13061-2. 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.
- [23] ISO 13061-1. Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood samples - Part 1: Determination of moisture content for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland; 2014.
- [24] Klotz, L. H., 1978. Form of the perforation plates in the wide vessels of metaxylem in palms. *Journal of the Arnold Arboretum*, 59(2), 105-128.
- [25] Yin, J., Yuan, T., Lu, Y., Song, K., Li, H., Zhao, G., and Yin, Y., 2017. Effect of compression combined with steam treatment on the porosity, chemical composition and cellulose crystalline structure of wood cell walls. *Carbohydrate polymers*, 155, 163-172.

The effect of heat treatment on the physical, chemical and anatomical characteristics of date palm wood

Abstract

This study was conducted to investigate the effects of heat treatment on the physical, chemical, and anatomical properties of date palm tissue. After cutting the trunk of the date palm, heat modification was performed at ten different temperatures ranging from 120 to 210 degrees Celsius for two hours to determine the optimal temperature. Microscopic examination and standard tests for density, chemical properties, and FTIR-spectroscopy were conducted to evaluate the changes. Anatomical examination revealed cracks and black spots in the vascular cavities after thermal modification at the optimal temperature of 160 °C. This modification resulted in fundamental changes to the morphological structure of the tissue. Modification within the temperature range of 160 °C caused slight changes in the density of date palm wood, but at temperatures higher than this, the density significantly decreased. FTIR spectroscopic analysis of date palm tissue revealed chemical changes after modification, including variations in the amount of hydroxyl functional groups in cellulose and the progression of the lignin condensation reaction. Thermal modification of palm tissue enhances its functional properties and can be considered an environmentally friendly method to make palm suitable for the furniture industry.

Keywords: Date palm, thermal modification, chemical properties, anatomical properties, infrared spectroscopy.

M. Maleki Galandouz¹
A. Bayatkashkoli²
S.R. Farrokhpayam³
M. R. Hosseini-Tabatabaei⁴
H. Gholamiyan⁵

¹ Ph.D. Student, Wood and Paper Science and Technology Group, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, I.R. Iran

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

³ Assoc. Prof. Wood and Paper Science and Technology Group, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, I.R. Iran

⁴ Assistant professor, Department of Civil Engineering, The College of Technology and Engineering, University of Zabol, Zabol, I.R. Iran

⁵ Assistant Professor, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran

Corresponding author:
Maleki.mostafa@uoz.ac.ir
ali.bayatkashkoli@uoz.ac.ir

Received: 2023/03/15

Accepted: 2023/06/12