

## ارزیابی ویژگی‌های کاربردی چوب نراد اصلاح گرمایی شده با فرایند رتفیکاسیون

سامان قهری<sup>۱\*</sup>، محمدرضا عبده<sup>۲</sup> و فرشید عبدلی<sup>۳</sup>

۱- نویسنده مسئول، استادیار، بخش تحقیقات چوب و فراورده‌های آن، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران، پست الکترونیک: Sghahri@gmail.com

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

تاریخ پذیرش: خرداد ۱۴۰۰

تاریخ دریافت: اردیبهشت ۱۴۰۰

### چکیده

در این پژوهش، چوب نراد با روش رتفیکاسیون اصلاح گرمایی شد و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چوب نراد اصلاح گرمایی شده ارزیابی گردید. برای این منظور، ابتدا نمونه‌هایی از چوب نراد به ابعاد  $6 \times 6 \times 100 \text{ cm}^3$  (طول، شعاعی، مماسی) تهیه شدند. پس از تعیین رطوبت نمونه‌های چوبی درون محفظه استیل تیمار گرمایی قرار گرفتند و در محیط گاز نیتروژن در دماهای ۱۸۰، ۲۰۰ و ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ ساعت تیمار شدند. ویژگی‌های فیزیکی مانند دانسیته، جذب آب، واکشیدگی حجمی، ثبات ابعاد و ویژگی‌های مکانیکی مانند مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته، مقاومت برش موازی الیاف، مقاومت فشار موازی الیاف و مقاومت به ضربه چوب‌های تیمار شده بررسی شدند. نتایج نشان دادند که با افزایش دمای تیمار در اصلاح گرمایی چوب نراد مقادیر جذب آب و واکشیدگی کاهش و ثبات ابعاد در چوب‌های تیمار شده افزایش یافتند. دانسیته، مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته، مقاومت برش موازی الیاف، مقاومت فشار موازی الیاف و مقاومت به ضربه نیز با اصلاح گرمایی چوب نراد کاهش نشان دادند.

واژه‌های کلیدی: فراورده‌های چوبی، اصلاح چوب، ثبات ابعاد.

### مقدمه

چوب با ویژگی‌های مناسب برای کاربردهای مهندسی مانند دانسیته پایین‌تر نسبت به سایر مصالح ساختمانی، هدایت حرارتی پایین، زیست‌تخریب‌پذیری و ویژگی‌های مکانیکی مطلوب به‌عنوان یک ماده طبیعی جایگاه ویژه‌ای در بین مواد و مصالح ساختمانی دارد. اما در کنار مزایای بیان شده، ویژگی رطوبت‌پذیری چوب یکی از مهمترین چالش‌های آن برای استفاده از آن به‌عنوان یک ماده ساختمانی است. خاصیت رطوبت‌پذیری در چوب موجب تغییر ابعاد آن در شرایط سرویس می‌شود و مقاومت‌های مکانیکی چوب را نیز کاهش می‌دهد.

همچنین افزایش رطوبت چوب می‌تواند فراهم‌کننده بستر مناسب برای رشد قارچ‌ها و حشرات شود. بنابراین برای استفاده از چوب به‌عنوان یک ماده ساختمانی ضروری است که ویژگی‌های کاربردی آن مانند ویژگی رطوبت‌پذیری و ثبات ابعادی آن کنترل شوند. بر این اساس یکی از روش‌های کنترل ویژگی رطوبت‌پذیری چوب استفاده از روش‌های اصلاح گرمایی است. روش‌های اصلاح گرمایی چوب از فناوری‌های دوست‌دار محیط‌زیست هستند که با ایجاد تغییرات شیمیایی در چوب و کاهش نقطه اشباع الیاف (FSP<sup>۱</sup>) سبب کنترل ویژگی رطوبت‌پذیری چوب و افزایش ثبات ابعادی و ارزش افزوده آن

1- Fiber Saturation Point

حرارت بالا به یون‌های هیدرونیوم تبدیل می‌شود و با حمله به بسپارهای قندی مانند همی‌سلولزها و تجزیه آنها و تشکیل اسیدهای آلی (مانند اسید فرمیک و اسید استیک) و حمله این اسیدها به ساختارهای بسیاری دیواره‌های سلولی، پلی‌ساکاریدها را هیدرولیز می‌نمایند. پروتون‌های تشکیل شده از آب (یون‌های هیدرونیوم)، واکنش‌های استیل‌زدایی و هیدرولیز را افزایش می‌دهند (Liu, 2008; Popescu & Popescu, 2013; Hajihassani et al., 2018).

امروزه روش‌های مختلفی برای اصلاح گرمایی چوب استفاده می‌شوند. یکی از روش‌هایی که برای اصلاح گرمایی چوب استفاده می‌گردد روش رتیفیکاسیون است. این فرایند نوعی اصلاح گرمایی ملایم است که توسط شرکت NOW توسعه یافت و در سال ۱۹۹۷ با نام تجاری (چوبه رتیفه<sup>۲</sup>) برای تولید صنعتی ثبت گردید. در این روش از گاز نیتروژن برای اصلاح گرمایی چوب استفاده می‌شود. برای اصلاح گرمایی چوب در محیط گاز نیتروژن، ابتدا چوب تا حداکثر ۱۲ درصد رطوبت خشک می‌شود و بعد از آن در داخل سیلندر حاوی گاز نیتروژن قرار می‌گیرد و دما تا ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد (Bytner et al., Vernois, 2001). از مزایای روش رتیفیکاسیون نسبت به سایر روش‌های اصلاح گرمایی می‌توان کیفیت بالای چوب‌های اصلاح شده با این روش و امکان کنترل فرایند و ماده خام طی اصلاح گرمایی به روش رتیفیکاسیون را بیان کرد (Vernois, 2001). یکی دیگر از تفاوت‌های این روش با سایر روش‌های اصلاح گرمایی، عدم حضور اکسیژن در هنگام تیمار گرمایی است. این عامل سبب می‌شود میزان تخریب چوب در مقایسه با سایر روش‌های اصلاح گرمایی کاهش یابد، زیرا حضور اکسیژن در طی فرایند اصلاح گرمایی عامل تسریع کننده تخریب چوب است (Bytner et al., 2021).

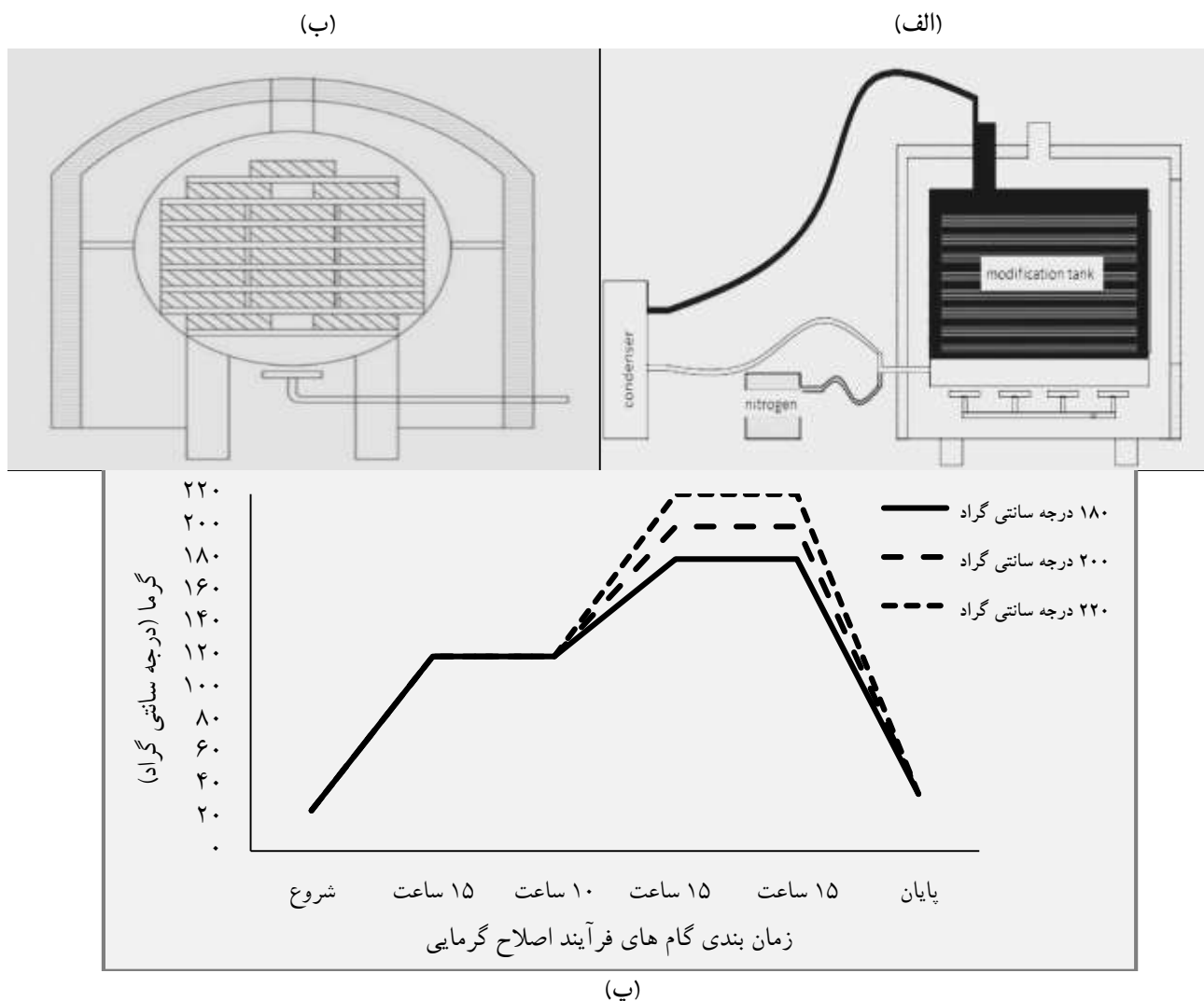
نتایج پژوهشی روی ویژگی‌های چوب گونه صنوبر (*Populus nigra*L.) اصلاح شده با روش رتیفیکاسیون در دماهای ۱۶۰، ۱۹۰ و ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد نشان دادند که

می‌شوند (Boonstr; Esteves et al., 2007; Shi et al., 2007; et al., 2006). از مزایای روش‌های اصلاح گرمایی چوب می‌توان به استفاده از چوب اصلاح شده در محیط‌های بیرونی و داخل ساختمان و مکان‌های با رطوبت بالا از جمله نماهای ساختمان، کفپوش‌ها، مبلمان شهری، مبلمان باغ، سونا و کاربردهای مشابه اشاره کرد. تاکنون روش‌های مختلفی برای اصلاح گرمایی چوب ابداع و استفاده شده‌اند. در این روش‌ها انتقال دهنده‌های گرمای (رساناهای گرما) مختلفی مانند آب داغ، بخار آب، انواع روغن‌های گیاهی و گاز نیتروژن استفاده شده‌اند (Welzbacher et al., Tjeerdsma & Militz, 2005; Mania & Gasiorek, 2020; Biswas et al., 2011; 2008; Bytner et al., 2021). در رابطه با تغییرات خواص چوب بعد از تیمار اصلاح گرمایی، محققان متعددی بیان کردند که خواص چوب‌های تیمار شده با توجه به نوع تیمار اصلاح گرمایی، ماده رسانای گرما و مدت زمان تیمار متفاوت است (Metsa; Kortelainen et al., 2006; Tanaomi et al., 2012; Abde Hajihassani et al., 2015; Popescu & Popescu, 2013; al., 2018). در کنار دستاورد اصلی و ارزشمند اصلاح گرمایی برای چوب، یعنی پایداری ابعاد در مجاورت رطوبت، سایر ویژگی‌های آن نیز با تیمارهای گرمایی تحت تأثیر قرار می‌گیرند. تغییر در ساختار شیمیایی چوب ضمن تأثیر مثبت بر پایداری ابعاد می‌تواند روی ویژگی‌های مکانیکی، ترکندگی سطح چوب، رنگ و کیفیت سطح آن نیز اثرگذار باشد. پیش‌تر محققان مختلفی در گزارش‌های علمی خود اشاره کرده‌اند که اصلاح گرمایی چوب در برخی موارد سبب افت ویژگی‌های مکانیکی مانند مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته و فشار موازی الیاف در آن می‌شود اما این اثرگذاری عمدتاً به نوع و شرایط تیمار اصلاح گرمایی و نوع گونه چوبی بستگی دارد (Kamdem et al., 2002; Sundqvist et al., 2006; Hajihassani et al., 2018). در اصلاح گرمایی چوب با استفاده از آب، اتصالات لیگنوسلولزی به وسیله یون‌های هیدرونیوم تشکیل شده از هیدرولیز آب مورد حمله قرار می‌گیرند. به عبارتی آب در درجه

شده‌اند و گزارش‌های زیادی در این زمینه‌ها وجود دارند. اما نتایج اندکی درباره روش اصلاح گرمایی چوب در محیط گاز نیتروژن و اثر آن بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چوب گزارش شده‌اند. از آنجایی که شدت تیمار و مقدار گرمای مورد استفاده در اصلاح گرمایی از مؤلفه‌های مهم و اثرگذار روی ویژگی‌های چوب هستند، هدف از این پژوهش ارزیابی اثر دماهای مختلف اصلاح گرمایی در محیط گاز نیتروژن روی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چوب نراد می‌باشد.

این روش اصلاح گرمایی به‌طور معنی‌داری رطوبت تعادل چوب ( $EMC'$ ) را کاهش می‌دهد و بر میزان ثابت ابعادی چوب می‌افزاید. همچنین مقدار  $EMC$  چوب صنوبر اصلاح شده در دمای ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد دو برابر کمتر از چوب اصلاح‌نشده ارزیابی شد (Bytner *et al.*, 2021).

البته تاکنون روش‌های مختلف اصلاح گرمایی چوب مانند روش اصلاح گرمایی، بخار-گرمایی و اصلاح با روغن داغ برای بهبود ثابت ابعادی چوب و فرآورده‌های چوبی استفاده



شکل ۱- اصلاح گرمایی در محیط گاز نیتروژن (الف) نمای محفظه استیل و سایر تجهیزات همراه، (ب) نحوه بارگذاری چوب‌آلات، (پ) دیاگرام فرآیند اصلاح گرمایی

## مواد و روش‌ها

برای این کار نمونه‌هایی سالم، راست تار و بدون معایب ظاهری از الوارهای چوب گونه نراد (*Abies ssp.*) به ابعاد  $100 \times 6 \times 6 \text{ cm}^3$  (طول، شعاعی، مماسی) موجود در بازار داخلی ایران تهیه و تا رسیدن به رطوبت ۱۲ خشک شدند.

اصلاح گرمایی چوب نراد در محیط گاز نیتروژن بعد از خشک شدن، نمونه‌های چوب با استفاده از چوب

دستک در درون محفظه‌ای از جنس استیل ضد زنگ قرار داده شدند. سپس هوای داخل مخزن با استفاده از سیستم خلأ تخلیه شد و پس از آن گاز نیتروژن به درون محفظه تزریق گردید. نمونه‌ها در سه سطح دمایی به ترتیب ۱۸۰، ۲۰۰ و ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد و با زمان نگهداری ۱۵ ساعت تیمار شدند. شکل ۱ نمای محفظه استیل، نحوه بارگذاری چوب-آلات و دیاگرام زمان‌بندی گام‌های مختلف فرایند اصلاح گرمایی را نشان می‌دهد.

جدول ۱- روابط مورد استفاده برای ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چوب‌های اصلاح گرمایی شده در محیط نیتروژن

شماره	رابطه	توضیحات
رابطه ۱	$\rho = \frac{m}{v}$	$\rho$ : دانسیته خشک ( $\text{g/cm}^3$ ); $m$ وزن ( $\text{g}$ ) و $v$ : حجم ( $\text{cm}^3$ )
رابطه ۲	$W_A = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100$	$W_A$ : جذب آب (%); $W_1$ : وزن نمونه بعد از خشک شدن در آون ( $\text{g}$ ); $W_2$ : وزن نمونه بعد از غوطه‌وری در آب ( $\text{g}$ )
رابطه ۳	$S = \frac{L_2 - L_1}{L_1} \times 100$	$S$ : تغییر ابعاد (%); $L_1$ : ابعاد نمونه بعد از خشک شدن در آون ( $\text{mm}$ ); $L_2$ : ابعاد نمونه بعد از غوطه‌وری در آب ( $\text{mm}$ )
رابطه ۴	$ASE = \frac{S_u - S_t}{S_u} \times 100$	$ASE$ : بازدارندگی واکشیدگی (%); $S_u$ : واکشیدگی حجمی نمونه‌های تیمار نشده (%); $S_t$ : واکشیدگی حجمی نمونه‌های تیمار شده (%)
رابطه ۵	$MOE = \frac{L^3(P_{40\%} - P_{10\%})}{4WB^3(X_{40\%} - X_{10\%})}$	$MOE$ : مدول الاستیسیته ( $\text{GPa}$ ); $MOR$ : مدول گسیختگی ( $\text{MPa}$ ); $L$ : طول دهانه ( $\text{mm}$ ); $W$ و $B$ : عرض ( $\text{mm}$ ) و ضخامت ( $\text{mm}$ ); $X_{40\%}$ و $X_{10\%}$ : جابه‌جایی در ۴۰ درصد و ۱۰ درصد حداکثر بارگذاری ( $\text{mm}$ ); $P_{40\%}$ و $P_{10\%}$ : ۴۰ درصد و ۱۰ درصد حداکثر بارگذاری ( $\text{mm}$ ); $P_{max}$ : حداکثر بارگذاری.
رابطه ۶	$MOR = \frac{3P_{max}L}{2W.B^2}$	
رابطه ۷	$S = \frac{F}{A}$	$S$ : مقاومت به برش موازی با الیاف ( $\text{MPa}$ ); $F$ : حداکثر نیرو ( $\text{N}$ ); $A$ : سطح مقطع ( $\text{mm}^2$ )
رابطه ۸	$P = \frac{F}{A}$	$P$ : مقاومت به فشار موازی با الیاف ( $\text{MPa}$ ); $F$ : حداکثر نیرو ( $\text{N}$ ); $A$ : سطح مقطع ( $\text{mm}^2$ )
رابطه ۹	$I = \frac{F}{A}$	$I$ : مقاومت به ضربه ( $\text{J/m}^2$ ); $F$ : حداکثر نیرو ( $\text{N}$ ); $A$ : سطح مقطع ( $\text{mm}^2$ )

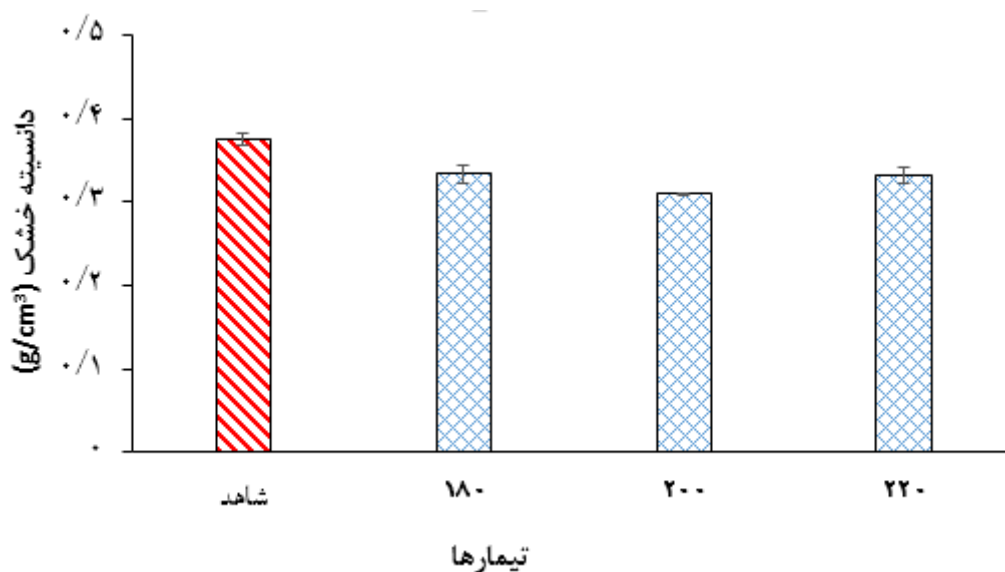
## ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی

ارزیابی قرار گرفتند. همچنین آزمون مقاومت به ضربه ایزود نمونه‌ها بر اساس استاندارد ۱۰-۲۵۶-ASTM انجام شد. همه روابط مورد استفاده برای ارزیابی مقادیر مؤلفه‌های ذکر شده در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

## نتایج

## ویژگی‌های فیزیکی

دانشیته: نتایج حاصل از تأثیر اصلاح گرمایی در محیط گاز نیتروژن بر دانشیته خشک چوب نراد در شکل ۲ نشان داده شده است. نتایج نشان دادند که اصلاح گرمایی موجب کاهش دانشیته خشک چوب نراد نسبت به نمونه شاهد می‌شود. همچنین مشاهده می‌گردد که تغییرات دانشیته خشک چوب در نمونه‌های اصلاح شده زیاد نیست. به عبارت دیگر طی تیمار اصلاحی در دماهای مورد بررسی (۲۲۰-۱۸۰ درجه سانتی‌گراد) افت دانشیته چوب نراد محسوس نمی‌باشد.



شکل ۲- اثر دمای اصلاح گرمایی به روش رتیفیکاسیون بر دانشیته خشک چوب نراد

اصلاح گرمایی موجب کاهش جذب آب و واکنشیدگی حجمی چوب نراد اصلاح شده گردید. نتایج نشان می‌دهند که میزان جذب آب پس از ۲ ساعت غوطه‌وری در آب برای نمونه

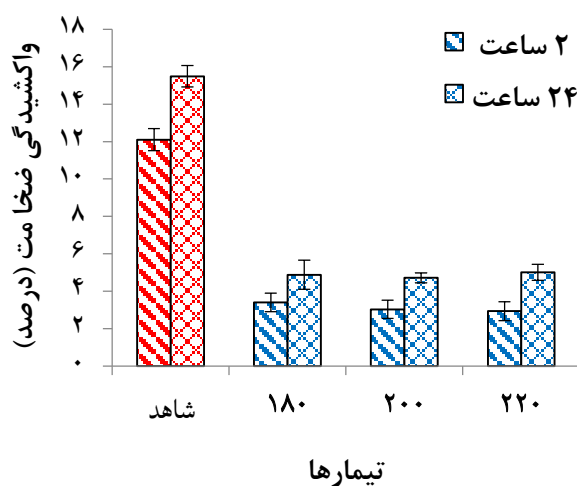
برای انجام آزمون‌های فیزیکی از استاندارد D-2395-ASTM استفاده شد. به طوری که نمونه‌هایی به ابعاد  $2 \times 2 \times 2$  cm<sup>3</sup> (طول، شعاعی، مماسی) برای آزمون‌های دانشیته، جذب آب، واکنشیدگی حجمی و ثبات ابعاد تهیه شدند. نمونه‌ها در آب مقطر به مدت ۲ و ۲۴ ساعت غوطه‌ور شدند. برای محاسبه دانشیته، جذب آب، واکنشیدگی حجمی و ثبات ابعاد از روابط ارائه شده در جدول ۱ استفاده شد.

## ارزیابی ویژگی‌های مکانیکی

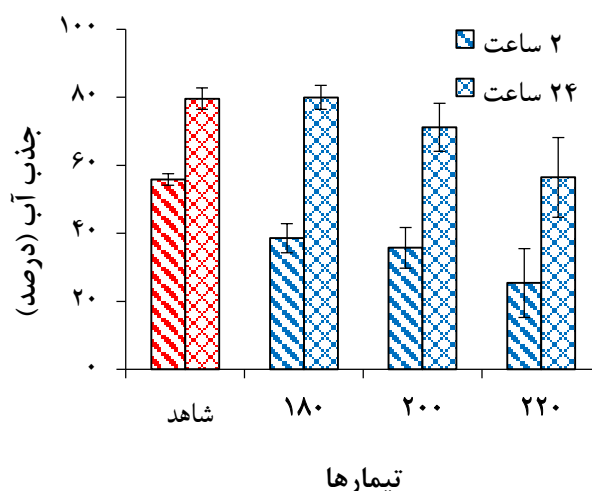
پس از متعادل‌سازی آزمون‌ها در دمای  $25 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی  $65 \pm 5$  درصد ویژگی‌های مکانیکی شامل آزمون خمش استاتیک (مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته)، مقاومت برش موازی الیاف و مقاومت فشار موازی الیاف بر اساس استاندارد ASTM D-143 مورد

جذب آب و واکنشیدگی حجمی: نتایج آزمایش جذب آب و واکنشیدگی حجمی چوب‌های نراد اصلاح شده و اصلاح نشده در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌گردد

به طوری که مقدار واکسیدگی حجمی در نمونه تیمار شده در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به نمونه شاهد پس از ۲ ساعت غوطه‌وری، حدود ۷۲ درصد کاهش نشان داد. اما بین دماهای مختلف تیمار (۱۸۰، ۲۰۰ و ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد) تفاوت محسوسی مشاهده نشد. همچنین نتایج حاصل از واکسیدگی حجمی پس از ۲۴ ساعت غوطه‌وری تغییرات مشابهی را با نتایج حاصل از ۲ ساعت غوطه‌وری در آب برای نمونه‌های آزمون نشان دادند. البته میزان واکسیدگی حجمی در نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت غوطه‌وری در تمامی تیمارها نسبت به مقادیر حاصل از ۲ ساعت غوطه‌وری افزایش نشان دادند.



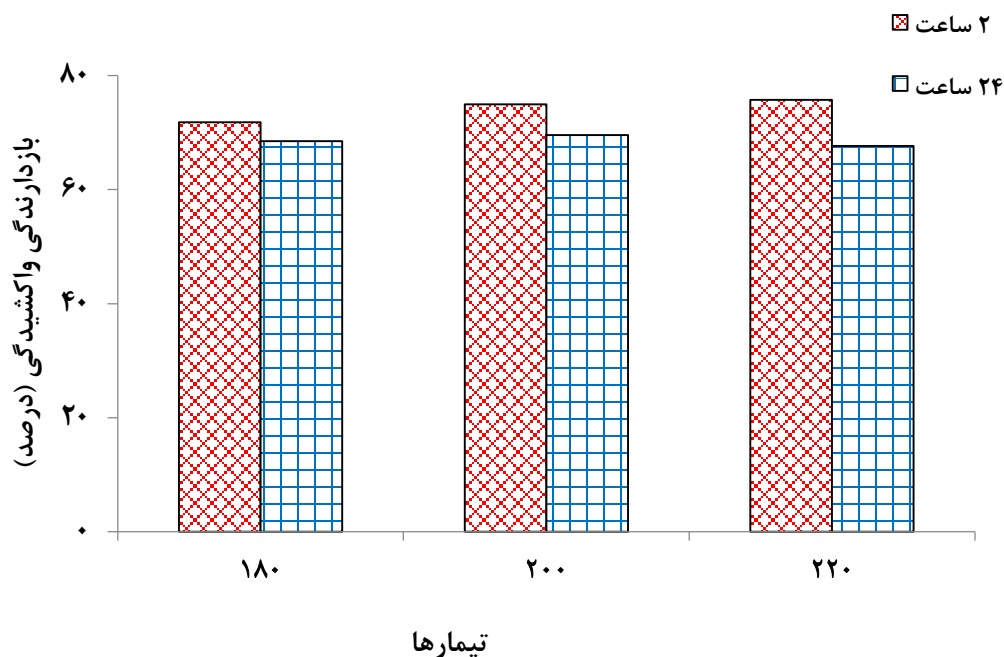
تیمار شده در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد حدود ۳۰ درصد کمتر از نمونه شاهد است. همچنین با افزایش دمای تیمار میزان جذب آب ۲ ساعت کاهش نشان می‌دهد. بیشترین کاهش جذب آب در نمونه‌های اصلاح شده در دمای ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد (حدود ۵۵ درصد) پس از ۲ ساعت غوطه‌وری در آب رخ داده است. البته تغییرات مشابهی برای جذب آب نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب نیز مشاهده شد. نتایج حاصل از ارزیابی مقادیر واکسیدگی حجمی نمونه‌های اصلاح شده و نمونه شاهد در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که تیمار اصلاحی انجام شده تأثیر مطلوبی بر مقادیر واکسیدگی حجمی چوب نراد دارد؛



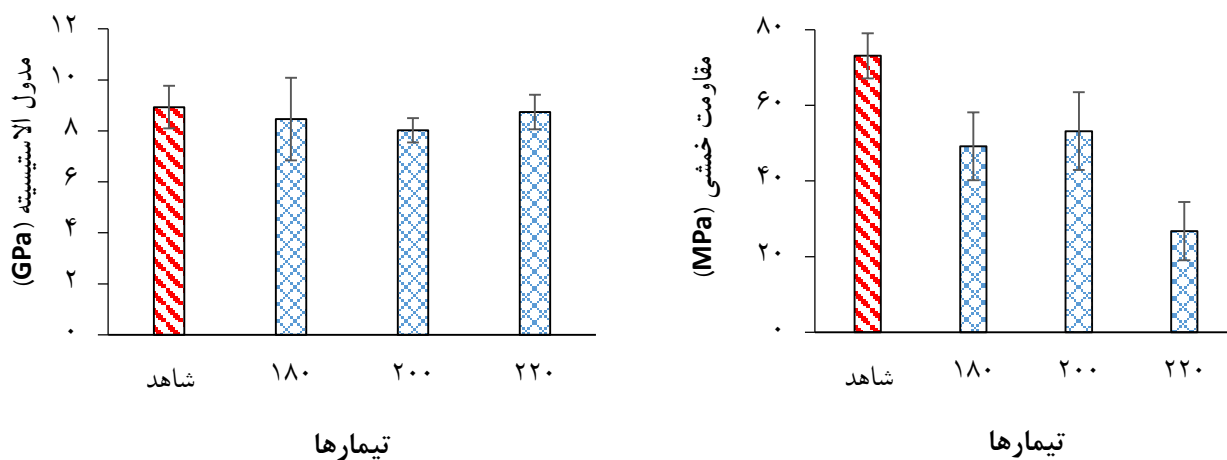
شکل ۳- اثر دمای اصلاح گرمایی به روش رتیفیکاسیون بر جذب و واکسیدگی حجمی در ۲ و ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب چوب نراد

تیمارهای اصلاح گرمایی افزایش ثبات ابعادی چوب و کاهش جذب آب است. نتایج نشان دادند که تیمار اصلاحی انجام شده سبب افزایش ثبات ابعادی در چوب نراد گردید. همچنین مشاهده شد که میزان این اثر در تیمارهای مختلف تقریباً مشابه است.

اثر ضد واکسیدگی (ثبات ابعادی): نتایج حاصل از تأثیر اصلاح گرمایی بر بازدارندگی واکسیدگی (ثبات ابعادی) چوب نراد پس از ۲ و ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. یکی از اثرهای مهم



شکل ۴- اثر دمای اصلاح گرمایی به روش رتیفیکاسیون بر بازدارندگی و اکشیدگی (ثبات ابعادی) در چوب نراد



شکل ۵- اثر دمای اصلاح گرمایی به روش رتیفیکاسیون بر مقاومت خمشی (MOR) و مدول الاستیسیته (MOE) چوب نراد

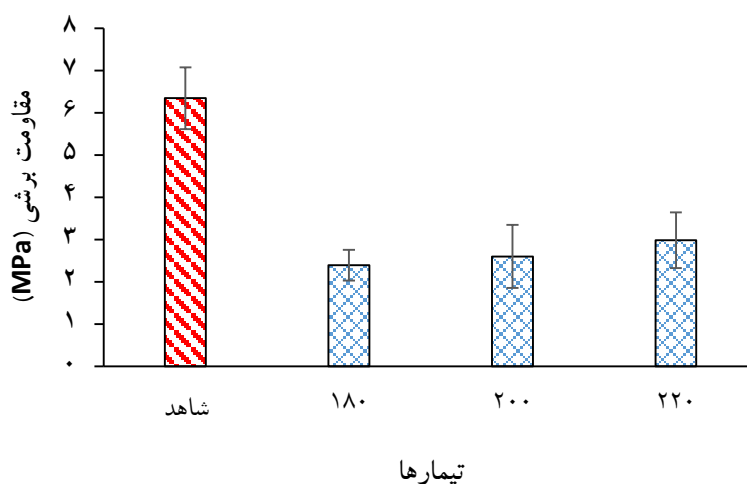
نشان داده شده‌اند. نتایج نشان دادند که افزایش دمای تیمار اصلاحی سبب کاهش مقاومت خمشی در نمونه‌های اصلاح شده می‌گردد. تیمار چوب نراد در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد سبب افت ۳۳ درصد مقاومت خمشی گردید.

### ویژگی‌های مکانیکی

مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته: نتایج حاصل از مدول الاستیسیته (MOE) و مقاومت خمشی (MOR) نمونه‌های چوب نراد اصلاح شده و اصلاح نشده در شکل ۵

سانتی‌گراد احتمالاً می‌تواند در نتیجه تخریب ساختار چوب و افت دانسیته ناشی از آن باشد.

مقاومت برشی: نتایج حاصل از تأثیر اصلاح گرمایی بر مقاومت برشی چوب نراد در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. نتایج نشان دادند که اصلاح گرمایی در تمامی دماهای مورد بررسی باعث کاهش مقاومت برشی در چوب نراد شده است؛ به طوری که مقدار مقاومت خمشی نمونه شاهد در مقایسه با نمونه تیمار شده در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد حدود ۶۲ درصد کاهش نشان داد.



شکل ۶- اثر دمای اصلاح گرمایی به روش رتیفیکاسیون بر مقاومت برش موازی الیاف چوب نراد

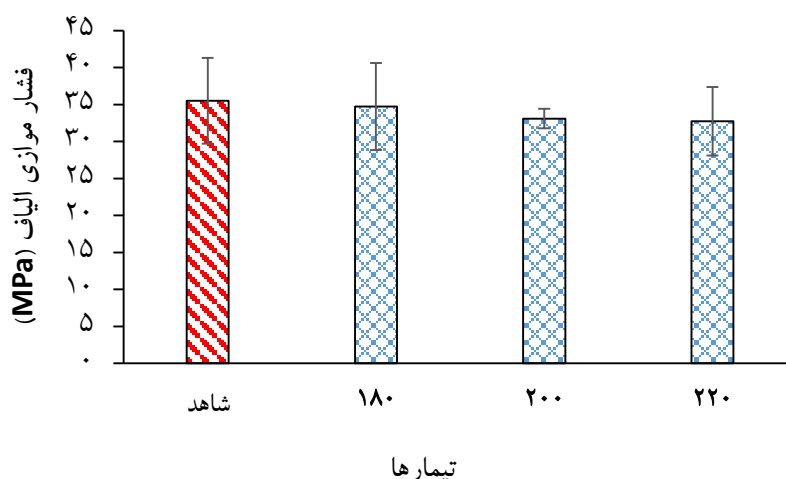
مقاومت به ضربه: نتایج حاصل از تأثیر اصلاح گرمایی بر مقاومت به ضربه در جهت شعاعی چوب نراد در شکل ۸ نشان داده شده است. نتایج نشان دادند که اصلاح گرمایی موجب کاهش مقاومت به ضربه در چوب نراد شده است. همچنین افزایش دمای تیمار از ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد به ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد سبب افت بیشتر مقاومت به ضربه شده است؛ به طوری که در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد حدود ۴۰ درصد و در دمای ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد حدود ۵۸ درصد از مقدار مقاومت به ضربه نمونه شاهد کاسته شده است.

افزایش دمای تیمار به ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد نیز به طور قابل توجهی سبب افت مقاومت خمشی در چوب نراد اصلاح شده نسبت به نمونه شاهد شد (۶۳ درصد کاهش).

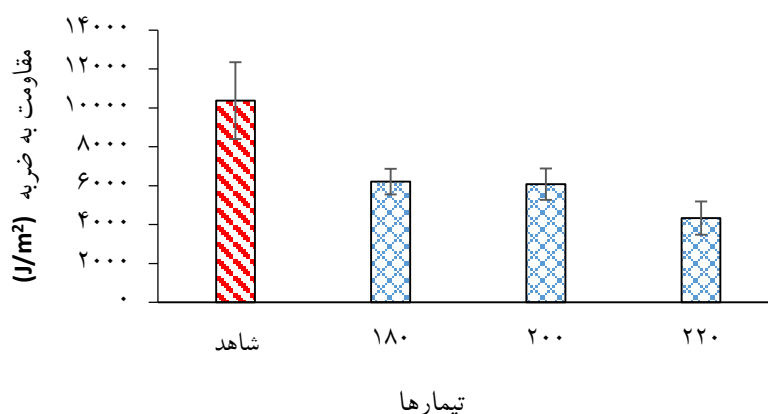
شکل ۵ مقادیر مدول الاستیسیته چوب‌های تیمار شده در دماهای مختلف در مقایسه با نمونه شاهد را نشان می‌دهد. نتایج نشان دادند که تیمار اصلاحی اثر محسوسی بر مقادیر مدول الاستیسیته ندارند و بین تیمارهای با دماهای دیگر نیز تفاوت محسوسی مشاهده نمی‌گردد. کاهش جزئی در مقدار مدول الاستیسیته در نمونه تیمار شده در دمای ۱۸۰ درجه

مقاومت فشار موازی الیاف: نتایج حاصل از تأثیر اصلاح گرمایی بر مقاومت فشار موازی الیاف چوب نراد در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. نتایج نشان دادند که اصلاح گرمایی در تمامی دماهای مورد بررسی باعث کاهش مقاومت فشار موازی الیاف در چوب نراد شده است. بیشترین مقدار کاهش مقاومت فشار موازی الیاف نسبت به نمونه شاهد در نمونه تیمار شده در دمای ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد بود که حدود ۸ درصد کاهش مشاهده شد.





شکل ۷- اثر دمای اصلاح گرمایی به روش رتیفیکاسیون بر مقاومت فشار موازی الیاف



شکل ۸- اثر دمای اصلاح گرمایی به روش رتیفیکاسیون بر مقاومت به ضربه چوب نراد

## بحث

تیمار انجام شده در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد بود. همچنین بیشترین میزان ثبات ابعاد هم در زمان غوطه‌وری ۲ ساعت متعلق به تیمار انجام شده در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد بود و تغییرات محسوسی بین اثر دماهای مختلف بر میزان واکنشیدگی چوب اصلاح شده مشاهده نشد. بر اساس نتایج به‌دست آمده از این پژوهش اصلاح حرارتی چوب در تمامی دماها با افت مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته آن همراه بود. اما مدول الاستیسیته چوب و مقاومت فشار موازی الیاف

در این پژوهش اثر اصلاح گرمایی چوب نراد در محیط گاز نیتروژن در دماهای ۱۸۰، ۲۰۰ و ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چوب نراد بررسی شد. نتایج نشان دادند که اصلاح گرمایی در محیط گاز نیتروژن موجب کاهش دانسیته چوب، جذب آب، واکنشیدگی حجمی و افزایش ثبات ابعادی گردید. به‌طوری‌که کمترین میزان واکنشیدگی حجمی در زمان غوطه‌وری ۲ ساعت متعلق به

دارد و به دلیل گروه‌های هیدروکسیل کمتر، تغییرات شیمیایی در آن به آهستگی رخ می‌دهد. به دلیل مقاومت بالاتر لیگنین به گرما نسبت به همی سلولز و بخش آمورف سلولز و افزایش نسبی در مقدار لیگنین پس از اصلاح گرمایی و تشکیل اتصالات عرضی درون ساختار آن، افزایش تراکم نیز در لیگنین ایجاد می‌گردد (Lee et al., 2018). همچنین تشکیل اسید استیک ناشی از تخریب همی سلولزها، سبب تخریب ساختار آمورف در سلولز شده و از سوی دیگر سبب استری شدن لیگنین می‌گردد. در نتیجه این واکنش‌ها، مقدار گروه‌های آب‌دوست هیدروکسیل کاهش می‌یابد و بر میزان گروه‌های کربونیل افزوده می‌گردد که در نتیجه این تغییرات از میزان آب‌دوستی چوب کاسته می‌شود (Huang et al., 2016)؛ (Huang et al., 2019). به‌طور کلی، تغییرات در ساختار لیگنین (نوآرایی ساختاری در لیگنین) در نتیجه اصلاح گرمایی و تخریب ساختارهای همی سلولز و بخش‌های آمورف سلولز سبب کاهش واکنش‌پذیری در چوب نراد اصلاح گرمایی شده می‌گردد و بازدارندگی واکنش‌پذیری را نیز تقویت می‌نماید (Lee et al., 2018).

در رابطه با تغییرات مدول الاستیسیته در مطالعات پیشین افزایش این ویژگی در نتیجه تیمارهای اصلاح گرمایی به دلیل تغییرات مولکولی در سطوح مختلف ساختار چوب از مقیاس نانو تا مقیاس ماکرو و تغییرات شیمیایی در ساختار لیگنین و سلولز (ناشی از اثر گرما در تیمار اصلاحی) گزارش شده است (Rowell, 2005). نتایج مطالعات گذشته روی اصلاح گرمایی چوب‌ها نیز نشان داده‌اند که افزایش دمای تیمار سبب افت مقاومت خمشی در چوب می‌گردد. تخریب عناصر سازنده چوب مانند سلولز و کاهش طول زنجیره‌های آن و تغییر ساختار لیگنین در مجاورت گرما از عوامل اصلی افت مقاومت خمشی در چوب‌های اصلاح شده هستند (Hajihassani et al., 2018). زنجیره‌های سلولزی از عوامل اصلی در ایجاد مقاومت خمشی و کششی در چوب هستند. گرما در تیمار اصلاحی چوب با تخریب پلی‌ساکاریدهای چوب و کاهش طول زنجیره‌های سلولز، سبب تردی و شکننده شدن چوب می‌گردد، در نتیجه مقاومت خمشی چوب پس از

در این تیمارها کمتر تحت تأثیر دماهای تیمار قرار گرفتند. یکی از مزیت‌های تیمار اصلاح گرمایی در محیط گاز نیتروژن نسبت به سایر روش‌های اصلاح حرارتی مانند تیمارهای بخار گرمایی، افت کمتر دانسیته چوب است (Bytner et al., 2021; Kozakiewicz et al., 2019). یعنی سایر تیمارهای اصلاحی سبب تخریب بیشتر و افت بیشتری در دانسیته چوب اصلاح شده می‌شوند که در برخی موارد سایر ویژگی‌های چوب را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. کاهش دانسیته و نیز کاهش جرم چوب بعد از اصلاح گرمایی در محیط گاز نیتروژن تحت تأثیر خروج ترکیبات غیر ساختاری مانند مواد استخراجی فرار موجود در چوب مانند ترپن‌ها، روغن، موم، ترکیبات فنلی و همچنین تخریب همی سلولزها است (Mania & Gasiorrek, 2020; ĩmirzi et al., 2014). همی سلولز یک پلی‌ساکارید با ساختار آمورف و درجه بسپارش پایین است که در درجه حرارت بالاتر از ۱۵۰-۱۴۰ درجه سانتی‌گراد شروع به تخریب شدن می‌نماید. عامل دیگری که تسریع‌کننده تخریب همی سلولز و افت دانسیته چوب می‌گردد تشکیل اسید فرمیک و اسید استیک از گروه‌های استیل و کربوکسیل موجود در همی سلولزها می‌باشد. این اسیدها می‌توانند تخریب‌کننده عناصر سازنده چوب باشند (Kozakiewicz et al., 1965; Kollmann & Fengel, 2019). در مقابل، ترکیبات دیگر سازنده چوب یعنی سلولز (پلی‌ساکارید با درجه بسپارش بالا) و لیگنین (پلی فنل) مقاومت بیشتری در برابر حرارت دارند و نسبت به همی سلولز کمتر دچار تخریب حرارتی می‌شوند (Bytner et al., 2021). از دلایل اصلی کاهش میزان جذب آب و واکنش‌پذیری در چوب‌های اصلاح شده نیز می‌توان به تغییرات شیمیایی در عناصر تشکیل‌دهنده چوب مانند همی سلولزها، ساختارهای آمورف سلولز و لیگنین اشاره کرد، اما در میان ترکیبات سازنده چوب، لیگنین مقاومت بیشتری به گرما نشان می‌دهد. بنابراین در نتیجه اصلاح گرمایی سایر عناصر سازنده چوب مانند همی سلولزها و بخشی از ساختار آمورف سلولز از چوب خارج می‌شوند، در نتیجه میزان نسبی لیگنین افزایش می‌یابد. لیگنین در مقایسه با همی سلولزها و سلولز آب‌گریزی بیشتری

## منابع مورد استفاده

- Abde, M., Mootab, Saei, A., Mohebbi, B., and Kazemi-Najafi, S. 2015. Influence of temperature and holding time in oil heat treatment on physical and mechanical properties of fir wood (*Abies Sp.*). *Forest and Wood Products*, 68(2): 303-315.
- Biswas, A.K., Yang, W., and Blasiak, W., 2011. Steam Pretreatment of *Salix* to Upgrade Biomass Fuel for Wood Pellet Production. *Fuel Processing Technology*, 92: 1711-1717.
- Boonstra, M.J., vanAcker, J., Kegel, E., and Stevens, M., 2007. Optimization of a Two-Stage Heat Treatment Process: Durability Aspects. *Wood Science and Technology*, 41: 31-57.
- Bytner, O., Laskowska, A., Drożdżek, M., Kozakiewicz, P., and Zawadzki, J., 2021. Evaluation of the Dimensional Stability of Black Poplar Wood Modified Thermally in Nitrogen Atmosphere. *Materials*, 14, 1491.
- Esteves, B., Marques, A.V., Domingos, I., and Pereira, H., 2007. Influence of Steam on the Properties of Pine (*Pinus pinaster*) and Eucalypt (*Eucalyptus globulus*) Wood. *Wood Science and Technology*, 41: 193-207.
- Hajihassani, R., Mohebbi, B., Najafi, S.K., and Navi, P., 2018. Influence of combined hygro-thermo-mechanical treatment on technical characteristics of poplar wood. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 20(1), 117-128.
- Hietala, S., Maunu, S., Sundholm, F., Jämsä, S., and Viitaniemi, P., 2002. Structure of thermally modified wood studied by liquid state NMR measurements. *Holzforchung*, 56: 522-528.
- Huang, C.X., He, J., Min, D.Y., Lai, C.H., Yu, S.Y., and Yong, Q., 2016. Effect of dilute acid pretreatment on the lignin structure of Moso bamboo inner skin. *Journal of Forestry Engineering*, 1, 55-60.
- Huang, C.X., Lin, W.Q., Lai, C.H., Li, X., Jin, Y.C., and Yong, Q., 2019. Coupling the post-extraction process to remove residual lignin and alter the recalcitrant structures for improving the enzymatic digestibility of acid pretreated bamboo residues. *Bioresource Technology*, 285, 121355, Doi:10.1016/j.biortech.2019.121355.
- İmirzi, H.Ö., Ülker, O., and Burdurlu, E., 2014. Effect of densification temperature and some surfacing techniques on the surface roughness of densified Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *BioResources*, 9, 191-209.
- Kamdern, D.P., Pizzi, A., and Jermannaud A., 2002. Durability of Heat-Treated Wood. *Holz als Roh- und*
- اصلاح گرمایی کاهش می‌یابد (Rowell, 2005). همچنین نتایج مطالعاتی که با استفاده از طیف‌سنجی رزونانس مغناطیسی هسته ( $^1\text{NMR}$ ) روی ساختار چوب‌های تیمار شده به روش اصلاح گرمایی انجام شده است نشان دادند که تیمارهای اصلاح گرمایی به علت تخریب عناصر سازنده دیواره سلولی و خروج آنها از چوب، سبب افزایش سایز خلل و فرج‌های موجود در چوب می‌شود (Hietala *et al.*, 2002) که این پدیده‌ها نیز می‌توانند سبب کاهش مقاومت خمشی چوب شوند. به‌طور کلی، هر یک از بسپارهای سازنده چوب مانند همی سلولز، سلولز و لیگنین در میزان مقاومت چوب تأثیر دارند. ویژگی‌های مکانیکی چوب نیز تابعی از پیوندهای کووالانسی و هیدروژنی بین بسپارهای سازنده چوب در دیواره سلولی و مقاومت اتصال بین فیبریل‌های دیواره سلولی و مقاومت اتصال بین الیاف با تیغه میانی (عمدتاً لیگنین) هستند. در دیواره سلولی چوب نیز پیوندهای شیمیایی - مکانیکی بین میکروفیبریل‌های سلولزی و ماتریس لیگنین - همی سلولز عامل اصلی انتقال تنش‌های درونی در چوب می‌باشند. پیوستگی میکروفیبریل‌های سلولزی و ماتریس لیگنین - همی سلولز سبب انتشار یکنواخت تنش‌های درونی در دیواره سلولی و الیاف چوب می‌گردد. تیمار اصلاح گرمایی با تخریب همی سلولز (به مونومرها و اولیگومرها)، تخریب بخش آمورف سلولز (افزایش کریستالیت سلولز)، شکست اتصالات بین همی سلولز - لیگنین و تغییر ساختار لیگنین سبب افت مقاومت‌های مکانیکی چوب می‌گردد (Boonstra *et al.*, 1991; Winandy & Rowell, 1984; Whistler & Chen, 2007; Sweet & Winandy, 1999).
- در نتیجه، شکننده شدن دیواره سلولی در برابر تنش‌ها به دلیل تخریب گرمایی اجزای تشکیل‌دهنده آن، شکسته شدن زنجیره‌های سلولزی و افت دانسیته چوب از دلایل اصلی افت مقاومت به ضربه، مقاومت برش موازی الیاف و مقاومت فشار موازی الیاف در چوب‌های اصلاح شده هستند (Rautkari *et al.*, 2014).

- Sundqvist, B., Karlsson, O., and Westermark, U., 2006. Determination of formic-acid and acetic acid concentrations formed during hydrothermal treatment of birch wood and its relation to colour, strength and hardness. *Wood Science and Technology*, 40: 549–561.
- Shi, J.L., Kocaefe, D., and Zhang, J., 2007. Mechanical behaviour of queébec Wood Species Heat-Treated Using Thermo Wood Process. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 65(4): 255-259.
- Sweet, M.S., Winandy, J.E., 1999. The influence of degree of polymerization (DP) of cellulose and hemicellulose on the strength loss offire-retardant-treated wood, *Holzforschung*, 53: 311–317.
- Tanaomi, A.R., Mohebbi, B., and Ghahri, S., 2013. The effect of oleothermal treatment on physical and mechanical properties of beech wood. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 19(3): 111-126.
- Tjeerdma, B.F., and Militz, H., 2005. Chemical Changes in Hydrothermal Treated Wood, FTIR Analysis of Combined Hydro Thermal and Dry Heat-Treated Wood. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 63 (2): 102-111.
- Vernois, M., 2000. Heat treatment of wood in France- State of the art. Centre Technique du Bois et de l'Ameublement, Paris, França.
- Welzbacher, C.R., Wehsener, J., Rapp, A.O., and Haller, P., 2008. Thermo-Mechanical Densification Combined with Thermal Modification of Norway Spruce (*Picea abies* Karst) in Industrial Scale-Dimensional Stability and Durability Aspects. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 66: 39–49.
- Whistler, R.L., and Chen C.C., 1991. Hemicelluloses, in: Lewin, Goldstein(Eds.), *Wood structure and composition*, International fiber science and technology series, Vol. 11, Marcel Decker, Inc., New York, NY, 287–320.
- Winandy, J.E., and Rowell, R.M., 1984. The chemistry of wood strength, in: Rowell R.M. (Ed.) *The Chemistry of solid wood*, American Chemical Society, Washington, DC, 211–256.
- Werkstoff, 60:1–6.
- Kollmann, F., and Fengel, D., 1965. Änderungen der chemischen Zusammensetzung von Holz durch thermische Behandlung. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 23, 461–468.
- Kozakiewicz, P., Drożdżek, M., Laskowska, A., Grzeškiewicz, M., Bytner, O., Radomski, A., and Zawadzki, J., 2019. Effects of thermal modification on the selected physical properties of sapwood and heartwood of black poplar (*Populus nigra*L.). *BioResources*, 14, 8391–8404.
- Lee, C.H., Yang, T.H., Cheng, Y.W., and Lee, C.J., 2018. Effects of thermal modification on the surface and chemical properties of mosobamboo. *Construction and Building Materials*, 178, 59–71.
- Liu S., 2008. A kinetic model on autocatalytic reactions in woody biomass hydrolysis. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 2: 135–147.
- Mania, P., and Gasiorek, M., 2020 Acoustic Properties of Resonant Spruce Wood Modified Using Oil-Heat Treatment (OHT). *Materials*, 13, 1962, doi:10.3390/ma13081962.
- Metsa-Kortelainen, S., Antikainen, T., and Viitaniemi, P., 2006. The water absorption of sapwood and heartwood of scots pine and norway spruce heat-treated at 170 °C, 190 °C, 210 °C and 230 °C. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 64 (3): 192–197.
- Popescu, C.M., and Popescu, M.C., 2013. A near infrared spectroscopic study of the structural modifications of lime (*tilia cordatamill.*) wood during hydro-thermal treatment. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 115:227–233.
- Rowell R.M., 2005. *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*, chapter11: Chemistry of Wood Strength, 432-435.
- Rautkari, L., Honkanen, J., Hill, C.A.S., Ridley-Ellis, D., and Hughes, M., 2014. Mechanical and physical properties of thermally modified Scotspine wood in high pressure reactor under saturated steam at 120, 150 and 180 °C. *European Journal of Wood and Wood Products*, 72: 33–41.

## Evaluation of applied performance of thermally-modified Fir wood by retification process

S. Ghahri<sup>\*1</sup>, M.R. Abde<sup>2</sup> and F. Abdoli<sup>3</sup>

1\*-Corresponding author, Assistance Prof., Wood and Forest Products Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran,  
E-mail: Sghahri@gmail.com

2-MSc., Wood Science and Technology, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3-MSc., Wood Science and Technology, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: May, 2021

Accepted: June, 2021

### Abstract

In this research, fir wood (*Abies* spp.) was thermally modified by retification process. The effect of modification process on physical and mechanical properties of fir wood were evaluated. For this aim, fir wood specimens with 12% moisture content were modified in the steel tank with nitrogen gas medium at different temperatures (180 °C, 200 °C, and 220 °C) and 15 hours retention time. Physical properties such as wood density, volumetric swelling, dimensional stability and mechanical properties such as modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE), shear and compression strength parallel to the grain and impact strength of different modified wood specimens were evaluated. Results showed that by increasing treatment temperature, during modification process, water absorption and volumetric swelling were decreased and dimensional stability was improved. Also, results revealed that the mechanical strength of modified wood such as MOR, MOE, shear and compression strength parallel to grain and impact strength were decreased.

**Keywords:** Wood products, wood modification, dimensional stability.