

## اثر فشردگی بر خواص کاربردی چوب صنوبر اصلاح شده به روش های شیمیایی و گرمایی

### چکیده

در بررسی اثر فشردگی بر خواص فیزیکی و مکانیکی گونه صنوبر دلتوئیدس (*Populus deltoides*) اصلاح شیمیایی و گرمایی شده، اصلاح گرمایی در دمای ۱۷۰ درجه سانتی گراد، اصلاح شیمیایی با گلو تار آلدهید و فشردگی در ۳ سطح ۱۰، ۲۵ و ۴۰ درصد در زمان پرس ۲ ساعت انجام شد. دانسیته چوب اصلاح گرمایی و شیمیایی شده با افزایش فشردگی از ۲۵ به ۴۰ درصد، به ترتیب ۱۳ و ۸ درصد افزایش یافت. بازگشت فوری و جذب رطوبت در اصلاح تلفیقی گرمایی/فشردگی بیشتر از شیمیایی/فشردگی بود. جذب آب و واکنش پذیری ضخامت در فشردگی ۱۰ درصد بیشتر از شاهد اصلاح شیمیایی و گرمایی بود، ولیکن با افزایش فشردگی، کاهش معنی دار یافت. خواص مکانیکی در هر دو اصلاح گرمایی و شیمیایی با افزایش نسبت فشردگی بهبود یافت. بهبود مدول خمشی با افزایش فشردگی در هر دو اصلاح، از فشردگی ۲۵ به ۴۰ درصد، بیش از ۱۰ به ۲۵ درصد بود که در نمونه های اصلاح گرمایی شده محسوس تر بود. مقاومت نیز با افزایش فشردگی بهبود یافت، ولیکن نسبت این بهبود در فشردگی ۴۰ درصد کاهش یافت. افزایش فشردگی به بهبود معنی دار فشار موازی الیاف و سختی نیز انجامید که در نمونه های اصلاح شده با گلو تار آلدهید در مقایسه با گرمایی محسوس تر بوده است.

**واژگان کلیدی:** فشردگی، گلو تار آلدهید، اصلاح گرمایی، خواص فیزیکی، خواص مکانیکی.

مریم قربانی<sup>\*۱</sup>

آزاده نیکخواه شه میرزادی<sup>۲</sup>

افسانه توپا<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار گروه مهندسی چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری گروه علوم چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور

<sup>۳</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ دانشگاه تهران

مسئول مکاتبات:

[ghorbani\\_mary@yahoo.com](mailto:ghorbani_mary@yahoo.com)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۱۹

### مقدمه

صنوبر به عنوان تند رشدترین درخت و منبع اصلی تأمین چوب و مواد اولیه بسیاری از صنایع کشور، جزء چوب های سبک باقابلیت آبدوستی، ناپایداری ابعاد و تخریب زیستی زیاد و مقاومت های مکانیکی کم به شمار می رود. محققین به دنبال یافتن راه حل هایی هستند تا با کاهش خاصیت آبدوستی و افزایش دانسیته، دامنه کاربرد این گونه چوبی را گسترده تر نموده و این ماده با ارزش را در بعد صنعتی به بهره برداری های مطلوب تری برسانند.

گلو تار آلدهید به عنوان ماده شیمیایی اصلاح کننده چوب، با ایجاد پیوند با گروه های هیدروکسیل پلیمرهای دیواره سلولی و تغییر ساختار آن [۱]، موجب بهبود مقاومت زیستی [۲]، کاهش جذب رطوبت و افزایش پایداری ابعاد [۳، ۴] چوب می شود. ولیکن، کاهش برخی مقاومت های مکانیکی در اصلاح با گلو تار آلدهید موجب محدودیت کاربرد آن می گردد [۵، ۶].

اصلاح گرمایی نیز با کاهش توانایی جذب رطوبت چوب، مقاومت آن در برابر عوامل مخرب زیستی و پایداری ابعاد را افزایش می دهد. گرمادهی سبب تخریب همی

۲۴ ساعت خشک شدند. حروف C، G و H به ترتیب معرف شاهد، اصلاح گلوتارآلدئید، گرمایی و فشرده‌سازی نیز با اعداد مربوط به هر فشرده‌گی نشان داده شد.

### اصلاح شیمیایی

گلوتارآلدئید با غلظت ۵۰ درصد از شرکت دایجونگ کره تهیه گردید. رقیق‌سازی گلوتارآلدئید تا غلظت ۲۰ درصد و حفظ pH ۴/۵، با استفاده از بافر استات سدیم ۰/۱ مولار (انحلال ۱۳/۶ گرم استات سدیم با جرم مولی ۱۳۶ گرم بر مول در یک لیتر آب مقطر و تنظیم pH آن با اسیداستیک) انجام شد. پس از تنظیم غلظت، کاتالیزور کلرید منیزیم، به میزان ۱۲/۵ درصد وزنی گلوتارآلدئید به محلول اضافه گردید. نمونه‌ها با گلوتارآلدئید، به روش خلاء-فشار (خلأ ۰/۷ بار به مدت ۳۰ دقیقه و فشار ۸ بار به مدت ۲ ساعت) اشباع شدند و متعاقباً در ورقه‌های آلومینیومی پیچانده و برای واکنش اصلاح، به مدت ۲ ساعت در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد گرمادهی گردیدند. پس از خشک‌کردن در آون و توزین نمونه‌ها، جذب و افزایش وزن، طبق روابط زیر محاسبه شد:

$$\text{Uptake} = \frac{m_2 - m_1}{V_1} \quad (1)$$

Uptake: جذب (کیلوگرم بر مترمکعب):  $m_2$  وزن تر نمونه پس از اشباع (کیلوگرم)؛  $m_1$  وزن خشک نمونه قبل از اشباع (کیلوگرم)؛  $V_1$ : حجم خشک نمونه قبل از اشباع (مترمکعب)

$$\text{Weight percent gain} = \left( \frac{m_2 - m_1}{m_1} \right) \times 100 \quad (2)$$

Weight percent gain: افزایش وزن (درصد)،  $m_1$  و  $m_2$ : وزن خشک قبل و پس از اشباع (کیلوگرم)  
برای اصلاح شیمیایی توأم با فشرده‌سازی، نمونه‌های چوبی اشباع‌شده با گلوتارآلدئید، به مدت ۲ ساعت تحت دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد در پرس گرم فشرده شدند.

سلولزها، کریستالی شدن سلولز، انجام واکنش‌های تراکمی و تشکیل پیوندهای عرضی لیگنین می‌شود [۷ و ۸]. در اصلاح گرمایی، بهبود خواص فیزیکی [۷، ۹، ۱۰]، بهبود مقاومت زیستی [۱۱] و کاهش خواص مکانیکی چوب و فرآورده‌های آن [۱۲، ۱۳] گزارش گردید. جبران یا کنترل افت خواص مکانیکی متعاقب اصلاح شیمیایی و گرمایی، قطعاً بر کارایی فرآورده حاصل می‌افزاید.

بر اثر اعمال فشار و افزایش دانسیته، فشرده‌گی قابل-ملاحظه‌ای در چوب اصلاح‌شده ایجاد می‌گردد که به بهبود مقاومت‌های مکانیکی آن منتهی می‌شود [۱۷-۱۴]. فشرده‌سازی چوب فرایندی است که در آن بخش اعظم فضای خالی یا حفره‌ها توسط خود ماده چوبی پر می‌گردد. این عمل در شرایطی انجام می‌شود که به ساختار سلولی چوب صدمه مکانیکی وارد نشود. مشکل اصلی فشرده‌سازی چوب، پدیده بازگشت فنری می‌باشد که به حافظه شکلی آن نسبت داده می‌شود [۱۸]. هر روش اصلاحی برای کنترل قابلیت جذب و دفع رطوبت دیواره سلولی می‌تواند به کاهش بازگشت فنری<sup>۱</sup> چوب فشرده بیانجامد.

بر اساس نتایج پژوهش‌های گذشته، اثر مثبت اصلاح شیمیایی، گرمایی و فشرده‌سازی به صورت جداگانه بر خواص چوب محرز می‌باشد، اما تاکنون تحقیقی در مقایسه بین اثر توأم فشرده‌سازی/اصلاح شیمیایی با فشرده‌سازی/اصلاح گرمایی باهدف حفظ مزایای حاصل از هر اصلاح در چوب انجام نشده‌است. تحقیق حاضر به بررسی اثر فشرده‌سازی در تلفیق با اصلاح شیمیایی و گرمایی بر خواص کاربردی گونه تند رشد صنوبر می‌پردازد.

### مواد و روش‌ها

الوار صنوبر (*Populus deltoides*) پس از یک ماه متعادل‌سازی (دمای  $2 \pm 25$  درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی  $5 \pm 65$  درصد)، به ابعاد استاندارد آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی تبدیل شدند (جدول ۱). طول و عرض نمونه‌ها یکسان و ضخامت بر اساس فشرده‌گی ۱۰، ۲۵ و ۴۰ درصد با ۵ تکرار در هر سطح اصلاح تعیین گردید. نمونه‌ها تحت دمای  $2 \pm 103$  درجه سانتی‌گراد به مدت

<sup>۱</sup>Spring back

اصلاح و تکرار هر در آزمون‌های نمونه تعداد و ابعاد جدول ۱- استاندارد،

تعداد نمونه	تعداد تکرار	ابعاد (میلی‌متر)				استاندارد		نوع آزمون
		ضخامت بر اساس درصد فشردگی (mm)				عرض (mm)	طول (mm)	
		۴۰٪	۲۵٪	۱۰٪	۰			
۳۵	۵	۳۴	۲۷	۲۳	۲۰	۲۰	ASTM-D4446-05	فیزیکی
۳۵	۵	۴۲	۳۴	۲۸	۲۵	۴۱۰	ASTM-D143-94	مقاومت خمشی
۳۵	۵	۴۲	۳۴	۲۸	۲۵	۱۰۰	ASTM-D143-94	فشار موازی الیاف
۳۵	۵	۸۴	۶۷	۵۶	۵۰	۱۵۰	ASTM-D143-94	سختی

## اصلاح گرمایی

در بررسی خواص فیزیکی، دانسیته، بازگشت فبری، رطوبت پس از دو هفته متعادل‌سازی، جذب آب و واکنشیدگی ضخامت نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. بازگشت فبری بر اساس ضخامت نمونه‌ها قبل و بعد از متعادل‌سازی بر اساس رابطه زیر اندازه‌گیری شد (رابطه‌ی ۴).

$$S = \frac{T_1 - T_0}{T_0} \times 100 \quad (4)$$

S: بازگشت فبری (درصد)،  $T_1$  و  $T_0$ : ضخامت ثانویه

بعد و قبل از متعادل‌سازی (میلی‌متر)

## آزمون مکانیکی

خواص مکانیکی شامل مقاومت، مقاومت در برابر فشار موازی الیاف و سختی طبق استاندارد ASTM D143-94، توسط دستگاه SANTAM-STM-20 اندازه‌گیری شد. آزمون خمش با سرعت بارگذاری ۱/۳ میلی‌متر بر دقیقه، آزمون فشار موازی الیاف با سرعت بارگذاری ۰/۳ میلی‌متر بر دقیقه و آزمون سختی نیز با سرعت بارگذاری ۶ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد.

## نتایج و بحث

## طیف‌سنجی زیرقرمز تبدیل فوریه (FTIR)

شکل ۱ نتایج طیف‌سنجی سطوح شاهد، اصلاح‌شده با گلوآل‌آلدئید و گرمایی را نشان می‌دهد. اصلاح گرمایی با تخریب همی سلولزها، به کاهش شدت جذب گروه هیدروکسیل در طول موج  $3421 \text{ cm}^{-1}$  انجامید که از دلایل اصلی کاهش جذب آب و تغییرات ابعاد ماده لیگنوسلولزی می‌باشد [۱۹]. کاهش شدت جذب  $1736 \text{ cm}^{-1}$  و  $1252$  به ترتیب مربوط به گروه‌های کربونیل و استیل

به‌منظور اصلاح گرمایی، نمونه‌ها در سیلندر تحت دمای  $170^\circ \text{C}$  درجه سانتی‌گراد و به مدت ۱ ساعت بخار دهی شدند و بلافاصله در پرس گرم  $150^\circ \text{C}$  درجه سانتی‌گراد در جهت شعاعی فشرده شدند. کاهش وزن ناشی از اصلاح گرمایی بر اساس رابطه زیر محاسبه شد:

$$\text{Weight loss} = \left( \frac{m_2 - m_1}{m_1} \right) \times 100 \quad (3)$$

Weight loss: کاهش وزن (درصد)،  $m_1$  و  $m_2$ : وزن

خشک قبل و پس از اصلاح گرمایی (کیلوگرم)

## فشرده‌سازی

برای اعمال فشردگی ۱۰، ۲۵ و ۴۰ درصد، فشرده‌سازی نمونه‌ها در جهت شعاعی تحت دمای  $150^\circ \text{C}$  درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت با استفاده از دستگاه پرس گرم انجام شد. فشار وارد بر نمونه‌ها ۳۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع بوده است. دو ساعت پس از خاتمه فشرده‌سازی، صفحات پرس باز و نمونه‌ها تخلیه گردیدند.

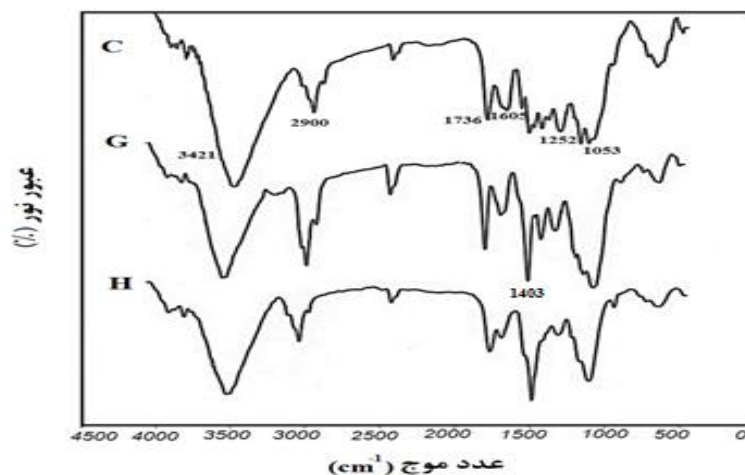
## طیف‌سنجی زیر قرمز تبدیل فوریه (FTIR)

برای ارزیابی ساختار شیمیایی نمونه‌های شاهد و اصلاح‌شده با طیف FTIR، ابتدا نمونه‌های چوبی تا اندازه کوچک‌تر از مش ۸۰ آرد شدند. سپس قرص‌های کوچک تهیه‌شده از آرد خشک چوب و برمید پتاسیم، توسط دستگاه اسپکتروسکوپی ساخت شرکت Bruker بررسی و نتایج در طول موج  $4000-500 \text{ cm}^{-1}$  ثبت شد.

## اندازه‌گیری خواص فیزیکی نمونه‌ها

اثر اصلاح گرمایی اتفاق می‌افتد [۲۲]. تجزیه لیگنین و تشکیل اتصال عرضی از طریق واکنش‌های تراکمی لیگنین می‌تواند جذب آب و در نتیجه تغییر ابعاد ماده لیگنوسلولزی را کاهش دهد [۲، ۲۳]. طول موج  $\text{cm}^{-1}$  ۱۰۵۳ مربوط به خمش C-O در اترها نیز در اصلاح گرمایی کاهش یافت. در واکنش با گلوئارآلدئید، شدت گروه هیدروکسیل در عدد موج  $\text{cm}^{-1}$  ۳۴۲۱، کاهش و شدت پیک  $\text{cm}^{-1}$  ۲۹۰۰ و  $\text{cm}^{-1}$  ۱۴۰۳ نیز با حضور گروه‌های متیلنی ساختار گلوئارآلدئید افزایش نشان داد. عدد موج  $\text{cm}^{-1}$  ۱۰۵۳ مربوط به پیوند C-O اتری و الکی نیز طی اصلاح با گلوئارآلدئید افزایش یافت.

همی سلولز نیز شکست و حذف همی سلولز را نشان می‌دهد [۲، ۲۰]. بر اثر شکسته شدن همی سلولز، اسیدهای کربوکسیلیک و عمدتاً اسیداستیک در مواد لیگنوسلولزی تشکیل می‌شود [۷]. این اسیدها می‌توانند باعث تسریع هیدرولیز همی سلولزها شوند [۲۱]. طول موج  $\text{cm}^{-1}$  ۱۰۵۳ مرتبط با ارتعاشات کششی آروماتیکی و ارتعاش کششی گروه کربونیل می‌باشد. این باند جذبی در نمونه شاهد، پیک دوتایی است که در نمونه‌های اصلاح گرمایی شده به سمت تک پیک شدن پیش می‌رود. تغییر شکل پیک در طول موج  $\text{cm}^{-1}$  ۱۶۰۵ نشان می‌دهد که تغییرات ساختاری در پلیمرهای آروماتیک در



شکل ۱- اثر روش‌های مختلف اصلاح بر طیف زیر قرمز (FT-IR): C: شاهد، G: گلوئارآلدئید و H: گرمایی

نمونه‌های حاوی گلوئارآلدئید و اصلاح گرمایی شده افزایش یافت که در اصلاح گرمایی محسوس‌تر از اصلاح شیمیایی بوده است. در واقع، در سطح تلفیقی گلوئارآلدئید/فشرده‌سازی دانسیته از ۰/۷۲ گرم بر سانتی مترمکعب در فشرده‌سازی ۲۵ درصد، با ۸/۳۳ درصد افزایش به ۰/۷۸ گرم بر سانتی‌مترمکعب در فشرده‌سازی ۴۰ درصد افزایش یافت، در حالی که در سطح تلفیقی گرمایی/فشرده‌سازی دانسیته از ۰/۵۴ گرم بر سانتی‌مترمکعب در فشرده‌سازی ۲۵ درصد، با ۱۳ درصد افزایش، به ۰/۶۱ گرم بر سانتی‌مترمکعب افزایش یافت. اصلاح گرمایی در بخار آب، نرمی و شکل‌پذیری چوب در پرس را افزایش داد [۲۴]. از سوی دیگر، تخریب اجزای دیواره سلولی و افزایش فضای خالی در ساختار چوب می‌تواند امکان فشرده‌گی بیشتر را فراهم کند [۲۵]. همچنین،

### ویژگی‌های فیزیکی

بر اساس نتایج، جذب و افزایش وزن در نمونه‌های اصلاح‌شده با گلوئارآلدئید به ترتیب ۵۵۲/۱ کیلوگرم بر مترمکعب و ۲۲/۴۲ درصد و کاهش وزن ناشی از اصلاح گرمایی ۵/۴۳ درصد محاسبه‌گر دید. اصلاح گرمایی با تخریب کربوهیدرات‌ها به خصوص همی سلولز [۲۳]، به کاهش دانسیته انجامید. بر اساس طیف‌های FT-IR، کاهش شدت گروه‌های هیدروکسیل طی اصلاح گرمایی، مؤید تخریب همی سلولزها می‌باشد. در اصلاح با گلوئارآلدئید، آلدئید می‌تواند طی واکنش با یک یا دو گروه هیدروکسیل، به ترتیب همی‌استال یا استال تشکیل دهد و به افزایش دانسیته چوب اصلاح‌شده منتهی شود (شکل الف-۲). با افزایش فشرده‌گی و کاهش فضای خالی، دانسیته

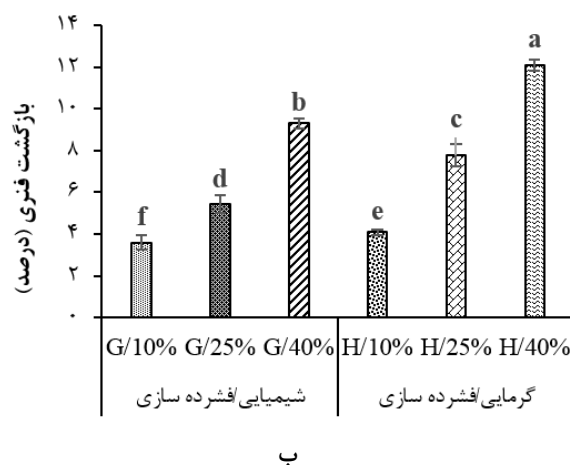
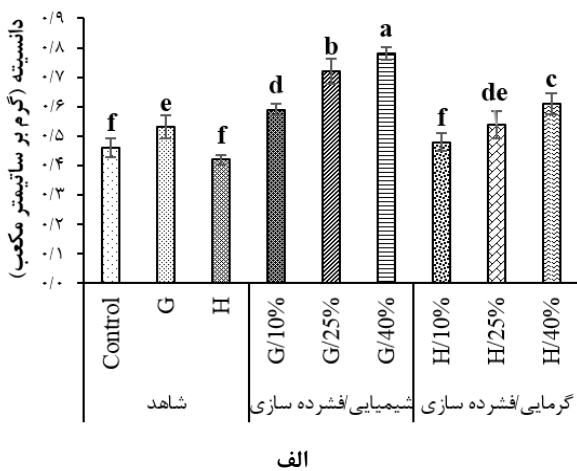
تواند به‌طور کامل به‌اندازه اولیه برگردد که این امر نشان-دهنده‌ی تغییر ساختار پایدار و غیرقابل‌برگشت، ناشی از تغییر شکل دیواره سلولی و واکنش اجزای چوب طی اصلاح گرمایی و شیمیایی و اتصال عرضی بین اجزای دیواره سلولی طی فرآیند فشرده‌سازی می‌باشد [۲۸]. به نظر می‌رسد که در فشرده‌گی ۱۰ درصد، احتمال برقراری اتصال عرضی کمتر می‌باشد. کاهش معنی‌دار افزایش نسبی بازگشت فنی (نسبت افزایش بازگشت فنی در فشرده‌گی ۴۰ درصد به ۲۵ درصد، در مقایسه با ۲۵ به ۱۰ درصد) در نمونه‌های گرمایی با فشرده‌گی بالا می‌تواند به تجزیه اتصال عرضی مسئول حفظ شکل در چوب [۲۹]، همراه با نرم شدن و واکنش‌های تراکمی لیگنین طی فرآیند گرمایی/فشرده‌سازی [۳۰]، تسهیل آزاد شدن تنش‌های داخلی حین بازگشت فنی [۳۱] و احتمالاً تشکیل مجدد پیوند کووالانسی در موقعیت تغییر شکل یافته بین اجزا نسبت داده شود [۳۲].

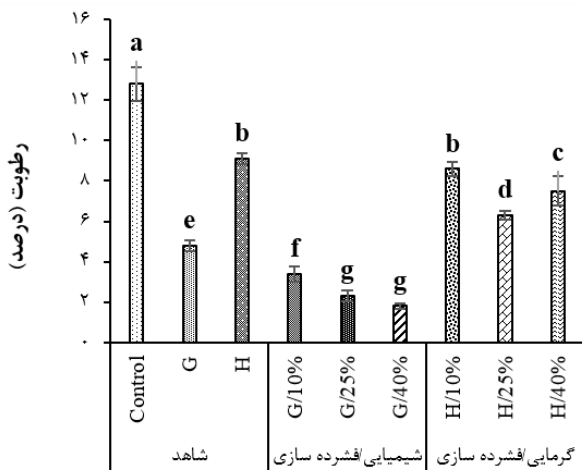
هر دو اصلاح گرمایی و شیمیایی همچنین به کاهش جذب رطوبت چوب در شرایط آزمایشگاهی منتهی شد که این کاهش متعاقب اصلاح شیمیایی محسوس‌تر بود (شکل ج-۲). جذب آب و واکنشیدگی ضخامت در فشرده‌سازی ۱۰ درصد بیشتر از شاهد اصلاح شیمیایی و گرمایی بود، ولیکن با افزایش فشرده‌گی، کاهش معنی‌دار یافت که این کاهش نیز در نمونه‌های شیمیایی فشرده محسوس‌تر بود (شکل د-۲ و ر-۲).

زمان طولانی پرس به آزاد شدن بیشتر تنش‌ها در پرس انجامید [۲۶]. اصلاح گلو تار آلدئید با برقراری پیوند عرضی در پرس، به افزایش دانسیته انجامید، ولیکن نسبت افزایش دانسیته در فشرده‌گی ۴۰ درصد نسبت به ۲۵ درصد کمتر بوده است. احتمالاً اصلاح شیمیایی، علیرغم تشکیل پیوند عرضی و کاهش آب‌دوستی، به دلیل صلبیت بیشتر، به افزایش بازگشت فنی و بهبود کمتر دانسیته انجامید.

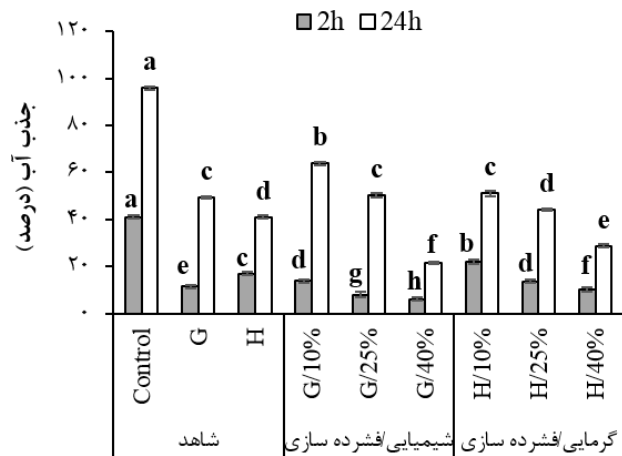
مقادیر بازگشت فنی در اصلاح شیمیایی/فشرده‌سازی کمتر از گرمایی/فشرده‌سازی بوده است (شکل ب-۲). در مقایسه نسبت بازگشت فنی در سطوح مختلف فشرده‌گی می‌توان اظهار داشت که نسبت افزایش بازگشت فنی تا فشرده‌گی ۲۵ درصد در شیمیایی/فشرده‌سازی کمتر از گرمایی/فشرده‌سازی بود. با افزایش فشرده‌گی از ۲۵ به ۴۰ درصد، بازگشت فنی نمونه‌های اصلاح شیمیایی شده بیشتر از گرمایی شده بوده است، به‌طوری‌که با ۷۱/۵ درصد افزایش در شیمیایی/فشرده‌سازی ۴۰ درصد به ۲۵ درصد، از ۵/۴۲ به ۹/۳ درصد و با ۵۵ درصد افزایش در گرمایی/فشرده‌سازی ۴۰ درصد به ۲۵ درصد، از ۷/۸ درصد به ۱۲/۱ درصد رسید.

بر اساس نتایج مطالعات پیشین گزارش شد که فشرده‌گی بیشتر، به دلیل افزایش ماده چوبی در یک حجم معین و تنش‌های داخلی بزرگ‌تر ایجاد شده، به بازگشت فنی بیشتر منتهی گردید [۲۷]. چوب اصلاح شده به روش‌های گرمایی و شیمیایی با فشرده‌گی ۴۰ درصد نمی‌

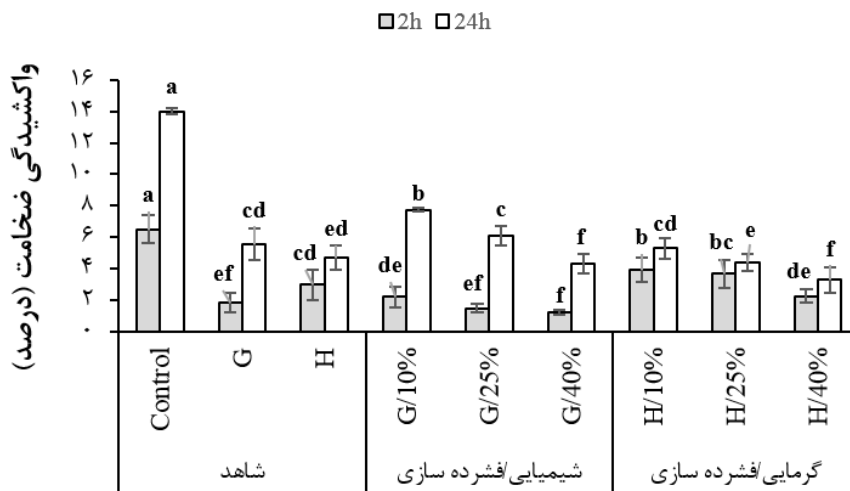




ج



د



ه

شکل ۲- اثر اصلاح ترکیبی بر خواص فیزیکی نمونه‌های شاهد (control) و اصلاح شده (G: گلو تار آلدهید، H: گرمایی، 10، 25، 40: سطوح فشرده‌سازی): (الف) دانسیته، (ب) بازگشت فنی، (ج) رطوبت، (د) جذب آب، (ه) واکنش پذیری ضخامت

گرمایی با فشرده‌سازی بالا را می‌توان به فشرده‌سازی حفره سلولی، برقراری اتصالات جدید در فشرده‌سازی زیاد [۳۸] و همچنین آزاد شدن تنش‌ها در زمان طولانی پرس [۲۶] نسبت داد.

طی اصلاح با گلو تار آلدهید، حجم‌شدگی دیواره سلولی و جانمایی گروه‌های هیدروکسیل موجب کاهش تغییرات رطوبت و بهبود ثبات ابعاد چوب شد. همچنین ساختار آب‌گریز C-H با کاهش اثر موئینگی، منجر به ورود مولکول‌های آب کمتر به چوب می‌شود و برقراری پیوند عرضی گلو تار آلدهید با پلیمرهای چوب نیز به کاهش انعطاف‌پذیری دیواره منتهی خواهد شد [۵]. تحقیقات پیشین، کاهش واکنش پذیری ضخامت به واسطه

دلایل کاهش جذب آب و بهبود پایداری ابعاد چوب اصلاح گرمایی شده شامل: نرم‌شدگی احتمالی لیگنین و تغییر ساختار پلیمرهای چوب [۳۳]، کاهش کربوهیدرات‌های چوب و افزایش مقدار لیگنین [۳۴]، افزایش اتصال عرضی درون ترکیب لیگنین [۳۵]، کریستالی شدن و کاهش نواحی آمورف سلولز [۳۶] می‌باشند. کاهش گروه‌های هیدروکسیل پلی‌ساکاریدهای چوب اصلاح گرمایی شده [۳۷] سبب کاهش برقراری پیوند بین مولکول‌های آب و اجزای تشکیل‌دهنده‌ی چوب می‌شود. نرخ فشرده‌سازی کم، تغییر شکل الاستیک را در سلول‌های چوب به وجود می‌آورد که پس از غوطه‌وری در آب به شکل اصلی‌اش بازمی‌گردد. کاهش جذب آب و بهبود پایداری ابعاد چوب



بسپارهای قندی دیواره‌های سلولی؛ به‌ویژه همی سلولزها [۲۳، ۷]، به کاهش مدول الاستیسیته و رطوبت کمتر [۴۳] و نوآرایی ساختار سلولز و افزایش بلورینگی [۸، ۹]، به افزایش مدول الاستیسیته می‌انجامد. در تحقیق حاضر، اثر تخریب همی سلولزها بر کاهش مدول الاستیسیته بیش از اثر افزایش بلورینگی بر بهبود آن بود. گسستن پیوند لیگنین-کربوهیدرات و بلوری شدن نواحی آمورف سلولز طی اصلاح گرمایی می‌تواند مواد لیگنوسلولزی را شکننده کرده و از دلایل کاهش مقاومت باشد [۴۴]. همچنین، اصلاح گرمایی با کاهش طول زنجیره‌های سلولزی به افت مقاومت خمشی منتهی شد [۱۷].

در مطالعات گذشته گزارش شد که مقاومت و مدول خمشی متناسب با افزایش فشردگی چوب افزایش می‌یابد [۴۵]. فشردگی مفرط می‌تواند سلول چوب را بشکند و متعاقباً، کارایی محصول نهایی و خواص مکانیکی آن کاهش می‌یابد. در فشرده‌سازی چوب اصلاح‌شده با گلوآرال‌دئید، مدول الاستیسیته با برقراری پیوند عرضی بین میکروفیبریل‌های اصلاح‌شده و افزایش صلبیت دیواره سلولی افزایش یافت. نسبت افزایش مدول الاستیسیته با افزایش فشردگی از ۲۵ به ۴۰ درصد، در نمونه‌های اصلاح گرمایی شده بیشتر از شیمیایی بوده است. می‌توان فرض کرد که اثر توأم اتصالات عرضی و افزایش بلورینگی در اصلاح گرمایی بیش از اثر اصلاح شیمیایی بوده است. این امر می‌تواند به دلیل نرم شدن بافت چوب در اثر گرما و بخار باشد که باعث می‌شود ساختار چوب زمان فشرده‌سازی دچار آسیب کمتر می‌شود [۴۶]. نرخ افزایش مقاومت از فشردگی ۲۵ به ۴۰ درصد کمتر از ۱۰ به ۲۵ درصد بود. این پدیده نشان می‌دهد که نرخ فشردگی بسیار زیاد ممکن است خطر تخریب ساختار چوب به دلیل تغییر شکل زیاد سلول را به همراه داشته باشد که علیرغم افزایش دانسیته در فشردگی ۴۰ درصد، به شیب کمتر افزایش مقاومت خمشی انجامید [۲۵]. کاهش در بازگشت فنری و تخریب دیواره سلولی در مقایسه با سطح ۲۵ درصد، دلایل افزایش مقاومت در فشردگی ۴۰ درصد گرمایی در مقایسه با شیمیایی بوده است.

اصلاح شیمیایی به افزایش و اصلاح گرمایی به کاهش مقاومت به فشار موازی الیاف انجامید (شکل ج-۳). میکروفیبریل‌های چوب شاهد با دیواره سلولی نازک، در

فورفوریل‌سیون چوب فشرده‌شده را گزارش کردند [۳۹]. علیرغم هیدرولیز همی‌استال‌های چوب اصلاح‌شده با گلوآرال‌دئید طی غوطه‌وری در آب، به دلیل تشکیل پیوندهای عرضی استالی و پیوند ناشی از فشرده‌سازی بین میکروفیبریل‌ها و کاهش اندازه منافذ، جذب آب و واکنشیدگی ضخامت چوب اصلاح شیمیایی شده کاهش بیشتری در مقایسه با اصلاح گرمایی در فشردگی ۴۰ درصد نشان داد. مسلم است که فشردگی‌های بالاتر به علت جرم بیشتر در واحد حجم، توان بیشتری برای جذب آب و واکنشیدگی ضخامت خواهند داشت. همچنین نیروی ناشی از برگشت دیواره‌ها در سطوح بالاتر فشردگی بیشتر است [۴۰]. ولیکن، اصلاح‌های ترکیبی انجام‌شده در تحقیق حاضر با برقراری اتصال عرضی بیشتر در فشردگی بالاتر و کاهش توانایی جذب آب دیواره سلولی اصلاح‌شده، واکنشیدگی ضخامت فرآورده حاصل را کاهش دادند. واکنشیدگی ضخامت کمتر در نرخ فشردگی‌های بیشتر چوب اصلاح گرمایی شده، نشان می‌دهد که چوب شکل خود را از دست نمی‌دهد و ضخامت پس از آزمون غوطه‌وری در آب افزایش نمی‌یابد. پدیده تغییر شکل پلاستیک یا ویسکوالاستیک ممکن است طی فرآیند گرمایی/فشرده‌سازی به‌واسطه جریان پایدار اجزای دیواره سلولی ایجاد گردد [۴۱].

### خواص مکانیکی

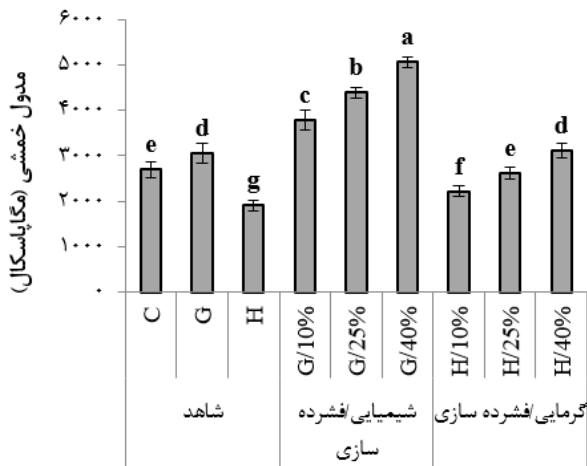
بر اساس نتایج آزمون‌های مکانیکی، اصلاح شیمیایی به افزایش و اصلاح گرمایی به کاهش مدول خمشی انجامید (شکل الف-۳). با اعمال فشردگی، مدول خمشی در نمونه‌های اصلاح شیمیایی و گرمایی افزایش یافت که نسبت این افزایش در نمونه‌های اصلاح گرمایی شده بیشتر از اصلاح شیمیایی شده بود. همچنین، اصلاح شیمیایی و گرمایی به کاهش مقاومت و فشرده‌سازی به بهبود مقاومت منتهی گردید (شکل ب-۳).

گلوآرال‌دئید به دلیل برقراری پیوند ساختاری با چوب، به بهبود مدول الاستیسیته و متعاقب هیدرولیز پلی-ساکاریدها و برقراری اتصال عرضی که آزادی حرکت پلیمرهای چوب را کاهش می‌دهد [۴۲]، به کاهش مقاومت چوب انجامید. در اصلاح گرمایی، تخریب

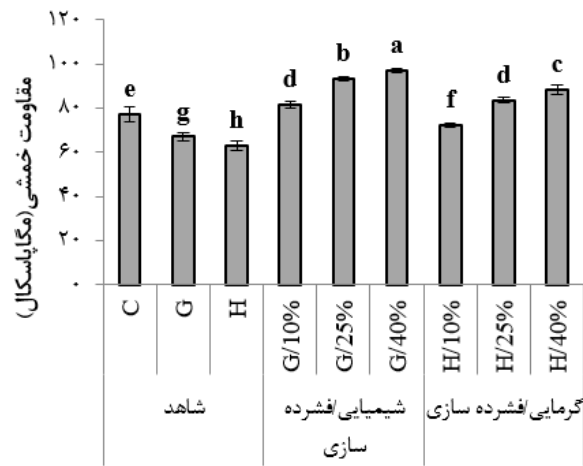
بود. شیب افزایش این مقاومت در گرمایی/فشرده‌گی ۴۰ درصد نسبت به ۲۵ درصد کمتر از گرمایی/فشرده‌گی ۲۵ درصد نسبت به ۱۰ درصد بود.

اصلاح گلوتارآلدئید و گرمایی به ترتیب موجب افزایش و کاهش معنی‌دار سختی شدند (شکل د-۳). برقراری اتصال عرضی بین میکروفیبریل‌ها در اصلاح گلوتارآلدئید، افزایش سختی چوب را به همراه دارد [۵]. بر اساس تحقیقات گذشته، سختی بالاتر چوب استیل‌ه شده به رطوبت کمتر آن نسبت داده شد [۵۱]. تخریب همی سلولزها و تضعیف یا گسیختگی پیوند بین میکروفیبریل‌ها بعد از اصلاح گرمایی نیز به افت سختی انجامید [۵۲].

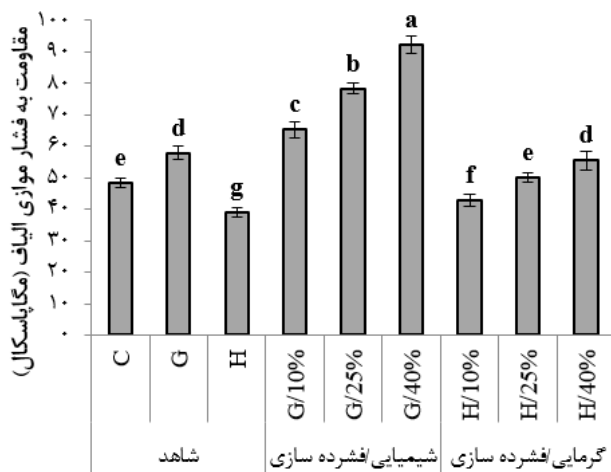
مقابل فشار موازی الیاف دچار کم‌انرژی می‌شود. با افزوده شدن ماده جدید به ساختار چوب در اصلاح گلوتارآلدئید، ثبات و استحکام جانبی آن افزایش یافت. سخت و حجیم شدن دیواره سلولی چوب اصلاح شیمیایی شده، با توجه به اینکه مقاومت محصول نهایی ترکیبی از ویژگی‌های هر یک از اجزای تشکیل‌دهنده آن است، به بهبود محسوس‌تر مقاومت فشاری موازی الیاف چوب اصلاح شیمیایی شده انجامید [۴۷]. اصلاح گرمایی نیز با کاهش وزن و دانسیته به افت مقاومت فشار موازی الیاف چوب انجامید [۵۰-۴۸]. فشرده‌گی نیز موجب بهبود فشار موازی الیاف شد که در اصلاح گلوتارآلدئید در مقایسه با گرمایی محسوس‌تر



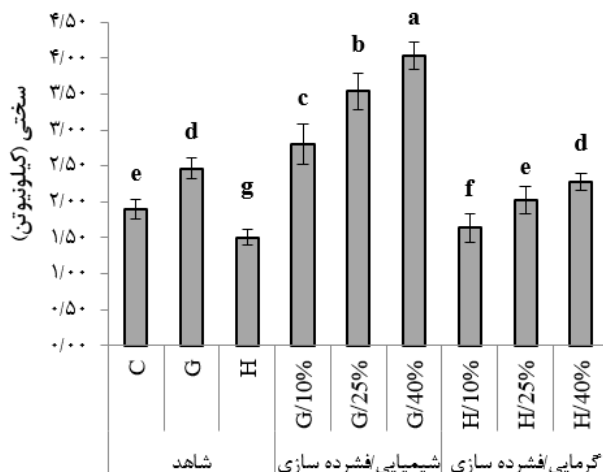
الف



ب



ج



د

شکل ۳- ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌های شاهد (control) و اصلاح‌شده (G: گلوتارآلدئید، H: گرمایی، 10%، 25%، 40% سطوح فشرده‌گی): نمونه‌های شاهد و اصلاح‌شده (الف) مدول خمشی، (ب) مقاومت خمشی، (ج) مقاومت به فشار موازی الیاف، (د) سختی



درصد در تلفیق با اصلاح شیمیایی و در فشردگی ۴۰ درصد، در تلفیق با اصلاح گرمایی محسوس تر بود. فشردگی بیشتر چوب متعاقب نرم شدن دیواره‌های سلولی اصلاح گرمایی شده به افزایش دانسیته، کاهش جذب آب و واکنشیدگی ضخامت در مقایسه با شیمیایی انجامید. بهبود کمتر مقاومت در فشردگی ۴۰ درصد در مقایسه با ۲۵ درصد می‌تواند نشان‌دهنده‌ی تخریب احتمالی ساختار چوب در فشردگی زیاد باشد. بهبود مدول خمشی نمونه‌های اصلاح گرمایی شده در فشردگی ۴۰ درصد به نسبت ۲۵ درصد را احتمالاً می‌توان به اثر توأم اتصالات عرضی و افزایش بلورینگی نسبت داد. فشار موازی الیاف و سختی نیز متناسب با افزایش فشردگی بهبود یافت که در کلیه سطوح فشردگی در تلفیق با گلوپتارآلدئید بیش از گرمایی گزارش گردید. این امر را می‌توان علاوه بر تشکیل اتصال عرضی بین میکروفیبریل‌ها طی فشردگی، به حجیم‌شدگی دیواره سلولی و افزایش صلبیت چوب اصلاح شیمیایی شده نیز نسبت داد. با بهبود خواص چوب تند رشد صنوبر، می‌توان آن را به‌عنوان ماده‌ای مناسب برای کاربردهایی مانند پارکت سازی، کفپوش و تیرهای چوبی توصیه نمود.

سختی متناسب با افزایش فشردگی بهبود یافت که این بهبود در کلیه سطوح فشردگی در نمونه حاوی گلوپتارآلدئید بیش از گرمایی گزارش گردید. شیب افزایش سختی، با افزایش فشردگی تا ۲۵ درصد متعاقب اصلاح شیمیایی و گرمایی بیش از ۴۰ درصد بود. افزایش سختی متعاقب اصلاح گرمایی/فشردگی را می‌توان به تشکیل پیوندهای عرضی و کریستالی شدن میکروفیبریل‌ها در نتیجه بخارزنی طولانی مدت چوب نسبت داد [۳۰]. بهبود سختی متناسب با فشردگی در نمونه‌های اصلاح شیمیایی/فشردگی بیش از گرمایی/فشردگی بود که این امر را می‌توان به برقراری اتصال عرضی بین میکروفیبریل‌های اصلاح‌شده با گلوپتارآلدئید طی فشردگی، حجیم‌شدگی دیواره سلولی و نیز افزایش صلبیت چوب اصلاح شیمیایی شده نسبت داد. تحقیقات پیشین گزارش کردند که فشردگی به بهبود سختی نمونه‌های چوب کاج رادیاتای استیله شده انجامید [۵۳].

### نتیجه‌گیری

فشردگی به بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی چوب اصلاح‌شده انجامید که در اغلب ویژگی‌ها تا سطح ۲۵

### منابع

- [1] Hill, C.A.S., 2006. Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes. Wiley Series in Renewable Resources. Wiley and Sons: Chichester, Sussex, UK, 260p.
- [2] Kocaefe, D., Younsi, R., Poncsak, S. and Kocaefe, Y., 2007. Comparison of different models for the high-temperature heat-treatment of wood. International Journal of Thermal Sciences, 46: 707-716.
- [3] Esmaeeli, N., Ghorbani, M. and Beparva, P., 2016. Determination the optimal conditions of chemical modification on Poplar wood with Glutaraldehyde and physical properties of products. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 2(31): 211-223.
- [4] Esmaeeli, N., Ghorbani, M. and Beparva, P., 2018. Investigation on the physical properties of poplar wood ((Populus deltoides) modified with glutaraldehyde//parafin. Iranian Journal of Wood and Paper Industries, 8(4): 617-630.
- [5] Xiao, Z. Xie, Y. Militz, H. and Mai, C., 2010. Effect of glutaraldehyde on water related properties of solid wood. Holzforschung, 64: 475-482.
- [6] Xie, Y., A. Hill, C.A.S., Xiao, Z., Mai, C. and Militz, H., 2011. Dynamic water vapour sorption properties of wood treated with glutaraldehyde. Journal of Wood Science and Technology, 45: 49-61.
- [7] Tjeerdsma, B.F. and Militz, H., 2005. Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydro thermal and dry heat-treated wood. HolzalsRoh-und Werkstoff, 63(2): 102-111.

- [8] Yildiz, S. and Gumuskaya, E., 2007. The effects of thermal modification on crystalline structure of cellulose in soft and hardwood. *Building and Environment*, 42: 62-67.
- [9] Abe, K. and Yamamoto, H., 2006. Change in mechanical interaction between cellulose microfibril and matrix substance in wood cell wall induced by hygrothermal treatment. *Wood Science*, (52): 107-110.
- [10] Mohebby, B. and Sanaei, I., 2005. Influences of the hydro-thermal treatment on physical properties of beech wood (*Fagusorientalis*). The International Research Group on Wood Preservation, IRG Document No. IRG/WP 05-40303.
- [11] Boonstra, M.J., Van Acker, J., Kegel, E. and Stevens, M., 2006. Optimisation of a two-stage heat treatment process: durability aspects. *Journal of Wood Science and Technology*, 41: 31-57.
- [12] Mohebby, B., Ilbeighi, F. and Kazemi-Najafi, S. 2007. Influence of hydrothermal modification of fibers on some physical and mechanical properties of medium density fiberboard (MDF). *HolzalsRoh-und Werkstoff*, 66: 213-218.
- [13] 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.
- [14] Ahmed, S.H., More'n T., Hagman O., Cloutier A., Fang Ch. and Elustondo D., 2013. Anatomical properties and process parameters affecting blister/blow formation in densified European aspen and downy birch sapwood boards by thermo-hygro-mechanical compression. *Journal of Materials Science*, 24(48): 8571-8579.
- [15] Blomberg, J., Persson, B. and Blomberg, A., 2005. Effects of semi-isostatic densification of wood on the variation in strength properties with density. *Journal of Wood Science and technology*, 39(5): 339-350.
- [16] Sandberg, D., Haller, P. and Navi, P., 2013. Thermo-hydro and thermohydro-mechanical wood processing an opportunity for future environmentally friendly wood products. *Wood Material Science and Engineering*, 8(1): 64-88.
- [17] Ülker, O., İmirzi, Ö. and Burdurlu E., 2012. The effect of densification temperature on some physical and mechanical properties of Scots pine (*Pinus sylvestris*). *Bioresources*, 7(4): 5581-5592.
- [18] Navi, P. and Sandberg, D., 2012. *Thermo Hydro Mechanical Processing of Wood*, EPFL Press, Lausanne, Switzerland, 280 p.
- [19] Pandey, K.K. and Pitman, A.J., 2003. FTIR studies of the changes in wood chemistry following decay by brown-rot and white-rot fungi. *International Biodeterior-ation & Biodegradation*, 52(3): 151-160.
- [20] Windeisen, E., Ba'chle, H., Zimmer, B. and Wegener, G., 2009. Relations between chemical changes and mechanical properties of thermally treated wood. 10th EWLP. Stockholm, Sweden, 25-28 August.
- [21] Kariz, M., Kuzman, M.K., Semek, M., Hughes, M., Rautkari, L., Kamke, F. and Kutnar, A., 2017. Influence of temperature of thermal treatment on surface densification of spruce. . *European Journal of Wood and Wood Products*, 75(1): 113-123.
- [22] Ding, T., Gu, L. and Liu, X., 2011. Influence of steam pressure on chemical changes of heat- treated Mongolian pine wood. *BioResources*, 6(2): 1880-1889.
- [23] Boonstra, M.J. and Tjeerdsma, B., 2006. Chemical analysis of heat treated softwoods. *HolzalsRoh-und Werkstoff*. 64: 204-211.

- [24] Morsing, N. and Hoffmeyer, P., 1998. Densification of Wood: The influence of hygrothermal treatment on compression of beech perpendicular to grain. Kgs. Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark (DTU). (BYG-Rapport; No. R-79).
- [25] Sharifnia, H. and Mohebbi, B., 2010. Enhanced Mechanical Properties of Poplar Wood by a Combined-Hydro-Thermo-Mechanical (CHTM) Modification, Iranian Journal of Wood and Paper Industries, 1(1): 57-66.
- [26] Kutnar, A., Sernek, M. 2007. Densification of wood. Zbornik Gozdarstva in Lesarstva, 82: 53-62.
- [27] Gong, M., Nakatani, M., Yang, Y. and Afzal, M., 2006. Maximum compression ratios of softwoods produced in eastern Canada. In: Proceedings of the 9th World Conference on Timber Engineering. Portland, Oregon, USA, 6-10 August.
- [28] Bekhta, P., Proszkyk, S., Krystofiak, T. and Lis, B., 2015. Surface wettability of short-term thermo-mechanically densified wood veneers. European Journal of Wood and Wood Product, 73: 415-417.
- [29] Liu, H., Shang, J., Chen, X., Kamke, F.A., and Guo, K., 2013. The influence of thermal-hydro-mechanical processing on chemical characterization of Tsuga heterophylla. Journal of Wood Science and technology, 48:373-392.
- [30] Dwianto, W., Morooka, T., Norimoto, M. and Kitajima, T., 2005. Stress relaxation of sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) wood in radial compression under high temperature steam. *Holzforschung*, 53: 541-546.
- [31] Bao, M., Huang, X., Jiang, M., Yu, W. and Yu, Y., 2017. Effect of thermo-hydro-mechanical densification on microstructure and properties of poplar wood (*Populus tomentosa*). *Journal of Wood Science*, 63(6): 591-605.
- [32] Inoue, M., and Norimoto, M., 2008. Fixation of compressive deformation in wood by pre-steaming. *Journal of Tropical Forest Science*, 20: 273-281.
- [33] Hakkou, M., Ptrissans, M., Bakali, E.I., Gerardin, P., and Zoulalian, A., 2005. Investigation of wood wettability changes and mass loss during heat treatments of wood. *Holzforschung*, 59: 35-37.
- [34] Hakkou, M., Petrissans, M., Gerardin, P. and Zoulalian, A., 2006. Investigations of the reasons for fungal durability of heat-treated beech wood. *Polymer Degradation and Stability*, 91:393-397.
- [35] Sivonen, H., Maunu, S.L., Sundholm, F., Jämsä, S. and Viitaniemi, P., 2002. Magnetic resonance studies of thermally modified wood. *Holzforschung*, 56(6): 648-654.
- [36] Kartal, S.N., Green, F. and Clausen, C.A., 2009. Do the unique properties of nanometals affect leachability or efficacy against fungi and termites. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 63: 490-495.
- [37] Repellin, V. and Guyonnet, R., 2005. Evaluation of heat treated wood swelling by differential scanning calorimetry in relation with chemical composition. *Holzforschung*, 59(1): 28-34.
- [38] Adler, D.C., Bueher, M.J., 2013. Mesoscale mechanics of wood cell walls under axial strain. *Soft Matter*, 9: 7138-7144.
- [39] Pfriem, A., Dietrich, T. and Buchelt, B., 2012. Furfuryl alcohol impregnation for improved plasticization and fixation during the densification of wood. *Holzforschung*, 66: 215-218
- [40] Edalat, H.R., Tabarsa, T. and Reisi, M., 2008. Densification of Paullownia wood by using of hot-press. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 2(23):136-148.
- [41] Keckes, J., Burgert, I., Frühmann, K., Müller, M., Kolln, K. and Hamilton, M., 2003. Cell-wall recovery after irreversible deformation of wood. *Nature Materials*, 2: 810-813.

- [42] Mamiński, M.L.J., Pawlicki A.Z. and. Parzuchowski P., 2007. Glutaraldehyde modified MUF adhesive system Improved hot water resistance. *HolzalsRoh-und Werkstoff*, 65: 251-253.
- [43] Boruvka, V., Zeidler, A., Holeček, T., and Roman DudíkR., 2018, Elastic and Strength Properties of Heat-Treated Beech and Birch Wood, *Forests*, 9 (4): 197-214.
- [44] Winday, J.E. and Rowell, M.R., 2005. Chemistry of wood strength. In: *Wood Chemistry and Wood Composites*. Ed. Rowell, M.R. Taylor and Francis, Boca Raton: 303-347.
- [45] Kutnar, A., Kamke, F.A. and Sernek, M., 2008. The mechanical properties of densified VTC wood relevant for structural composites. *HolzalsRoh-und Werkstoff*, 66(6): 439-446
- [46] Inoue, M., Norimoto, M., Tanahashi, M. and Rowell, R.M., 1993. Steam heat fixation of compressed wood. *Wood and Fiber Science*, 25(3): 224-235.
- [47] Buchelt, B., Dietrich, T. and Wagenfuhr, A., 2012. Macroscopic and microscopic monitoring of swelling of beech wood after impregnation with furfuryl alcohol. *European Journal Wood Product*, 70(6): 865-869.
- [48] Cai, J., Yang, X., Cai, L. and Shi, S.Q., 2013. Impact of the combination of densification and thermal modification on dimensional stability and hardness of poplar lumber. *Drying Technology*, 31(10): 1107-1113.
- [49] Zhan, J.F., Cao, J. and Gu, J.Y., 2015. Surface-densification and hightemperature hydrothermal post treatment of the *Abies nephrolepis* lumber (in Chinese). *Journal Nanjing Forest Univ (Natural Science Edition)*, 39(3): 119-124.
- [50] Laine, K., Rautkari, L., Hughes, M. and Kutnar, A., 2013. Reducing the setrecovery of surface densified solid Scots pine wood by hydrothermal post-treatment. *European Journal of Wood Products*, 71(1): 17-23.
- [51] Laine, K., Segerhol, K., Wålinder, M., Rautkari, L., Hughes, M. and Lankveld. C., 2016a. Surface densification of acetylated wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74(6): 829-835.
- [52] Yildiz, U.C., Yildiz, S.G and Gezer, E.D., 2005. Mechanical properties and decay resistance of wood-polymer composites prepared from fast growing species in Turkey. *Bioresource Technology*, 96:1003-1011.
- [53] Laine, K., Segerhol, K., Wålinder, M., Rautkari, L. and Hughes, M., 2016b. Wood densification and thermal modification: hardness, set-recovery and micromorphology. *Journal of Wood Science and Technolgy*, 50:883-894.

## Effect of densification on the practical properties of chemical and thermal modified poplar wood

### Abstract

For investigation on the effect of densification on the physical and mechanical properties of the chemically and thermally modified poplar wood (*Populus deltoides*), thermal modification at 170°C, chemical modification with glutaraldehyde, and compression at three levels of 10, 25, and 40% at the hot pressing time of 2h were carried out. With increasing compression ratio from 25 to 40%, the density of thermally and chemically modified samples increased by 13% and 8%, respectively. Spring back and moisture absorption of the thermally modified/compressed samples was more than chemically modified/compressed ones. Water absorption and thickness swelling for 10% compression ratio were more than the chemical and thermal control samples but significantly decreased with increasing compression ratio. The mechanical properties of both thermally and chemically modified samples were improved with increasing compression ratio. From 25 to 40% compression, improvement of bending modulus for both modified samples was more than 10 to 25%, which was more significant for the thermally modified samples. Bending strength was also improved with increasing compression ratio, but the intensity of improvement decreased by 40% compression. Increasing of compression ratio also led to a significant improvement of the compression strength parallel to grain and hardness, which was more obvious for glutaraldehyde modified specimens than the thermally modified ones.

**Keywords:** densification, glutaraldehyde, thermal modification, physical properties, mechanical properties.

M. Ghorbani<sup>1\*</sup>  
A. Nikkhah Shahmirzadi<sup>2</sup>  
A. Toopa<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Associate Prof., Department of Wood and paper, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

<sup>2</sup> Ph.D. Student., Department of Wood and paper, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

<sup>3</sup> M. Sc graduated, Department of Wood and Paper Sciences, College of Agriculture and Natural Resources, Tehran University, Tehran, Iran.

Corresponding author:  
[ghorbani\\_mary@yahoo.com](mailto:ghorbani_mary@yahoo.com)

Received: 2019/08/24  
Accepted: 2019/10/11