

ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چوب اصلاح شده با فرایند بخار گرمایی

رضا حاجی‌حسینی^۱، بهبود محبی^{۲*}، سعید کاظمی نجفی^۳ و پرویز ناوی^۴

۱- دانشجوی دکترا، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس

۲* - نویسنده مسئول، دانشیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس

پست الکترونیک: Mohebbbyb@modares.ac.ir

۳- استاد، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس

۴- استاد، گروه معماری، مهندسی چوب و سازه چوبی، دانشگاه برن، سوئیس

تاریخ دریافت: مهر ۱۳۹۵ تاریخ پذیرش: آذر ۱۳۹۵

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی تأثیر اصلاح بخار گرمایی (Hygro-Thermal Treatment) چوب صنوبر (*Populus deltoides* L.) بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آن انجام شد. در این بررسی تیمار بخار گرمایی در دماهای ۱۳۰، ۱۵۰ و ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد و برای مدت زمان ماندگاری ۲۰ و ۴۰ دقیقه انجام شد. آزمون‌های فیزیکی؛ شامل اندازه‌گیری افت وزن و کلاپس ناشی از تیمار، تغییرات دانسیته، ثبات ابعادی، زبری سطح و آزمون‌های مکانیکی؛ شامل مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته در چوب تیمار شده انجام شدند. نتایج نشان دادند که تیمار بخار گرمایی موجب بهبود ثبات ابعادی، افزایش کلاپس و زبری سطح و کاهش جرم و دانسیته چوب صنوبر شده است. همچنین این فرایند سبب کاهش مقاومت خمشی و افزایش مدول الاستیسیته شد. از سوی دیگر، با افزایش دمای تیمار و مدت زمان ماندگاری کاهش وزن، افت دانسیته و همچنین افزایش پدیده کلاپس روی داد؛ درحالی‌که افزایش ثبات ابعاد با دمای تیمار و مدت زمان ماندگاری رابطه مستقیم دارد.

واژه‌های کلیدی: اصلاح بخار گرمایی، زمان ماندگاری، صنوبر (*Populus deltoides* L.)، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی.

مقدمه

از درختان متفاوتی تهیه می‌گردد؛ محدودیت‌هایی مانند جذب رطوبت، تغییرات ابعادی، تخریب توسط عوامل مخرب زیستی، اشعه ماورای بنفش و هوازدگی و ... را در خواص و کاربرد آن ایجاد می‌کند؛ از این رو این ماده طبیعی ممکن است برای افزایش کارایی و رسیدن به شایستگی کاربرد خاص، نیازمند تیمارهای اصلاحی مانند اصلاح مکانیکی باشد (Navi & Sandberg, 2011). اصلاح چوب ثبات ابعادی آن را به همراه دارد؛ جذب رطوبت را کاهش و

چوب به عنوان یک زیست‌بسپار^۱ دارای مزایای بی‌ظیری از جمله دسترسی آسان، تجدیدپذیر بودن، انعطاف‌پذیری، سهولت فرآوری، سبکی، سازگاری زیست‌محیطی و ... می‌باشد که آن را برای هزاران سال مورد توجه قرار داده است. با وجود این، این حقیقت که چوب یک ماده طبیعی است و

1 - Biopolymer

و یا نیازمندی به بازیابی مواد شیمیایی و یا پاک‌سازی آنها را داشته باشد (Garrote *et al.*, 1999). در اثر اصلاح گرمایی فراورده‌های تیمار شده دارای دوام بیولوژیکی بیشتر (Navi & Sandberg, 2011)، آب‌گریزتر (Mohebbi *et al.*, 2009) رطوبت تعادل کمتر (Metsa-Kortelainen *et al.*, 2006) و پایداری ابعادی بهتری خواهند بود (Esteves *et al.*, 2007).

یکی از فرایندهای تیمارهای بر پایه آب، تیمار بخارگرمایی^۲ است که در آن به جای آب با دمای بالا از بخار آب با دمای زیاد استفاده می‌شود. در فرایند تیمار بخارگرمایی نیز گروه‌های استیل همی سلولز حذف و به اسید استیک تبدیل می‌شوند. هیدرولیز اسیدی پلی ساکاریدهای دیواره سلولی، سبب تولید مونوساکاریدهای قابل حل در آب (آرابینوز، گالاکتوز، گلوکز، زایلوز و مانوز) می‌شود (Ramos, 2003). حضور اسید استیک مشتق شده از همی سلولز نیز عاملی برای افزایش تخریب لیگنین می‌باشد. تخریب پیوندهای B-O-4 در لیگنین سوزنی‌برگان در طول فرایند گرمایی دلیل اصلی کاهش سفتی چوب می‌باشد (Assor *et al.*, 2009). بسیار لیگنین در زمان تیمار دچار تخریب، نوآرایی و تشکیل ساختار جدید می‌شود. گاه لیگنین نوساختار شده موجب افزایش مقاومت به ضربه در نمونه‌های تیمار شده می‌گردد. همچنین لیگنین اصلاح شده مقاومت چوب تیمار شده به جذب آب را افزایش می‌دهد (Biswas *et al.*, 2011).

بخار دهی ذرات چوب در دمای بیش از ۲۰۰°C سبب هیدرولیز همی سلولزها و انجام واکنش‌های تراکمی لیگنین، افزایش خاصیت ارتجاعی و کاهش سختی ذرات چوب دوگلاس فر می‌گردد. بهبود ثبات ابعادی و سختی ذرات تیمار شده با بخار به دلیل نقش اتصال‌دهندگی مونوساکاریدهای آزاد شده از چوب دوگلاس فر در طول فرایند بخار گرمایی روی می‌دهند (Lam *et al.*, 2013). نتایج بررسی اثر تیمار گرمایی بر ترکیبات ساختاری چوب

دوام زیستی آن را افزایش می‌دهد. از طرفی افزایش دوام در برابر عوامل غیر بیولوژیکی را نیز به همراه دارد (Hill, 2006).

تاکنون دامنه وسیعی از روش‌ها و تکنیک‌های مختلف اصلاح مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. با وجود تنوع در ماهیت تکنیک‌های مختلف اصلاح، اثر آنها در افزایش دوام اغلب با کاهش مقدار رطوبت در چوب اصلاح شده ارتباط دارد. با وجود این تاکنون هیچ معیاری برای میزان کاهش مقاومت به تخریب پایه‌گذاری نشده است (Thybring, 2013). یکی از روش‌های اصلاح چوب تیمار گرمایی^۱ می‌باشد که به‌عنوان یک تکنولوژی و روش دوستدار محیط‌زیست از دیدگاه‌های گوناگون مورد مطالعه قرار گرفته است. تکنیک‌های متعددی از فرایند تیمار گرمایی وجود دارند و تعدادی از آنها متناوباً در حال رشد و توسعه می‌باشند. این فرایندها به‌طور کلی با نام فرایند گرمایی شناخته شده‌اند که بر پایه آب و گرما می‌باشد. نتایج بررسی‌ها در زمینه‌های مختلف این فرایندها نیز نشان می‌دهند که ویژگی‌های چوب؛ از قبیل ثبات ابعادی و دوام چوب بهبود می‌یابند (Navi & Sandberg, 2011). در فرایند گرمایی، آب در درجه حرارت بالا به یون‌های هیدرونیوم تبدیل می‌شود و بعد با حمله به بسپارهای قندی؛ مانند همی سلولزها سبب تجزیه آنها و تشکیل اسیدهای آلی می‌شود. حمله اسیدهای تشکیل شده به ساختارهای بسپاری دیواره‌های سلولی؛ پلی ساکاریدها را هیدرولیز می‌کند. پروتون تشکیل شده از آب (یون‌های هیدرونیوم)، واکنش‌های استیل‌زدایی و هیدرولیز همی سلولز را افزایش می‌دهد (Liu, 2008; Garrote *et al.*, 1999). این فرایند تخریبی گاه اثر ناخوشایندی بر ویژگی‌های مکانیکی چوب می‌گذارد. در کنار ویژگی‌های خوبی که بر اثر این تیمارها به دست می‌آیند؛ باید گفت که این روش‌های تیمار اساساً دوست‌دار طبیعت می‌باشند و فرایند فاقد ترکیب‌های زیان‌آوری است که سبب بروز مشکلات مربوط به خوردگی

ترکیبات دارای کربن بالا و مواد استخراجی تخریب شده و متعاقب آن واکنش‌های اکسیداسیون و هیدرولیز سطح اتفاق افتاده و سبب تغییر خصوصیات سطح از جمله زبری می‌گردد (Dioufa *et al.*, 2011).

به‌طور کلی برای آشکار شدن اثرات تیمار بخار گرمایی بر خواص فیزیکی و مکانیکی چوب صنوبر، این پژوهش سعی بر پاسخگویی به این پرسش را دارد که آیا ویژگی‌های فیزیکی چوب صنوبر تحت تأثیر تیمار بخار گرمایی قرار می‌گیرند؟ دیگر ویژگی‌های چوب تحت تأثیر تیمار چه تغییری پیدا می‌کنند؟ با توجه به اینکه گونه‌های مختلف چوب در تیمار گرمایی رفتارهای گوناگونی را نشان می‌دهند و از سوی دیگر شرایط تیمار؛ مانند دمای تیمار و مدت زمان ماندگاری در آن تیمار، می‌تواند سبب بهبود خواص کاربردی چوب؛ به‌ویژه افزایش ثبات ابعادی و کاهش جذب و دفع رطوبت و واکنش‌دهی ضخامت گردد؛ لذا به‌کارگیری این تیمار چه تغییراتی را در خصوصیات مکانیکی ایجاد کرده و چه مزایا و محدودیت‌هایی را به همراه خواهد داشت؟ از این‌رو بررسی تغییرات خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های تیمار شده در دما و زمان‌های مختلف تیمار بخار گرمایی می‌تواند ضمن به دست آوردن شرایط بهینه تیمار، محصولی با ویژگی‌های کاربردی برتر در اختیار ما قرار دهد. به عبارتی دیگر، ایجاد شرایط مناسب تیمار گرمایی در فرایند بخار گرمایی می‌تواند مزایای یک تیمار حفاظتی دوستدار محیط‌زیست را به همراه داشته باشد و خصوصیات فیزیکی مناسبی را در محصول چوبی مورد نظر تأمین کند.

مواد و روش‌ها

تهیه و آماده‌سازی چوب صنوبر: گونه چوبی مورد نظر در این تحقیق صنوبر دلتوئیدس (*Populus deltoides* L.) بود که از مجتمع تحقیقاتی البرز در کرج تهیه گردید. سپس برای انجام تیمار بخار گرمایی و نیز بررسی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چوب شاهد، نمونه‌هایی بر اساس استاندارد ASTM D 143-09 تهیه و آماده‌سازی شدند.

درخت لیمو و انجام طیف‌سنجی NIR دوبعدی نشان دادند که در اثر تیمار گرمایی گروه‌های هیدروکسیل (O-H) و کربونیل (C-O) سلولز، همی سلولزها و لیگنین تحت تأثیر قرار می‌گیرند و تغییر می‌کنند (Popescu & Popescu, 2013).

تیمار گرمایی چوب راش در دمای ۱۳۰ و ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ماندگاری ۳۰ دقیقه سبب افزایش افت وزن و هم‌کشیدگی حجمی به دلیل تخریب همی سلولزها و پلی‌ساکاریدهای دیواره سلولی می‌گردد. کاهش جذب آب و رطوبت‌پذیری با افزایش دمای تیمار گرمایی نیز به دلیل تخریب گروه‌های هیدروکسیل و تبدیل آنها به گروه‌های اتری (C-O-C) و ایجاد اتصالات عرضی می‌باشد. همچنین افزایش نسبی دانسیته چوب راش در اثر تیمار گرمایی به دلیل بالا بودن واکنش‌دهی حجمی نسبت به افت وزن بوده است. تیمار گرمایی دارای اثر منفی بر مقاومت برشی موازی الیاف و مقاومت برشی خط چسب بوده و سبب کاهش pH چوب نیز می‌گردد؛ ضمن آنکه افزایش دمای تیمار این وضعیت را تشدید می‌کند (Mirzaei *et al.*, 2012).

بررسی‌ها نشان می‌دهند که تیمار گرمایی با وجود بهبود برخی از ویژگی‌های فیزیکی، گاهی به دلیل تخریب ساختاری چوب سبب کاهش دانسیته و در نتیجه کاهش خواص مکانیکی چوب می‌گردد. البته برای برطرف کردن این ایراد می‌توان از روش‌های دیگر اصلاح از جمله اصلاح مکانیکی استفاده کرد که یک روش اصلاحی بسیار مؤثر برای افزایش دانسیته و در نتیجه بهبود خواص مکانیکی چوب می‌باشد، که به‌ویژه برای گونه‌های سبک و با دانسیته کم مانند صنوبرها می‌تواند مناسب باشد (Mohebbi *et al.*, 2009).

پژوهش‌های گوناگون نشان می‌دهند که تیمار گرمایی می‌تواند بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سطح چوب و مواد مرکب چوبی تأثیر بگذارد. در فرایند بخار گرمایی ویژگی‌های سطحی چوب تیمار شده به دلیل اثر هم‌زمان رطوبت و حرارت تغییر می‌کند، به‌طوری‌که این تیمار سبب افزایش زبری نمونه‌های تیمار شده نسبت به نمونه‌های شاهد می‌گردد (Jennings *et al.*, 2006). در طول این فرایند،

ASTM D 143-09 تهیه و همراه با نمونه‌های اصلی تیمار شدند. سپس نمونه‌ها در آون و در دمای $103 \pm 2^\circ\text{C}$ و زمان ۲۴ ساعت خشک شده و وزن و ابعاد خشک آنها تعیین و دانسیته آنها بر اساس رابطه ۳ محاسبه شد.

$$M_L = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad \text{رابطه ۱}$$

M_L = کاهش جرم (%), M_1 = وزن خشک نمونه پیش از تیمار بخارگرمایی (g), M_2 = وزن خشک نمونه پس از تیمار بخارگرمایی (g)

$$C = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \times 100 \quad \text{رابطه ۲}$$

C = کلاپس (%), V_1 = حجم خشک نمونه پیش از تیمار بخارگرمایی (g), V_2 = حجم خشک نمونه پس از تیمار بخارگرمایی (g)

$$D_0 = \frac{M_0}{V_0} \quad \text{رابطه ۳}$$

D_0 = دانسیته خشک (g/cm^3), M_0 = وزن خشک آزمونه (cm^3), V_0 = حجم خشک آزمونه (cm^3)

۳ - ثبات ابعادی: برای تعیین ثبات ابعادی، نمونه‌های تیمار شده به ابعاد $2 \times 2 \times 2$ سانتی‌متر تهیه شدند و پس از خشک شدن در آون و تعیین ابعاد خشک آنها، در معرض چرخه‌های پی‌درپی غوطه‌وری در آب و خشکانیدن در آون (دمای $103 \pm 2^\circ\text{C}$ و زمان ۲۴ ساعت) قرار گرفتند و تغییر ابعاد آنها بر پایه ابعاد خشک اولیه و بر اساس رابطه ۴ تعیین گردید. چرخه‌های غوطه‌وری - خشکانیدن در طی ۵ مرحله و هریک به مدت ۴۸ ساعت به طول انجامید (Mohebbi *et al.*, 2009; Xu & Tang, 2012).

تیمار بخارگرمایی نمونه‌ها: نمونه‌های تهیه شده با ابعاد $5 \times 5 \times 5$ سانتی‌متر در درون سیلندر فولادی و در دماهای 130 ، 150 و 170 درجه سانتی‌گراد و با زمان‌های ماندگاری 20 و 40 دقیقه تحت تیمار بخارگرمایی قرار گرفتند. پس از تیمار، ابتدا در هوای آزاد قرار داده شدند تا از رطوبت آنها کاسته شود و بعد در داخل آون و در دمای 60°C خشک گردیدند. سپس این نمونه‌ها تحت شرایط آزمایشگاهی تا رسیدن به رطوبت تعادل کاربردی $12-13$ درصد متعادل‌سازی (دمای $20 \pm 2^\circ\text{C}$ و رطوبت نسبی 5 ± 65 درصد) شدند. از قطعات چوبی خشک شده نیز نمونه‌هایی برای کنترل رطوبت تهیه و مورد آزمون رطوبت‌سنجی قرار گرفتند. برای بررسی تأثیر فرایند بخارگرمایی بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چوب‌های تیمار شده، نمونه‌ها بر اساس روش‌های سنجش گفته شده در پایین مورد ارزیابی قرار گرفتند.

داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها، بر اساس طرح آماری کاملاً تصادفی متعادل تحت آزمون فاکتوریل با دو فاکتور دمای تیمار بخارگرمایی و مدت زمان ماندگاری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند و در صورت معنی‌دار بودن اثر هریک از تیمارها، از آزمون مقایسه میانگین دانکن استفاده شد.

بررسی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های شاهد و اصلاح شده

۱- کاهش جرم^۱ و فروریزش ساختاری (کلاپس شدن): برای بررسی تأثیر تیمار بخارگرمایی بر میزان افت وزن و همچنین بروز کلاپس در چوب‌های تیمار شده، نمونه‌هایی به ابعاد $5 \times 5 \times 5$ سانتی‌متر تهیه و همراه با نمونه‌های اصلی تیمار شدند (Mirzaei *et al.*, 2012). وزن و ابعاد خشک این نمونه‌ها پیش و پس از تیمار بخارگرمایی تعیین و بعد بر اساس روابط ۱ و ۲ به ترتیب میزان افت وزن و کلاپس شدن آنها محاسبه گردیدند (نمونه‌ها در آون و در دمای $103 \pm 2^\circ\text{C}$ و زمان ۲۴ ساعت خشک شدند).

۲ - تغییرات دانسیته: برای بررسی تأثیر تیمار بخارگرمایی بر دانسیته چوب‌های تیمار شده، نمونه‌هایی به ابعاد $2/5 \times 2/5 \times 2/5$ سانتی‌متر و بر اساس استاندارد

$$MOR = \frac{3p_u l}{2bh^2} \quad \text{رابطه ۵}$$

$$MOE = \frac{p_{pl} l^3}{4bh^3 d_{pl}} \quad \text{رابطه ۶}$$

MOR = مدول گسیختگی (N/mm²)، MOE = مدول الاستیسیته ظاهری (N/mm²)، p_{pl} = بار در حد تناسب (N)، p_u = بار نهایی (N)، l = طول دهانه (mm)، b = پهنا (mm)، h = ارتفاع (mm)، d_{pl} = تغییر مکان وسط تیر در حد تناسب (mm)

نتایج

۱- کاهش جرم و فروریزش ساختاری (کلاپس شدن) نتایج حاصل از اندازه‌گیری افت وزن نمونه‌های تیمار شده با فرایند بخارگرمایی نشان دادند که دمای تیمار بخارگرمایی و زمان ماندگاری اثر دارند (شکل ۱). یافته‌های به دست آمده نشان دادند که با افزایش دمای بخارگرمایی و زمان ماندگاری افت وزن افزایش می‌یابد؛ به طوری که بیشترین مقدار افت وزن مربوط به دمای بخارگرمایی ۱۷۰°C و زمان ماندگاری ۴۰ دقیقه و کمترین مقدار افت وزن مربوط به دمای بخارگرمایی ۱۳۰°C و زمان ماندگاری ۲۰ دقیقه بود. بر اساس نتایج، نقش افزایش دما در افت وزن چوب بیش از زمان ماندگاری بود (شکل ۱).

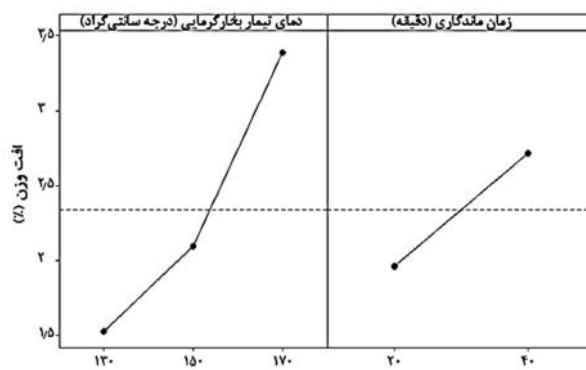
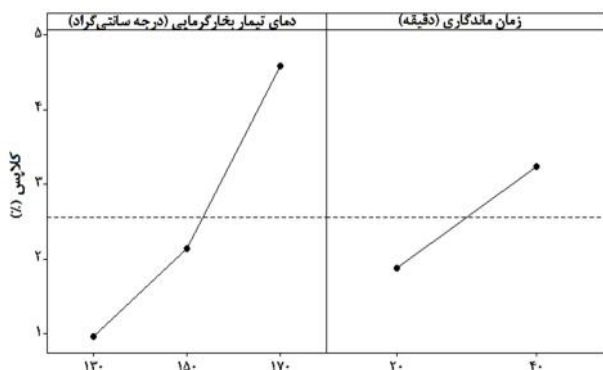
$$ASE = \frac{S_u - S_t}{S_u} \times 100 \quad \text{رابطه ۴}$$

ASE = اثر ضد واکشیدگی (%)، S_u = واکشیدگی حجمی نمونه شاهد (%)، S_t = واکشیدگی حجمی نمونه تیمار شده (%)

۴- زبری سطح چوب: برای اندازه‌گیری زبری سطح نمونه‌های شاهد و اصلاح شده به روش تیمار بخارگرمایی، با توجه به تأثیرگذار بودن رطوبت بر زبری سطح چوب، ابتدا نمونه‌های آزمونی تحت شرایط متعادل‌سازی (دمای ۲۰±۲°C و رطوبت نسبی ۵±۶۵ درصد) قرار گرفتند تا به تعادل رطوبتی حدود ۱۲ درصد برسند. سپس با استفاده از دستگاه SURFACE ROUGHNESS TESTER مدل HUATEC SRT-6200 زبری سطح نمونه‌ها به روش پروفیلومتری و اندازه‌گیری دو پارامتر زبری سطح (Ra^۱: میانگین زبری سطح، Rz^۲: متوسط نقاط اوج تا دره برای ۵ نقطه) و بر اساس استاندارد ISO 4287 تعیین شد.

۵- آزمایش خمش استاتیکی و مدول الاستیسیته: نمونه‌های چوبی شاهد و تیمار شده به روش اصلاح بخارگرمایی (برش خورده به ابعاد ۴۱ × ۲/۵ × ۲/۵ سانتی‌متر)، پس از متعادل‌سازی رطوبت (دمای ۲۰±۲°C و رطوبت نسبی ۵±۶۵ درصد)، بر اساس استاندارد ASTM D 143-09 تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای قرار گرفتند و بعد با استفاده از روابط ۵ و ۶، مدول‌های گسیختگی و الاستیسیته آنها، محاسبه شد.

1- Average Surface Roughness
2- Mean Peak-to-Valley Height



شکل ۱- اثر مستقل دمای تیمار بخار گرمایی و زمان ماندگاری بر افت وزن و کلاپس شدن در فرایند بخار گرمایی

130°C و زمان ماندگاری ۲۰ دقیقه بود؛ اما با این حال موقعیت نمونه‌های شاهد در شکل ۲ نشان‌دهنده اندکی کاهش دانسیته چوب در اثر تیمار بخار گرمایی حتی در دما و زمان ماندگاری کم می‌باشد. در مقایسه نقش دمای تیمار و زمان ماندگاری، اثر مشابهی را می‌توان برای کاهش دانسیته چوب صنوبر دید (شکل ۲).

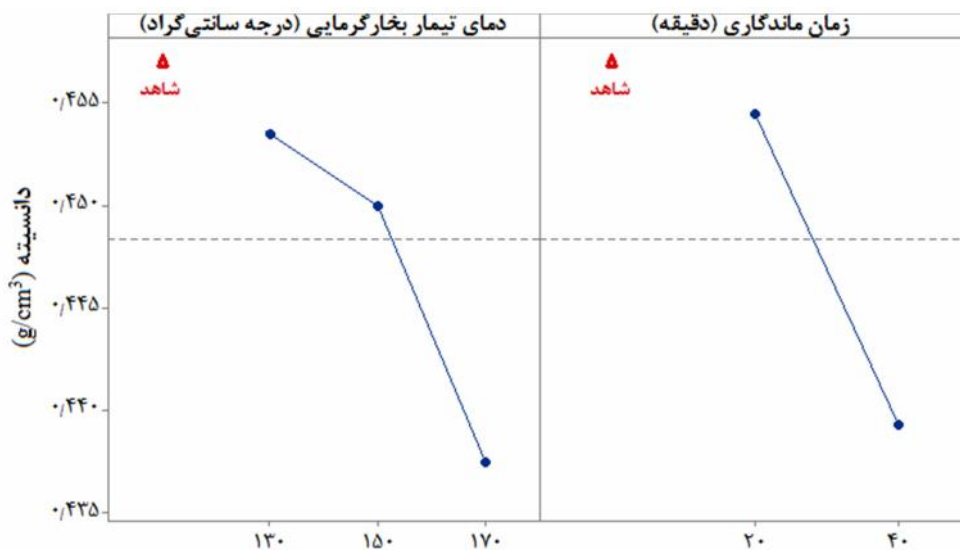
۳- ثبات ابعادی

نتایج اثرگذاری تیمار بخار گرمایی بر ثبات ابعادی نمونه‌ها پس از ۵ مرحله غوطه‌وری در آب و خشکاندن نشان داد که اثر مستقل دمای تیمار بخار گرمایی و زمان ماندگاری معنی‌دار می‌باشد. شکل ۳ بیانگر بهبود ثبات ابعادی با افزایش دمای بخار گرمایی و زمان ماندگاری می‌باشد. بیشترین مقدار ثبات ابعادی مربوط به دمای بخار گرمایی 170°C و زمان ماندگاری ۴۰ دقیقه و کمترین مقدار ثبات ابعادی مربوط به دمای بخار گرمایی 130°C و زمان ماندگاری ۲۰ دقیقه بود. از این رو ملاحظه می‌گردد که تیمار بخار گرمایی حتی در دما و زمان ماندگاری کم نیز سبب بهبود ثبات ابعادی می‌گردد. همچنین شکل ۳ بیانگر پایداری ثبات ابعادی پس از ۵ مرحله غوطه‌وری-خشکاندن می‌باشد.

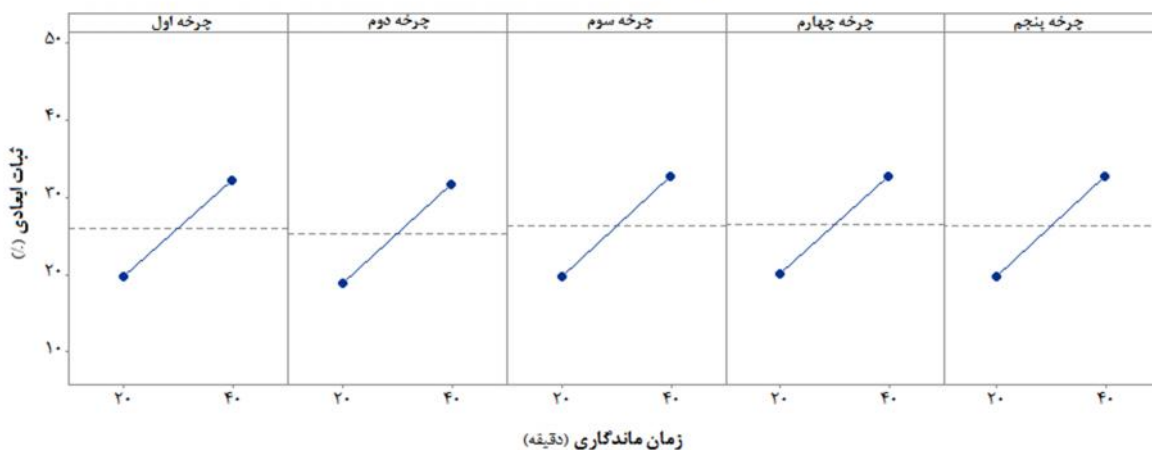
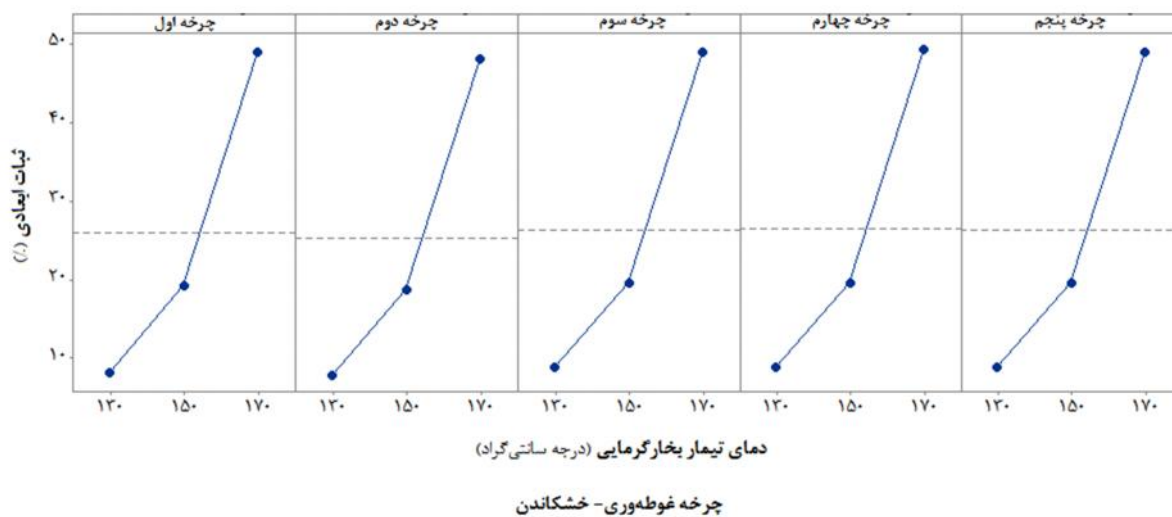
یکی از اثرات تیمار بخار گرمایی در نمونه‌های تیمار شده، کلاپس شدن محدود نمونه‌ها بود. نتایج بیانگر اثر دمای تیمار بخار گرمایی و زمان ماندگاری بر این پدیده فیزیکی بود (شکل ۱). مشخص شد که با افزایش دمای بخار گرمایی و زمان ماندگاری مقدار کلاپس شدن افزایش می‌یابد، اما نقش دمای تیمار در میزان کلاپس شدن بیش از زمان ماندگاری بود (شکل ۱). بیشترین مقدار کلاپس مربوط به دمای بخار گرمایی 170°C و زمان ماندگاری ۴۰ دقیقه و کمترین مقدار کلاپس مربوط به دمای بخار گرمایی 130°C و زمان ماندگاری ۲۰ دقیقه بود.

۲- تغییرات دانسیته

تیمار بخار گرمایی در درجه حرارت و زمان‌های مختلف، سبب تغییر دانسیته چوب می‌گردد. نتایج به‌دست‌آمده بیانگر اثر دما و زمان ماندگاری بر دانسیته نمونه‌های تیمار شده با فرایند بخار گرمایی بودند (شکل ۲). به طوری که با افزایش دما و زمان ماندگاری مقدار دانسیته اندکی کاهش می‌یابد. همان طوری که شکل ۲ نشان می‌دهد بیشترین مقدار کاهش دانسیته مربوط به نمونه‌های تیمار شده در دمای بخار گرمایی 170°C و زمان ماندگاری ۴۰ دقیقه و کمترین مقدار کاهش دانسیته نیز مربوط به نمونه‌های بخار گرمایی شده در دمای



شکل ۲- اثر مستقل دمای تیمار بخار گرمایی و زمان ماندگاری بر دانسیته در فرایند بخار گرمایی چرخه غوطه‌وری - خشکاندن



شکل ۳- اثر مستقل پارامترهای تیمار بخار گرمایی بر ثبات ابعادی طی ۵ چرخه غوطه‌وری - خشکاندن

۴- زبری سطح چوب

افزایش زبری سطح نمونه‌های تیمار شده، گردید. اما با این حال بین زبری سطح نمونه‌های تیمار بخار گرمایی شده در دماهای مختلف ۱۳۰، ۱۵۰ و ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد و زمان‌های ماندگاری ۲۰ و ۴۰ دقیقه اختلاف چندانی وجود ندارد (جدول ۱).

نتایج بررسی پارامترهای زبری سطح (Ra): میانگین زبری سطح، Rz: متوسط اوج تا دره برای ۵ نقطه) نمونه‌های شاهد و تیمار شده با فرایند بخار گرمایی نشان داد که این فرایند بر زبری سطح اثرگذار بود و به‌طور معنی‌داری سبب

جدول ۱- میانگین زبری سطح (Ra و Rz) نمونه‌های تیمار شده با فرایند بخار گرمایی

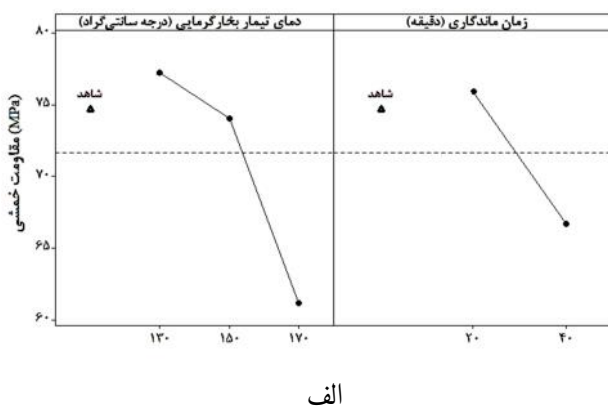
شاهد	۱۷۰		۱۵۰		۱۳۰		دمای تیمار گرمایی (°C)
	۴۰	۲۰	۴۰	۲۰	۴۰	۲۰	
	زمان ماندگاری (دقیقه)						
۱/۶۲	۷/۰۱	۷/۸۷	۸/۱	۷/۸	۷/۵۵	۶/۶	Ra (μm) زبری سطح
۴/۵۹	۱۹/۸۳	۲۲/۲۳	۲۲/۹	۲۲/۰۷	۲۱/۳۶	۱۸/۶۷	Rz

برابر با ۷۵/۵۱ و ۶۶/۶۹ مگاپاسکال بود.

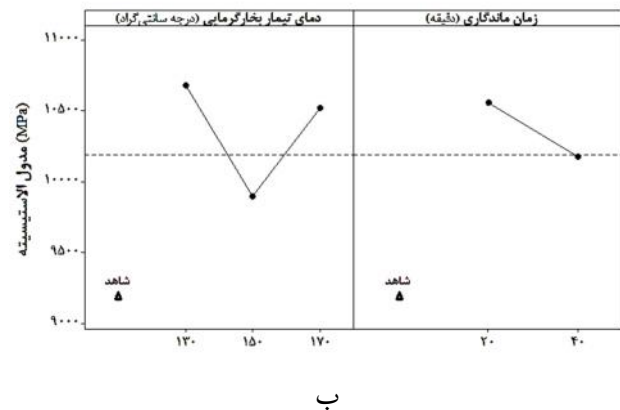
همچنین نتایج بررسی مدول الاستیسیته نمونه‌های تیمار شده با فرایند بخار گرمایی نشان داد که دما و زمان ماندگاری بر مدول الاستیسیته معنی‌دار نبودند؛ اما با این حال تیمار بخار گرمایی سبب افزایش مدول الاستیسیته گردید. به طوری که بیشترین مقدار مدول الاستیسیته مربوط به دمای تیمار بخار گرمایی ۱۳۰°C و زمان ماندگاری ۲۰ دقیقه و به ترتیب برابر با ۱۰۶۷۸/۸ و ۱۰۵۵۷/۶ مگاپاسکال بودند. کمترین مقدار مدول الاستیسیته نیز مربوط به نمونه‌های شاهد و برابر با ۹۱۹۰/۵۶ مگاپاسکال بود (شکل ۴).

۵- آزمایش خمش استاتیک و مدول الاستیسیته

نتایج بررسی اثرگذاری تیمار بخار گرمایی بر مقاومت خمشی نمونه‌های تیمار شده نشان داد که فقط اثر دمای تیمار بخار گرمایی معنی‌دار می‌باشد؛ به طوری که بیشترین و کمترین مقدار مقاومت خمشی به ترتیب مربوط به نمونه‌های تیمار بخار گرمایی شده در دمای ۱۳۰°C و ۱۷۰°C می‌باشد (شکل ۴). نتایج نشان دادند که با وجود معنی‌دار نبودن زمان ماندگاری بر مقاومت خمشی، افزایش زمان ماندگاری سبب کاهش مقاومت خمشی می‌گردد؛ به طوری که میانگین مقاومت خمشی در زمان ماندگاری ۲۰ و ۴۰ دقیقه به ترتیب



الف



ب

شکل ۴- اثر مستقل پارامترهای تیمار بخار گرمایی بر مقاومت خمشی (الف) و مدول الاستیسیته (ب)

بحث

نتایج حاصل از بررسی تأثیر تیمار بخارگرمایی بر نمونه‌های تیمار شده در دما و زمان‌های مختلف تیمار نشان داد که این تیمار می‌تواند سبب ایجاد تغییراتی در خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های صنوبر گردد. به طوری که فرایند بخارگرمایی سبب افت وزن و نیز کاهش دانسیته چوب‌های تیمار شده می‌گردد و با تشدید شرایط تیمار میزان افت وزن و کاهش دانسیته چوب تیمار شده نیز افزایش می‌یابد. در فرایندهای گرمایی، اتصالات لیگنوسلولزی به وسیله یون‌های هیدرونیوم به وجود آمده از هیدرولیز آب مورد حمله قرار می‌گیرند. به عبارتی، آب در دمای بالا به یون‌های هیدرونیوم تبدیل می‌شود و با حمله به بسپارهای قندی؛ مانند همی سلولزها و تجزیه آنها و تشکیل اسیدهای آلی و حمله این اسیدها به ساختارهای بسپاری دیواره‌های سلولی؛ پلی ساکاریدها را هیدرولیز می‌کند. پروتون تشکیل شده از آب، واکنش‌های استیل‌زدایی، تولید اسید استیک و هیدرولیز را افزایش می‌دهد، از این رو با افزایش دما و زمان ماندگاری شدت تخریب ساختاری و بسپاری دیواره‌های سلولی افزایش می‌یابد و میزان افت وزن و کاهش دانسیته چوب تیمار شده نیز افزایش می‌یابد (Liu, 2008; Garrote et al., 1999).

همچنین تیمار بخارگرمایی سبب تغییر ساختار فیزیکی چوب و بروز پدیده کلاپس می‌گردد و افزایش دمای تیمار و زمان ماندگاری می‌تواند سبب تشدید این پدیده شود. در تیمارهایی که بر پایه حرارت و رطوبت طراحی شده‌اند؛ هیدرولیز بسپارهای سازنده چوب در دما و زمان‌های مختلف تیمار سبب تغییر ساختار فیزیکی چوب و بروز پدیده کلاپس می‌گردد. همچنین واکنش‌های مربوط به تغییر ساختار شیمیایی چوب و تجزیه برخی از بسپارها در درجه حرارت، فشار و زمان ماندگاری بالاتر انجام می‌گیرد. از این رو تغییر ساختار فیزیکی و کلاپس شدن با افزایش دمای تیمار بخارگرمایی و زمان

ماندگاری افزایش می‌یابد (Mirzaei et al., 2012; Alvira et al., 2010).

نتایج بیانگر افزایش ثبات ابعادی در اثر تیمار بخارگرمایی می‌باشد و افزایش دمای تیمار و زمان ماندگاری سبب کاهش چشمگیر تغییرات ابعادی می‌گردد. تیمار بخارگرمایی، گروه‌های استیل همی سلولز را با تولید اسید استیک حذف و نیز سبب هیدرولیز همی سلولزها می‌گردد (Garrote et al., 1999). حضور اسید استیک مشتق شده از همی سلولزها ضمن هیدرولیز اسیدی پلی ساکاریدهای دیواره سلولی، همچنین عاملی برای افزایش تخریب لیگنین می‌باشد. از این رو از یک طرف حذف گروه‌های هیدروکسیل و از طرف دیگر لیگنین اصلاح شده مقاومت چوب تیمار شده به جذب آب را افزایش می‌دهند که این امر موجب افزایش ثبات ابعادی و مرتفع شدن بسیاری از معایب کاربردی چوب می‌گردد (Ramos, 2003; Biswas et al., 2011).

از طرفی فرایند بخارگرمایی سبب افزایش زبری نمونه‌های تیمار شده نسبت به شاهد گردید. تأثیر توأم رطوبت و حرارت سبب تغییر ویژگی‌های سطحی چوب تیمار شده از جمله زبری می‌گردد (Jennings et al., 2006). در فرایند بخارگرمایی مکانیکی، ترکیبات دارای کربن بالا و مواد استخراجی تخریب شده و متعاقب آن واکنش‌های اکسیداسیون و هیدرولیز سطح اتفاق افتاده و سبب تغییر خصوصیات سطح از جمله زبری می‌گردد. نتایج ATR-FTIR و XPS تغییرات شیمیایی سطح لایه‌ها در اثر تیمار بخارگرمایی را تأیید می‌کند (Dioufa et al., 2011).

نتایج بررسی مقاومت خمشی نمونه‌ها نیز نشان داد که افزایش دمای تیمار و زمان ماندگاری سبب کاهش این ویژگی می‌گردد. افزایش دما و زمان تیمار سبب تخریب بیشتر بسپارهای سازنده چوب و در نتیجه کاهش مقاومت خمشی می‌گردد. به عبارتی دیگر کاهش خصوصیات مکانیکی در دما و زمان ماندگاری بالاتر به دلیل کاهش

- properties of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood. *Wood Sci. Technol*, 41: 193–207.
- Garrote, G., Domínguez, H., and Parajó, J.C., 1999. Hydrothermal processing of lignocellulosic materials. *Holz Roh Werkst*, 57: 191–202.
- Hakkou, M., Pétrissans, M., Zoulalian, A., and Gérardin, P., 2005. Investigation of wood wettability changes during heat treatment on the basis of chemical analysis. *Polymer Degradation and Stability*, 89: 1-5.
- Hill, C.A.S., 2006. *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK, p. 260.
- Jennings, J.D., Zink-Sharp, A., Frazier, C.E., and Kamke, F.A., 2006. Properties of compression densified wood, Part II, Surface Energy, *J. Adhes. Sci. Technol*, 20 (4): 335–344.
- Lam, P.S., Lam, P.Y., Sokhansanj, Sh., Bi, X.T., and Lim, C.J., 2013. Mechanical and compositional characteristics of steam-treated douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* L.) during pelletization. *Biomass and Bioenergy*, 56: 116-126.
- Liu, S., 2008. A kinetic model on autocatalytic reactions in woody biomass hydrolysis. *J. Biobased Mater. Bio*, 2: 135–147.
- 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 RohWerkst*, 64(3): 192–197.
- Mirzaei, Gh., Mohebbi, B., and Tabarsa, T., 2012. Collapsibility and Wettability of Hydrothermally Treated Wood. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, Vol. 3, No. 1.
- Mirzaei, Gh., Mohebbi, B., and Tasooji, M., 2012. The effect of hydrothermal treatment on bond shear strength of beech wood. *Eur. J. Wood Prod*, 70: 705-709.
- Mohebbi, B., Sharifnia-Dizboni, H., and Kazemi-Najafi, S., 2009. Combined hydro-thermo-mechanical modification (CHTM) as an innovation in mechanical wood modification. In: *Proceeding of 4th European Conference on Wood Modification (ECWM4)*. 27-29th April, Stockholm, Sweden, pp. 353-360.
- Navi, P., and Sandberg, D., 2011. Thermo-hydro-mechanical processing of wood, *Engineering Sciences*, Taylor & Francis Group, LLC, Swiss, p. 360.
- طول زنجیره‌های سلولز و ترد و شکننده شدن لیگنین می‌باشد (Mohebbi *et al.*, 2009). همچنین این تیمار اثر معنی‌داری بر مدول الاستیسیته ندارد اما با این حال می‌تواند سبب افزایش این ویژگی نسبت به نمونه‌های شاهد گردد. در اثر تیمار بخارگرمایی ساختار چوب ترد و شکننده شده و لیگنین حالت پلاستیکی پیدا می‌کند؛ از این رو سبب کاهش خاصیت ارتجاعی و به عبارتی افزایش MOE می‌گردد (Hakkou *et al.*, 2005). بنابراین با توجه به نتایج این پژوهش می‌توان گفت که به‌کارگیری فرایند بخارگرمایی، با وجود کاهش برخی از خواص مکانیکی، یکی از مهمترین معایب چوب که جذب و دفع رطوبت می‌باشد را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد و به پیرو آن سبب افزایش ثبات ابعادی، بهبود مقاومت به تخریب قارچی و هوازدگی، افزایش زیبایی چوب، مقاومت به تخریب بالاتر و تغییر ویژگی‌های سطحی می‌گردد.

منابع مورد استفاده

- Alvira, P., Tomás-Pejó, E., Ballesteros, M., and Negro, M.J., 2010. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: a Review, *Bioresour. Technol*, 101: 4851–4861.
- Assor, C., Placet, V., Chabbert, B., Habrant, A., Lapiere, C., Pollet, B., and Perre, P., 2009. Concomitant changes in viscoelasticity properties and amorphous polymers during the hydrothermal treatment of hardwood and softwood. *J. Agric. Food. Chem*, 57: 6830–6837.
- Biswas, A.K., Yang, W., and Blasiak, W., 2011. Steam pretreatment of salix to upgrade biomass fuel for wood pellet production. *Fuel Process Technol*, 92: 1711–1717.
- Dioufa, P.N., Stevanovicb, T., Cloutierb, A., Fangb, C.H., Blanchetc, P., Koubaad, A., and Mariottib, N., 2011. Effects of thermo-hygro-mechanical densification on the surface characteristics of trembling aspen and hybrid poplar wood veneers, *Applied Surface Science*, 257: 3558–3564.
- Esteves, B., Marques, A.V., Domingos, I., and Pereira, H., 2007. Influence of steam on the

- Surface Texture: Profile method rules and procedures for the assessment of surface texture, 1:1158-1159, ISO/DIS 4287.1. 1998.
- Thybring, E.E., 2013. The decay resistance of modified wood influenced by moisture exclusion and swelling reduction. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 82: 87-95.
- Xu, X., and Tang, Z., 2012. Vertical Compression Rate Profile and Dimensional Stability of Surface-Densified Plantation Poplar Wood. *Lignocellulose*, 1 (1): 45-54.
- Popescu, C.M., and Popescu, M.C., 2013. A near infrared spectroscopic study of the structural modifications of lime (*Tilia cordata* Mill.) wood during hydro-thermal treatment. *Spectrochimica Acta. Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 115: 227–233.
- Ramos, L.P., 2003. The chemistry involved in the steam pretreatment of lignocellulosic materials. *Quim Nova*, 26: 863–871.
- Standard methods of testing small clear specimens of timber, American Society for Testing of Materials, ASTM D 143-09, 2014.

Evaluation of physical and mechanical properties of hygro-thermally modified wood

R. Hajihassani¹, B. Mohebbi^{2*}, S. Kazemi Najafi³ and P. Navi⁴

1- Ph.D. Student, Department of Wood and Paper Sciences, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

2*- Corresponding author, Associate Prof., Department of Wood and Paper Sciences, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran, E-mail: mohebbib@modares.ac.ir

3- Prof., Department of Wood and Paper Sciences, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

4- Prof., Department of Architecture, Wood and Civil Engineering, Bern University of Applied Sciences, Bern, Switzerland

Received: Sep., 2016

Accepted: Dec., 2016

Abstract

The present research work has investigated the physical and mechanical properties of hygro-thermally modified poplar (*Populus deltoides* L.) wood. The poplar wood blocks were treated hygrothermally at temperatures of 130, 150 and 170°C and for 20, 40 minutes treatment time. The physical and mechanical properties were determined for both treated and untreated wood. The properties; mass loss, collapse, specific gravity changes, dimensional stability, surface roughness, bending strength and modulus of elasticity, were determined prior to and after the treatment in all wood blocks. The hygro-thermal treatment significantly improved the dimensional stability of the samples. It was also found that the hygro-thermal treatment increased collapse, surface roughness and modulus of elasticity due to the treatment. However, wood mass, specific gravity and bending strength of the treated poplar wood decreased. It was revealed that the mass loss, density reduction as well as collapse in wood are correlated with treatment temperature as well as the treatment time. While, higher treatment temperature treatment time increases the dimensional stability.

Keywords: Hygro-thermal modification, treatment time, poplar (*Populus deltoides* L.), physical and mechanical properties.