

## تأثیر فشردگی استاتیکی چوب پالونای تیمار شده بر رابطه بین خواص مکانیکی و دانسیته

علیرضا محمدی<sup>۱\*</sup>، تقی طبرسا<sup>۲</sup> و محمد تسوجی<sup>۳</sup>

\*۱- مسئول مکاتبات، کارشناس ارشد علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

پست الکترونیکی: mahli33azer@yahoo.com

۲- دانشیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۳- دانشجوی دکتری گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش: دی ۱۳۸۹

تاریخ دریافت: دی ۱۳۸۸

### چکیده

در این تحقیق تأثیر فشردگی استاتیکی بر رابطه بین خواص مکانیکی و دانسیته چوب سبک پالونیا مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های تهیه شده ابتدا در دو سطح ۱۳۰ و ۱۷۰ درجه سانتیگراد بخارزنی و بعد بلافاصله در پرس گرم تا ۳۵ و ۴۵ درصد از ضخامت اولیه شان در جهت شعاعی فشرده شدند. البته نمونه‌های بخارزنی نشده نیز فشرده شدند. برای نمونه‌های فشرده شده و فشرده نشده خواص مکانیکی از قبیل مدول گسیختگی، مقاومت فشاری در جهت موازی و عمود بر الیاف و سختی سطح برینل تعیین شد. شاخص‌های دانسیته، مقاومت، کیفیت و توان مقاومت برای هر یک از خواص مکانیکی محاسبه و برای مطالعه رابطه بین خواص مکانیکی و دانسیته استفاده شدند. نتایج نشان داد که با افزایش فشردگی دانسیته و مقاومت‌های مکانیکی و هم‌مینطور شاخص‌های دانسیته و مقاومت به‌طور معنی داری افزایش ولی شاخص‌های توان مقاومت کاهش می‌یابند. بنابراین به دلیل نرم شدن بافت چوب، بخارزنی در ۱۳۰ درجه سانتیگراد اندکی باعث بهبود مقاومت‌ها و شاخص‌های توان مقاومت شد ولی بخارزنی در ۱۷۰ درجه سانتیگراد مقاومت‌ها و شاخص‌های توان مقاومت را کاهش داد. شاخص‌های توان مقاومت نشان دادند که مقاومت‌های چوب فشرده شده کمتر از مقداری است که برای چوب فشرده نشده به‌ازای افزایش دانسیته پیش‌بینی شده بود. که این می‌تواند به دلیل ضعیف‌تر شدن ساختار چوب فشرده شده در نتیجه تخریب و تغییر شکل سلول‌ها باشد. به طوری که مقاومت به فشار در جهت موازی الیاف و سختی برینل کمتر تحت تأثیر منفی فشردگی قرار گرفتند.

واژه‌های کلیدی: فشردگی استاتیکی، پالونیا، شاخص دانسیته، شاخص مقاومت، شاخص کیفیت، شاخص توان مقاومت.

### مقدمه

های مکانیکی اهمیت دارد. مانند عضوهای ساختمانی، کفپوش‌ها، مبلمان و غیره، بیشتر مورد تقاضا هستند. به دلیل کاهش منابع چوبی استفاده از گونه‌های سریع‌الرشد رو به فزونی است. درخت سریع‌الرشد پالونیا با وجود این

بیشتر خواص مکانیکی چوب با دانسیته آن متناسب هستند (کلمن و کوه، ۱۹۸۴)، بنابراین چوب‌هایی که دانسیته بالایی دارند برای کاربردهایی که در آن مقاومت-

که بومی چین است ولی در بیشتر نقاط به طور موفقیت آمیزی جنگل کاری شده است (کریکوریان، ۱۹۸۸). بیشتر چوب های این گونه ها (مانند چوب پالونیا) به دلیل دانسیته پایین موارد کاربرد محدودی دارند. برای افزایش مقاومت های مکانیکی روش های مختلفی وجود دارد که اساس همه آنها افزایش دانسیته چوب است. یکی از روش های افزایش دانسیته چوب ماسیو کاهش دادن فضای های خالی آن به طور مکانیکی است (کلمن، کوئزی و استام، ۱۹۷۵). چوب ماسیو فشرده شده برای اولین بار در اوایل سال ۱۹۳۰ در آلمان تولید و با نام تجاری لیگنوستون (چوب سنگی) وارد بازار شد.

رابطه بین خواص مکانیکی ( $f$ ) و دانسیته ( $D$ ) در بسیاری از تحقیقات مورد بررسی قرار گرفته است و اکثراً این رابطه به صورت  $f = aD^b$  بیان شده است که در آن ضریب های ثابت  $a$  و  $b$  بین خواص مکانیکی مختلف متفاوت است (بادیگ و جین، ۱۹۸۲؛ کلمن و کوته، ۱۹۸۴؛ گیسن و اشبی، ۱۹۹۷؛ اشبی و جونز، ۱۹۹۸).

فشرده سازی چوب ماسیو باعث تخریب ساختار چوب می شود که ممکن است همراه با ترک و شکاف باشد (آندو و اونها، ۱۹۹۹). به طور کلی، نرمی کمتر چوب در زمان فشرده سازی مقاومت چوب فشرده شده را در دانسیته معین کاهش می دهد (بلومبرگ و همکاران، ۲۰۰۵). ویژگی های آناتومیکی چوب عامل مهمی است که فشرده سازی و تخریب ساختار چوب در زمان فشرده سازی را تحت تأثیر قرار می دهد که می توان به اشعه های چوبی اشاره کرد که در جهت شعاعی نقش تقویت کننده را دارند (کانش، ۱۹۶۸). در بسیاری از تحقیقات اظهار شده است که گونه های سوزنی برگان و پهن برگان بخش روزه ای عمدتاً و با تخریب کمتر در

جهت شعاعی تغییر شکل می دهند (بادیگ، ۱۹۶۵؛ طبرسا و چویی، ۲۰۰۱؛ بلومبرگ و همکاران، ۲۰۰۶). با ایجاد تغییراتی در فرایند فشرده سازی می توان تخریب در ساختار چوب را کاهش داد. در این راستا اظهار شد که فشرده سازی چوب به طور ایزواستاتیکی<sup>۱</sup> و نیمه-ایزواستاتیکی<sup>۲</sup> در مقایسه با فشرده سازی چوب به طور تک محوری بین صفحات فولادی باعث کاهش تخریب ساختار چوب می شود (بلومبرگ و همکاران، ۲۰۰۵)؛ ولی از طرف دیگر فشرده سازی چوب به طور استاتیکی بین صفحات داغ باعث پلاستیکی شدن سطوح چوب شده و در نتیجه یک لایه بسیار متراکم در سطح چوب تشکیل می شود (اینویو و همکاران، ۱۹۹۹؛ وانگ و کوپر، ۲۰۰۵)، در صورتی که این پدیده در فشرده سازی نیمه-ایزواستاتیکی که چوب در دمای محیط فشرده می شود (لینده و کستوال، ۱۹۹۷)، بوجود نمی آید.

نرم کردن چوب با حرارت بالا و یا بخار در زمان فشرده سازی و یا قبل از فشرده سازی تأثیر مثبتی بر خواص مکانیکی دارد (هیگرین و دانیلز، ۱۹۶۹؛ طبرسا و چویی، ۱۹۹۷). تیمار بخار درجه فشرده سازی را افزایش داده و باعث کاهش برگشت ضخامت چوب در شرایط مرطوب می شود (ناوی و جیراردت، ۲۰۰۰) همچنین در نتیجه بخارزنی طولانی مدت در زمان فشرده سازی پیوندهای عرضی در چوب تشکیل شده و میکروفیبریل ها کریستالی می شوند (دویانتو، ۱۹۹۹).

۱- در این نوع فشرده سازی، نمونه بین یک دیافراگم لاستیکی احاطه و فشار بوسیله یک سیال متحرک (آب و یا روغن) به طور یکسان در تمام جهات بر نمونه اعمال می شود.

۲- شبیه فشرده سازی ایزواستاتیکی است، با این تفاوت که یک سطح نمونه بر روی صفحه سفت پرس قرار می گیرد و این باعث می شود که فشار کاملاً به طور ایزواستاتیکی اعمال نشود.

کشاورزی و منابع طبیعی گرگان (طرح تحقیقاتی دکتر بهرام نیا) قطع شد. هفتاد نمونه سالم مماسی (بدون معیبه مانند: گره، ترک، پوسیدگی، انحراف الیاف و غیره) به ابعاد  $4 \times 5/5 \times 31$  سانتیمتر مکعب (ضخامت  $\times$  عرض  $\times$  طول) تهیه شدند. البته از چوب نزدیک مغز و پوست درخت، نمونه تهیه نشد.

تأثیر فاکتورهای درصد فشردگی سازی (در دو سطح ۳۵ و ۴۵ درصد) و دمای بخارزنی (در سه سطح بدون بخارزنی، ۱۳۰ و ۱۷۰ درجه سانتیگراد) بر رابطه بین خواص مکانیکی و دانسیته مورد بررسی قرار گرفت. با در نظر گرفتن سطوح فاکتورها، ۶ تیمار منظور گردید. برای هر تیمار، از بین ۷۰ نمونه تهیه شده ۱۰ نمونه به طور تصادفی انتخاب شدند. از ۱۰ نمونه دیگر به عنوان نمونه-های شاهد استفاده شد. در جدول ۱ انواع تیمارها مشخص شده است.

در بررسی فشردگی سازی چوب اظهار شد که با افزایش درصد فشردگی سازی، دانسیته و خواص مکانیکی چوب افزایش می‌یابد (ایتو و همکاران، ۱۹۹۳). در واقع فشردگی-سازی تأثیر دوگانه بر خواص مکانیکی چوب دارد. از طرفی با افزایش دانسیته چوب، مقاومت‌های مکانیکی آن را افزایش می‌دهد و از طرف دیگر با تخریب ساختار چوب باعث کاهش مقاومت‌ها می‌شود.

اهداف این تحقیق عبارتند از: ۱- تعیین چگونگی افزایش خواص مکانیکی چوب پالونیا فشردگی شده با افزایش دانسیته و تأثیر پیش تیمار بخار بر آن، ۲- مقایسه نتایج بدست آمده از این تحقیق با نتایج منتشر شده از گونه‌های مختلف که بوسیله روش‌های گوناگون فشردگی شده‌اند.

## مواد و روشها

یک پایه درخت پالونیا (*paulownia fortunei*) با قطر برابر سینه ۴۰ سانتیمتر از جنگل تحقیقاتی دانشگاه علوم

جدول ۱- تیمارها

تعداد تیمارها	درصد فشردگی سازی	دمای بخارزنی
۱	۳۵	۱۳۰
۲	۳۵	۱۷۰
۳	۳۵	-
۴	۴۵	۱۳۰
۵	۴۵	۱۷۰
۶	۴۵	-

ضخامت اولیه و در جهت شعاعی فشردگی شدند. درصد فشردگی سازی ۳۵ و ۴۵ درصد به ترتیب بوسیله شابلون‌هایی با ضخامت ۲/۶ و ۲/۲ سانتیمتر کنترل شدند. برای

نمونه‌ها داخل یک محفظه بخارزنی به مدت ۱۵ دقیقه در سطوح تعیین شده بخارزنی شدند و بعد بلافاصله در پرس گرم (۱۵۰ درجه سانتیگراد) تا ۳۵ و ۴۵ درصد

دانسیتة نمونه فشرده شده بر دانسیته نمونه فشرده نشده  $(D_d/D_o)$  میزان افزایش دانسیته و شاخص مقاومت (مقاومت نمونه فشرده شده بر مقاومت نمونه فشرده نشده  $(f_d/f_o)$  میزان افزایش مقاومت را نشان داد. نسبت بین شاخص مقاومت و شاخص دانسیته شاخص کیفیت نام دارد  $(Q_d/Q_o)$ . این شاخص نشان داد که مقاومت به ازای افزایش دانسیته چقدر افزایش یافت. بنابراین فرمول شاخص توان مقاومت به صورت زیر محاسبه شد.

$$f_d = a_d \times D_d^b \rightarrow a_d = \frac{f_d}{D_d^b} \rightarrow \frac{a_d}{a_o} = \frac{\left(\frac{f_d}{f_o}\right)}{\left(\frac{D_d}{D_o}\right)^b}$$

$$f_o = a_o \times D_o^b \rightarrow a_o = \frac{f_o}{D_o^b}$$

در جدول ۲ ضریب ثابت  $b$  مربوط به خواص مکانیکی مورد بررسی در این تحقیق آمده است. این ضریب از مطالعه روابط بین خواص مکانیکی و دانسیته گونه های مختلف بدست آمده است. شاخص توان مقاومت نشان داد که مقاومت چوب فشرده شده نسبت به آنچه که برای چوب فشرده نشده به ازای افزایش دانسیته پیش بینی شده بود، چه میزان افزایش یافت. آنالیز سطوح فشرده سازی و دمای بخارزنی به ترتیب در قالب آزمون T-استیوندت و آزمون دانکن در سطح اطمینان ۹۵ درصد بوسیله نرم افزار SPSS انجام شد. این شاخص ها همچنین برای نتایج بدست آمده از تحقیقات پیشین که در آن گونه های مختلف به روش های گوناگونی فشرده شده اند محاسبه و با نتایج این تحقیق مقایسه شدند.

فشردگی نمونه های مماسی در جهت شعاعی، نمونه ها طوری در پرس چیده شدند که حلقه های رویش با صفحات پرس زاویه صفر درجه بسازند. همچنین برای جلوگیری از برگشت ضخامت نمونه ها در نتیجه باز شدن پرس، ۱۵ دقیقه پس از بسته شدن صفحات پرس، سیستم گرمایش آن قطع شد تا دمای صفحات پرس به ۸۰ درجه سانتیگراد برسد. دو ساعت پس از آغاز فشرده سازی، صفحات پرس باز شد و نمونه ها تخلیه شدند. نمونه های بخارزنی نشده نیز با همین روش پرس فشرده شدند.

درصد فشردگی با اندازه گیری ضخامت نمونه ها قبل و بعد از فشرده سازی، در سه نقطه بوسیله کولیس دیجیتالی، محاسبه شد. مقاومت خمشی، مقاومت به فشار موازی و عمود بر الیاف و سختی سطح برینل برای تعیین خواص مکانیکی نمونه ها به ترتیب براساس استانداردهای ۳۱۳۳، ISO ۳۷۸۷، ISO ۳۱۳۲ و EN ۱۵۳۴ آزمایش شدند. برای تعیین هر یک از مقاومت های مکانیکی ۱۰ نمونه از هر تیمار، با توجه به ابعاد تعیین شده در استاندارد مربوطه، تهیه شدند. تهیه نمونه های آزمونی به این ترتیب انجام شد که ۵ نمونه از هر تیمار به طور تصادفی برای تعیین مقاومت خمشی انتخاب شدند. از هر کدام از ۵ نمونه باقیمانده ۲ نمونه آزمونی برای تعیین مقاومت های فشاری و سختی برینل تهیه شد. برای آزمون نمونه های شاهد نیز به همین ترتیب عمل شد. البته دانسیته و رطوبت نمونه های آزمونی به ترتیب براساس استانداردهای ۳۱۳۱ و ISO ۳۱۳۰ محاسبه شدند.

برای آنالیز تأثیر فشرده سازی بر تناسب بین خواص مکانیکی و دانسیته از شاخص های دانسیته، مقاومت، کیفیت و توان مقاومت استفاده شد. شاخص دانسیته

جدول ۲- ضریب‌های ثابت b

منبع	فاکتور b	خواص مکانیکی
بادیگ و جین (۱۹۸۲)	۱/۲۵	مدول گسیختگی
گیبسون و اشبی، بادیگ و جین (۱۹۹۷)، (۱۹۸۲)	۱	فشار موازی الیاف
بادیگ و جین (۱۹۸۲)	۲/۲۵	فشار عمود بر الیاف
کلمن و کوته (۱۹۸۴)	۲	سختی برینل

## نتایج

داری بهبود می‌یابند، یعنی با فشردگی چوب پالونیا دانسیته و مقاومت آن به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد و همچنین با افزایش درصد فشردگی دانسیته و مقاومت به‌طور معنی‌داری بیشتر می‌شود.

در واقع نتایج جدول‌های ۳ و ۴ و همچنین نتایج مربوط به شاخص‌های دانسیته و مقاومت در جدول ۵ مطلب مشترکی را عنوان می‌کنند که با افزایش درصد فشردگی دانسیته و ویژگی‌های مکانیکی به‌طور معنی-

جدول ۳- تأثیر درصد فشردگی بر دانسیته چوب پالونیا

فشردگی فیزیکی	بدون فشردگی سازی	فشردگی سازی (۳۵٪)	فشردگی سازی (۴۵٪)
دانسیته (گرم بر سانتیمتر مکعب)	۰/۲۷۲	۰/۳۹۹	۰/۴۸۰۹

- اختلاف میانگین دانسیته بین سطوح فشردگی معنی‌دار است.

جدول ۴- تأثیر درصد فشردگی بر ویژگی‌های مکانیکی چوب پالونیا

ویژگی مکانیکی	بدون فشردگی سازی	فشردگی سازی (۳۵٪)	فشردگی سازی (۴۵٪)
مدول گسیختگی (مگاپاسکال)	۴۷/۷۶	۶۶/۵۰	۷۷/۳۰
مقاومت به فشار موازی الیاف (مگاپاسکال)	۲۵/۴۸	۳۷/۱۲	۴۳/۱۵
مقاومت به فشار عمود بر الیاف (مگاپاسکال)	۲/۳۸	۴/۱۴	۵/۱۴
سختی برینل (مگاپاسکال)	۸/۲۷	۲۰/۴۳	۲۴/۶۵

- اختلاف میانگین ویژگی‌های مکانیکی بین سطوح فشردگی معنی‌دار است.

جدول ۵ - تأثیر درصد فشرده‌سازی بر شاخص‌های مربوط به هر ویژگی مکانیکی

درصد فشرده سازی (٪۴۵)				درصد فشرده سازی (٪۳۵)				ویژگی مکانیکی
$a_d/a_o$	$Q_d/Q_o$	$f_d/f_o$	$D_d/D_o$	$a_d/a_o$	$Q_d/Q_o$	$f_d/f_o$	$D_d/D_o$	
*۰/۸۲	۰/۹۴	*۱/۶۱	*۱/۷۱	*۰/۸۸	۰/۹۷	*۱/۳۹	*۱/۴۳	مدول گسیختگی
۰/۹۷		*۱/۶۹	*۱/۷۳	۰/۹۹		*۱/۴۵	*۱/۴۶	مقاومت به فشار موازی الیاف
*۰/۶۴	۱/۲۶	*۲/۱۵	*۱/۷۰	*۰/۸۱	۱/۲۳	*۱/۷۳	*۱/۴۰	مقاومت به فشار عمود بر الیاف
*۰/۸۳	۱/۵۷	*۲/۹۷	*۱/۸۸	*۱/۰۲	۱/۵۹	*۲/۴۶	*۱/۵۴	سختی برینل

\* - اختلاف میانگین شاخص‌ها بین سطوح فشرده‌سازی معنی‌دار است.

مقاومت به فشار موازی الیاف در فشرده‌سازی ۳۵ درصد تقریباً برابر با ۱ است. ولی برای مقاومت خمشی و مقاومت به فشار عمود بر الیاف در هر دو سطح فشرده‌سازی کمتر از ۱ است. این نشان می‌دهد که اثر منفی فشرده‌سازی (تخریب سلول‌ها) بر روی برخی از مقاومت‌ها کمتر است. به طوری که در هریک از سطوح فشرده‌سازی، مقاومت به فشار عمود بر الیاف کمترین مقدار شاخص توان مقاومت را دارد.

همچنین نتایج تأثیر تیمار بخارزنی بر مقاومت‌ها (جدول ۶) نشان می‌دهد که بخارزنی در دمای ۱۷۰ درجه سانتیگراد باعث کاهش مقاومت‌ها شده، نظر به اینکه کاهش در مدول گسیختگی و سختی برینل معنی‌دار است.

مقادیر شاخص کیفیت نشان می‌دهند که افزایش مقاومت خمشی کمتر از افزایش دانسیته است (جدول ۵). سختی برینل بیشترین مقدار شاخص کیفیت را دارد که می‌توان نتیجه‌گیری کرد که افزایش مقاومت به فرورفتگی بیشتر از افزایش دانسیته است. افزایش درصد فشرده‌سازی تأثیر معنی‌داری بر شاخص کیفیت ندارد. این بدین معنی است که با افزایش فشرده‌سازی نسبت بین افزایش مقاومت و افزایش دانسیته تقریباً ثابت است. شاخص توان مقاومت با افزایش فشرده‌سازی کاهش یافت که این کاهش به غیر از مقاومت به فشار موازی الیاف در سایر مقاومت‌ها معنی‌دار بود. همان‌طور که از جدول ۵ دیده می‌شود شاخص توان مقاومت برای سختی برینل و

جدول ۶ - تأثیر تیمار بخارزنی بر ویژگی‌های مکانیکی چوب فشرده شده پالونیا

بخارزنی در ۱۷۰°C	بخارزنی در ۱۳۰°C	بدون بخارزنی	ویژگی مکانیکی
۶۸/۸۶	۷۴/۰۶	۷۲/۷۷	مدول گسیختگی (مگاپاسکال)
۳۹/۸۷	۴۱/۵۳	۳۹/۰۲	مقاومت به فشار موازی الیاف (مگاپاسکال)
۴/۳۹	۴/۷۹	۴/۷۵	مقاومت به فشار عمود بر الیاف (مگاپاسکال)
۲۰/۱۰	۲۲/۷۲	۲۴/۸۰	سختی برینل (مگاپاسکال)

- اختلاف میانگین ویژگی مکانیکی بین سطوح بخارزنی معنی‌دار است.

جدول ۷- تأثیر تیمار بخار بر شاخص‌های مربوط به هر ویژگی مکانیکی

ویژگی مکانیکی	بخارزنی در ۱۷۰ °C				بخارزنی در ۱۳۰ °C				بدون تیمار بخارزنی			
	$a_d/a_o$	$Q_d/Q_o$	$f_d/f_o$	$D_d/D_o$	$a_d/a_o$	$Q_d/Q_o$	$f_d/f_o$	$D_d/D_o$	$a_d/a_o$	$Q_d/Q_o$	$f_d/f_o$	$D_d/D_o$
مدول گسیختگی	*۰/۸۳	*۰/۹۳	*۱/۴۴	۱/۵۴	*۰/۸۸	۰/۹۸	*۱/۵۵	۱/۵۷	۰/۸۵	۰/۹۶	۱/۵۲	۱/۵۹
مقاومت به فشار	۰/۹۷		۱/۵۶	۱/۵۹	*۱/۰۱		۱/۶۲	۱/۶۰	۰/۹۵		۱/۵۳	۱/۵۹
موازی الیاف مقاومت به فشار عمود بر الیاف	۰/۷۰	*۱/۱۸	۱/۸۴	۱/۵۴	۰/۷۵	۱/۲۸	۲/۰۰	۱/۵۵	۰/۷۳	۱/۲۷	۱/۹۹	۱/۵۶
سختی برینل	*۰/۸۲	*۱/۴۰	*۲/۴۲	۱/۷۲	۰/۹۴	*۱/۶۰	*۲/۷۴	۱/۷۱	۱/۰۲	*۱/۷۴	*۲/۹۹	۱/۷۱

\*- اختلاف میانگین شاخص‌ها بین سطوح تیمار بخار معنی‌دار است.

### بحث

به‌طور کلی با افزایش درصد فشرده‌سازی دانسیته و شاخص دانسیته، مقاومت و شاخص مقاومت افزایش یافتند (جدولهای ۳، ۴ و ۵). طبیعی است که با افزایش درصد فشرده‌سازی فضای خالی در بافت چوب کاهش و در نتیجه دانسیته افزایش یابد (کلمن، کوئیزی و استام، ۱۹۷۵). همچنین واضح است که با افزایش دانسیته مقاومت‌های مکانیکی افزایش یابد. ولی با افزایش فشرده‌سازی، شاخص توان مقاومت کاهش یافت (جدول ۵). این نشان می‌دهد که با افزایش درصد فشرده‌سازی، اثر منفی آن به دلیل تخریب بیشتر سلول‌ها افزایش یافته و باعث می‌شود که مقاومت‌های مکانیکی پالونیا فشرده‌شده کمتر از مقدار مقاومتی باشد که قبل از فشرده‌سازی برای چوب فشرده‌نشده پالونیا به‌ازای افزایش دانسیته پیش‌بینی شده بود. این حالت در فشرده‌سازی نیمه-ایزواستاتیکی (جدول ۸ و ۹) نیز مشاهده شد (بلومبرگ و همکاران، ۲۰۰۵).

در هیچ یک از مقاومت‌ها اختلاف شاخص دانسیته بین سطوح تیمار بخار معنادار نیست (جدول ۷). بنابراین در شرایطی که میزان فشرده‌گی بوسیله شابلون کنترل شد، تیمار بخار تأثیر معناداری بر افزایش دانسیته ندارد. البته در مقاومت خمشی، شاخص مقاومت و شاخص توان مقاومت بین سطوح بخارزنی ۱۳۰ و ۱۷۰ درجه سانتیگراد معنادار است، ولی سطح تیمارنشده+ با هیچ کدام معنادار نیست. به هر حال، در مقاومت به فشار موازی الیاف بخارزنی در ۱۳۰ درجه سانتیگراد بر افزایش شاخص توان مقاومت تأثیر معناداری دارد. همچنین در مقاومت به فشار عمود بر الیاف تأثیر سطوح تیمار بخار بر شاخص‌های دانسیته، مقاومت و توان مقاومت معنادار نیست. بنابراین با افزایش دمای بخارزنی شاخص مقاومت و شاخص کیفیت سختی برینل کاهش می‌یابد. به طوری که بخارزنی در دمای ۱۷۰ درجه سانتیگراد به‌طور معناداری شاخص توان مقاومت سختی برینل را کاهش داد.

توسکا ۱ و راش ۱ (جدول ۸) با اینکه شاخص دانسیته کمتر و یا تقریباً برابری با شاخص دانسیته پالونیا دارند، (یعنی کمتر از پالونیا فشرده شده‌اند) (فشرده سازی ۴۵٪)، ولی شاخص توان آنها کمتر از پالونیا است. همچنین در گونه‌هایی (جدول ۸) که شاخص دانسیته بیشتری نسبت به پالونیای فشرده شده (جدول ۵) دارند، انتظار می‌رفت که شاخص مقاومت بیشتر باشد ولی شاخص مقاومت آنها کمتر از پالونیا است.

بیشتر مقاومت‌ها با افزایش درجه حرارت و مدت بخارزنی کاهش می‌یابند (بادیگ و جین، ۱۹۸۲؛ کلمن و کوته، ۱۹۸۴؛ اینویو و همکاران، ۱۹۹۳). با پیش‌تیمار نمونه‌ها در دمای ۱۷۰ درجه سانتیگراد ویژگی‌های مکانیکی و شاخص توان مقاومت در خواص مکانیکی اندازه‌گیری شده، کاهش یافت (جدول ۷).

در بررسی شاخص‌های مقاومت به فشار موازی الیاف مشاهده شد که گونه‌هایی مانند کاج اسکاتس ۱، غان،

جدول ۸- شاخص‌های محاسبه شده برای مقاومت فشاری گونه‌های فشرده شده به شیوه‌های مختلف

مقاومت فشاری در جهت شعاعی			مقاومت فشاری در جهت موازی الیاف		$D_d/D_o$	گونه‌های چوبی
$a_d/a_o$	$Q_d/Q_o$	$f_d/f_o$	$a_d/a_o$	$f_d/f_o$		
۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۱۹	۰/۹۰	۱/۴۱	۱/۵۶	کاج اسکاتس ۱
۰/۰۶	۰/۱۴	۰/۲۶	۰/۸۴	۱/۴۸	۱/۸۰	کاج اسکاتس ۲
			۰/۷۴	۱/۴۳	۱/۹۳	اسپروس نروژی <sup>۱</sup>
			۰/۹۳	۱/۵۴	۱/۶۵	غان <sup>۱</sup>
			۰/۸۴	۱/۵۱	۱/۷۹	توسکا ۱
			۰/۸۶	۱/۵۹	۱/۸۴	توسکا ۲
			۰/۸۲	۱/۶۰	۲/۰۴	صنوبر ۱
۰/۰۳	۰/۰۷	۰/۱۴	۰/۷۴	۱/۴۴	۱/۹۶	صنوبر ۲
۰/۰۶	۰/۱۳	۰/۲۷	۰/۸۸	۱/۶۹	۱/۹۲	صنوبر ۳
۰/۰۸	۰/۱۹	۰/۳۱	۰/۹۶	۱/۷۰	۱/۷۷	زبان گنجشک ۲
			۰/۹۱	۱/۳۹	۱/۵۲	راش ۱
			۰/۷۴	۱/۴۸	۲/۰۰	کاج اسکاتس ۲

از این مشاهدات می‌توان دو نکته را نتیجه‌گیری کرد:  
۱- بعد از فشرده‌سازی، مقاومت به فشار موازی الیاف در گونه سبکی مانند پالونیا در مقایسه با گونه‌هایی که دانسیته اولیه بیشتری دارند کمتر تحت تأثیر منفی فشرده‌سازی

۱- فشرده‌سازی به روش نیمه ایزواستاتیکی (بلومبرگ و همکاران، ۲۰۰۵)  
۲- فشرده‌سازی شعاعی بین گیره (پرکیتنی و یابلونسکس، ۱۹۸۴)



از پالونیا است که باعث شده شاخص کیفیت آنها نیز کمتر از پالونیا باشد. در صورتی که گونه‌هایی مانند بلوط ۱ و زبان گنجشک ۱ (جدول ۹) با اینکه شاخص دانسیته بیشتری نسبت به پالونیا فشردگی شده (جدول ۵ - فشردگی - سازی ۳۵ درصد) دارند ولی شاخص توان مقاومت خمشی آنها بیشتر است.

همان طور که مشاهده می‌شود در فشردگی سازی استاتیکی اسپروس سفید (جدول ۹) با افزایش دمای پرس شاخص توان مقاومت خمشی افزایش می‌یابد. در فشردگی - سازی استاتیکی پالونیا نیز مشاهده شد که با بخارزنی نمونه‌ها در ۱۳۰ درجه سانتیگراد مقاومت خمشی و شاخص توان مقاومت خمشی افزایش می‌یابد (جدول ۶ و ۷). این می‌تواند به دلیل نرم شدن بافت چوب در اثر گرما و بخار باشد که باعث می‌شود ساختار چوب زمان فشردگی کمتر آسیب ببیند (اینیو و همکاران، ۱۹۹۳). با وجود کم‌تر بودن شاخص دانسیته اسپروس سفید (جدول ۹) نسبت به پالونیا (جدول ۵ - فشردگی سازی ۳۵ درصد و جدول ۷ - بخارزنی ۱۳۰) ولی شاخص توان مقاومت خمشی آن کمتر است. از مقایسه شاخص‌های مقاومت خمشی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مدول گسیختگی پالونیا فشردگی شده در مقایسه با بسیاری از گونه‌ها که به روش نیمه - ایزواستاتیکی و استاتیکی فشردگی شده‌اند (جدول ۹) کمتر به طور منفی تحت تأثیر فشردگی - سازی قرار گرفته است.

(تخریب سلول‌ها) قرار می‌گیرد. ۲- فشردگی سازی استاتیکی در مقایسه با فشردگی سازی نیمه - ایزواستاتیکی کمتر بر مقاومت به فشار موازی الیاف تأثیر منفی می‌گذارد.

در هر دو نوع فشردگی سازی استاتیکی و ایزواستاتیکی مقاومت به فشار عمود بر الیاف کمترین مقدار شاخص توان مقاومت را دارد. این می‌تواند به دلیل تخریب اشعه - های چوبی که در جهت شعاعی نقش تقویت کننده را دارند (کانش، ۱۹۶۸)، باشد. ولی همان طور که مشاهده می‌شود در فشردگی سازی نیمه ایزواستاتیکی شاخص‌های مقاومت به فشار عمود بر الیاف در گونه‌های مختلف به - طور چشمگیری کمتر از شاخص‌های پالونیا فشردگی شده به طور استاتیکی (جدول ۵) است. بنابراین واضح است که فشردگی سازی استاتیکی چوب پالونیا در جهت شعاعی، مقاومت فشاری در جهت فشردگی را در مقایسه با فشردگی سازی نیمه ایزواستاتیکی کمتر به طور منفی تحت تأثیر قرار داده است.

از مقایسه شاخص‌های مقاومت خمشی بین گونه‌های فشردگی شده به روش نیمه - ایزواستاتیکی و پالونیا فشردگی شده به روش استاتیکی مشاهده شد که گونه‌هایی مانند کاج ۱، غان و راش ۱ (جدول ۹) با اینکه شاخص دانسیته کمتری در مقایسه با پالونیا دارند (جدول ۵ - فشردگی سازی ۴۵ درصد)، ولی شاخص توان مقاومت آنها کمتر است. همچنین در گونه‌هایی مانند اسپروس، توسکا ۱ و صنوبر ۱ (جدول ۹) که شاخص دانسیته بیشتری نسبت به پالونیا (جدول ۵) دارند، شاخص مقاومت کمتر

جدول ۹- شاخص‌های محاسبه‌شده برای مقاومت خمشی و سختی گونه‌های فشرده‌شده به شیوه‌های مختلف

سختی برینل			مقاومت خمشی			$D_d/D_o$	گونه‌های چوبی
$a_d/a_o$	$Q_d/Q_o$	$f_d/f_o$	$a_d/a_o$	$Q_d/Q_o$	$f_d/f_o$		
۰/۷۳	۱/۱۸	۱/۸۹	۰/۷۱	۰/۸۰	۱/۲۸	۱/۶۰	کاج <sup>۱</sup>
۰/۶۶	۱/۳۵	۲/۹۳	۰/۷۰	۰/۸۲	۱/۶۰	۲/۱۰	اسپروس <sup>۱</sup>
۰/۶۰	۰/۹۹	۱/۶۱	۰/۷۷	۰/۸۷	۱/۴۱	۱/۶۳	غان <sup>۱</sup>
			۰/۶۵	۰/۷۵	۱/۳۴	۱/۷۹	توسکا <sup>۱</sup>
۰/۵۵	۱/۱۰	۲/۱۵	۰/۷۰	۰/۸۲	۱/۶۲	۱/۹۶	صنوبر <sup>۱</sup>
۰/۷۰	۱/۰۹	۱/۶۴	۰/۸۱	۰/۹۰	۱/۳۷	۱/۵۲	راش <sup>۱</sup>
۰/۷۷	۱/۱۵	۱/۷۰				۱/۴۸	راش <sup>۲</sup>
۰/۶۳	۰/۹۸	۱/۵۴	۱/۰۳	۱/۱۵	۱/۷۹	۱/۵۶	بلوط <sup>۱</sup>
۰/۸۱	۱/۳۰	۲/۰۶				۱/۵۹	بلوط <sup>۲</sup>
			۰/۹۰	۱/۰۲	۱/۷۵	۱/۷۱	زبان گنجشک <sup>۱</sup>
			۰/۸۰	۰/۸۶	۱/۱۳	۱/۳۲	اسپروس سفید <sup>۲a</sup>
			۰/۸۲	۰/۸۷	۱/۱۱	۱/۲۸	اسپروس سفید <sup>۲b</sup>
			۰/۸۶	۰/۹۳	۱/۳۰	۱/۴۰	اسپروس سفید <sup>۲c</sup>
			۰/۸۷	۰/۹۴	۱/۲۸	۱/۳۶	اسپروس سفید <sup>۲d</sup>
۱/۲۵	۲/۵۸	۵/۳۳				۲/۰۶	راش <sup>۳</sup>
۰/۸۸	۲/۶۶	۸/۰۰				۳/۰۰	اسپروس <sup>۳</sup>
۰/۶۶	۱/۷۶	۴/۶۷				۲/۶۵	کاج ماریتیم <sup>۳</sup>

۱- فشرده سازی نیمه- ایزواستاتیکی (بلومبرگ و همکاران، ۲۰۰۵)

۲- فشرده سازی در پرس گرم به طور استاتیکی [۲۰: a، ۱۰۰: b، ۱۵۰: c و ۲۰۰: d درجه‌ی سانتی‌گراد] (طبرسا و چویی، ۱۹۹۷)

۳- فشرده سازی ترمو- هیدرو- مکانیکی (ناوی و جیراردت، ۲۰۰۰)

توان مقاومت سختی برینل به‌ویژه در فشرده‌گی پایین بیشتر از ۱ باشد. کاهش سختی برینل و شاخص توان مقاومت سختی برینل با افزایش دمای بخارزنی (جدول ۶ و ۷) می‌تواند به دلیل اندکی هیدرولیز همی سلولز در سطوح نمونه زمان بخارزنی (اینویو، ۱۹۹۳) و ایجاد لایه ضعیف و سوخته در نتیجه پرس گرم باشد. بیشتر بودن شاخص

از بررسی شاخص توان مقاومت (جدول ۵) مشاهده شد که اثر تخریبی فشرده‌سازی، سختی برینل را کمتر تحت تأثیر قرار داده است. این امر می‌تواند به این دلیل باشد که مانند تخته‌خرده‌چوب، در فشرده‌سازی استاتیکی سطوح چوب ماسیو نیز بیشتر از مغز فشرده می‌شود (وانگ و کوپر، ۲۰۰۵). این باعث می‌شود که شاخص

مکانیکی مانند مقاومت به فشار موازی الیاف و سختی برینل کمتر اثر دارد (مخصوصاً در سطوح فشردگی پایین) و بر روی برخی دیگر مانند مقاومت به فشار عمود بر الیاف این تأثیر بیشتر است.

بخارزنی در دمای پایین (۱۳۰ درجه سانتیگراد) باعث اندکی بهبود در خواص مکانیکی و شاخص توان مقاومت شد. در صورتی که در دمای بالا (۱۷۰ درجه سانتیگراد) مقاومت‌ها و شاخص توان مقاومت کاهش یافتند.

به‌طور کلی پالونای فشرد شده به‌روشن استاتیکی در مقایسه با سایر گونه‌ها که به روش نیمه-ایزواستاتیکی و استاتیکی فشرد شده‌اند، شاخص‌های بهتری داشت.

### منابع مورد استفاده

- Ando K, Onda H. 1999 . Mechanism for deformation of wood as a honeycomb structure I: effect of anatomy on the initial deformation process during radial compression. J Wood Science. 45:120-126
- Ashby MF, Jones DR. 1998 . Engineering materials 2. an introduction to microstructures, processing and design, second edition. Butterworth-Heinemann, Oxford. ISBN 0 75064019 7.
- Blomberg J, Persson B, Blomberg A. 2005 . Effect of semi-isostatic densification of wood on the variation in strength properties with density. Wood Science and Technology J. 39:339-350
- Blomberg J, Persson B, Bexell U. 2006 . Effect of semi-isostatic densification on anatomy and cell-shape recovery on soaking. Holzforschung. 60:322-331
- Bodig J. 1965 . The effect of anatomy on the initial stress-strain relationship in transverse compression. Forest Prod J. 15(5):197-202
- Bodig J, Jayne BA. 1982 . Mechanics of wood and wood composites. Van Nostrand Reynold Company, New York. ISBN 0 44200822 8.
- Dwianto W. 1999 . Mechanism of permanent fixation of radial compressive deformation of wood by heat or steam treatment. Doctoral thesis, Kyoto University, Wood Research Institute.
- Gibson LJ, Ashby MF. 1997 . Cellular solids: structure and properties. Cambridge University Press. ISBN 0 521 49911 9.

توان مقاومت سختی برینل در پالونیا (جدول ۵) در مقایسه با گونه‌های فشرد شده به‌روش نیمه-ایزواستاتیکی می‌تواند به‌دلیل پلاستیکی شدن سطوح چوب در نتیجه صفحات داغ پرس و بوجود آمدن یک لایه بسیار متراکم در سطح باشد (اینویو و همکاران، ۱۹۹۹؛ وانگ و کوپر، ۲۰۰۵). در صورتی که در فشردگی نیمه-ایزواستاتیکی نمونه‌ها در دمای محیط فشرد می‌شوند (لینده و کستوال، ۱۹۹۷).

در فشردگی ترمو-هیدرو-مکانیکی مشاهده شد با وجود شاخص دانسیته بالا که باعث تخریب بیشتر در ساختار چوب می‌شود شاخص توان سختی برینل در اسپروس و راش تقریباً برابر و حتی بیشتر از پالونیا است (جدول ۵ و ۷). دلیل این امر می‌تواند واکنش تشکیل پیوندهای عرضی در ماتریکس چوب و کریستالی شدن میکروفیبریل‌ها در نتیجه بخارزنی طولانی مدت نمونه‌ها در زمان فشردگی باشد (دویانتو، ۱۹۹۹).

### نتیجه‌گیری

فشردگی چوب پالونیا باعث افزایش دانسیته و خواص مکانیکی آن شد.

افزایش درصد فشردگی از طرفی باعث افزایش دانسیته و خواص مکانیکی و از طرفی باعث کاهش شاخص توان مقاومت شد.

شاخص توان مقاومت نشان داد که به دلیل تخریب ساختار چوب زمان فشردگی شدن و با افزایش درصد فشردگی، مقاومت چوب فشرد شده کمتر از مقداری است که برای چوب فشرد نشده پیش‌بینی شده بود. همچنین این شاخص نشان داد که جنبه منفی فشردگی (تخریب و تغییر شکل سلول‌ها) بر روی برخی از خواص

- Lindhe C, castwall L. 1997 . Process for producing hard elements of wood. U.S. Patent No.5678618
- Navi P, Girardet F. 2000 . Effect of thermo-hydro-mechanical treatment on the structure and properties of wood. *Holzforschung*. 54:287-293
- Perkitny T, Jablonski W. 1984 . On the assessment of properties of densified wood. *Holz Roh Werkst*. 42:81-84
- Tabarsa T, Chui YH. 1997 . Effect of hot-pressing on properties of white spruce. *Forest Prod J*. 47:71-76
- Tabarsa T, Chui YH. 2001 . Characterizing microscopic behavior of wood under transverse compression: Part 2. effect of species and loading direction. *Wood And Fiber Science*. 33:223-232
- Wang JY, Cooper PA. 2005 . Effect of grain orientation and surface wetting on vertical density profiles of thermally compressed fir and spruce. *Holzforschung*. 63:397-402
- Haygreen JG, Daniels DH. 1969 . The simultaneous drying and densification of sapwood. *Wood And Fiber Science*. 1:38-52
- Inoue M, Norimoto M, Tanahashi M, Rowell RM. 1993 . Steam or heat fixation of compressed wood. *Wood And Fiber Science*. 25:224-235
- Kunes RH. 1968 . Strength and elastic properties of wood in transverse compression. *Forest Prod J*. 18:65-72
- Kollmann FP, Kuenzi EW, Stamm AJ. 1975 . Principles of wood science and technology: vol 2. Wood based materials. Springer, Berlin Heidelberg New York.
- Kollmann FP, Cote WA. 1984 . Principles of wood science and technology: vol 1. Solid wood. Springer, Berlin Heidelberg New York.
- Krikorian AD. 1988 . Paulownia in china: cultivation and utilization. *Economic Botany J*. Vol:42

## Effect of static densification of treated paulownia wood on relationship between strength and density

Mohammadi, A.<sup>1\*</sup>, Tabarsa, T.<sup>2</sup> and Tasooji, M.<sup>3</sup>

1\*-M.Sc Student. Dept.of Wood and Paper Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. mahli33azer@yahoo.com

2- Associate Prof., Faculty of Forestry & Wood Technology of Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan.

3- Ph.D Student. Dept.of Wood and Paper Sciences, Tehran University of Natural Resources, Tehran, Iran.

Received: Dec., 2009

Accepted: Dec., 2010

### Abstract

In this paper effect of static densification of treated paulownia on relationship between strength properties and density was investigated. Specimens were steamed at 130 and 170°C and immediately were compressed to 35% and 45% of their original thickness in radial direction. Mechanical properties such as bending strength, brinell surface hardness and compression strength in axial and radial direction were determined for non-densified and densified wood. Indexes of density, strength, quality and strength potential were calculated to study the relationship between strength and density. The results show that the density index and strength index and also strengths significantly increased with increase in densification but strength potential indexes decreased. Steam treatment at 130°C had a slight positive effect on the strengths and strength potential indexes as effect of softening the wood but the strength potential indexes and strengths decreased due to treatment of wood at 170°C. Generally, strength potential indexes of all tested mechanical properties show that strength of densified paulownia was lower compared to what had expected for non-densified paulownia from increasing density, which in turn demonstrate the cell walls were negatively affected by compression. Axial compression strength and brinell hardness were slightly affected by densification.

**Keywords:** static densification, paulownia, density index, strength index, quality index, strength potential index