

تأثیر اصلاح بخار گرمایی - مکانیکی بر خواص کاربردی گلولام ساخته شده از چوب صنوبر

چکیده

هدف از این تحقیق، بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی گلولام ساخته شده از چوب صنوبر (*Populus deltoides*) فشرده شده با فرایند ترکیبی بخار گرمایی - مکانیکی (ترکیبی از دو تکنیک تیمار بخار گرمایی و عملیات فشرده سازی) بود. در این بررسی تیمار بخار گرمایی چوب صنوبر در دماهای ۱۳۰، ۱۵۰ و ۱۷۰ درجه سانتی گراد و مدت زمان های ماندگاری ۲۰ و ۴۰ دقیقه انجام شد. سپس تیمار فشرده سازی چوب صنوبر در دمای پرس ۱۶۰ درجه سانتی گراد، زمان پرس ۲۰ دقیقه و با دو ضریب فشردگی ۴۰ و ۶۰ درصد (جهت شعاعی) صورت پذیرفت. برای ساخت گلولام، از اتصال انگشتی و چسب پلی اورتان استفاده گردید. خواص فیزیکی و مکانیکی گلولام ساخته شده از جمله جذب آب، واکنشیدگی شعاعی و مماسی، جدا شدن لایه ها، مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته و مقاومت برشی خط چسب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که خواص فیزیکی و مکانیکی گلولام ساخته شده از چوب صنوبر تیمار شده با فرایند بخار گرمایی - مکانیکی افزایش می یابد. بر اساس نتایج میزان جذب آب و واکنشیدگی شعاعی گلولام ساخته شده از چوب های تیمار شده با فرایند ترکیبی بخار گرمایی - مکانیکی افزایش می یابد. همچنین فرایند ترکیبی بخار گرمایی - مکانیکی سبب کاهش میزان جدا شدن لایه های گلولام پس از چرخه های غوطه وری - خشکاندن می گردد. ویژگی های مکانیکی گلولام های ساخته شده از جمله مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته خمشی در اثر تیمار ترکیبی بخار گرمایی - مکانیکی افزایش یافته؛ اما مقاومت برشی خط چسب گلولام ها در اثر این تیمار کاهش می یابد. لذا نتایج بیانگر بهبود برخی خواص فیزیکی و مکانیکی گلولام در اثر فرایند ترکیبی بخار گرمایی می باشد.

واژگان کلیدی: گلولام، تیمار ترکیبی بخار گرمایی - مکانیکی، ویژگی های فیزیکی و مکانیکی، ضریب فشردگی.

رضا حاجی حسنی^{۱*}
بهبود محبی^۲
سعید کاظمی نجفی^۳

^۱ استادیار بخش تحقیقات علوم چوب و فرآورده های آن،
موسسه تحقیقات جنگل ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات،
آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

^۲ دانشیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع
طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

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

مسئول مکاتبات:
Reza.Hajihassani@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۰۵

مقدمه

یکی از فرآورده های چوبی مهم و مهندسی شده که در اوایل قرن بیستم در اروپا توسط Otto Hetzer آلمانی ابداع گردید گلولام می باشد [۱]. این محصول از لایه های چوبی بریده شده که در جهات افقی، با استفاده از اتصالات

انگشتی و یا نیم - نیم برای تأمین طول مورد نظر به یکدیگر چسبانده شده اند ساخته شده است [۲]. گلولام می تواند زیبایی طبیعی چوب را در ساختمان ها و سازه های چوبی به نمایش گذاشته و به طور گسترده ای مورد استفاده قرار گیرد؛ لذا خواص منحصر به فرد آن از قبیل قابلیت

تغییرات مطلوبی را در ساختار فیزیکی چوب و گلولام از قبیل کاهش هم کشیدگی و واکشیدگی، رطوبت تعادل کم، افزایش مقاومت به هوازگی و افزایش زیبایی چوب، رنگ تیره و مقاومت به تخریب بالاتر به همراه دارد؛ ولی متأسفانه ویژگی‌های مکانیکی؛ مانند مقاومت، سختی و سفتی کاهش می‌یابد و این کاهش مقاومت بستگی به روش اصلاح، گونه چوبی و ویژگی‌های آن، میزان رطوبت اولیه چوب، اتمسفر، زمان و درجه حرارت تیمار دارد [۹]. لذا برای برطرف نمودن این مشکل می‌توان از دیگر روش‌های اصلاحی از جمله اصلاح مکانیکی به‌تنهایی یا در ترکیب با آن‌ها استفاده نمود.

می‌دانیم که افزایش دانسیته چوب اغلب خواص مکانیکی چوب را بهبود می‌بخشد. فرآیند فشرده‌سازی چوب یک روش اصلاحی بسیار مؤثر برای افزایش دانسیته چوب می‌باشد [۱۰]. فشرده‌سازی چوب خواص چوب سبک و حجیم و نیز خصوصیات سطح را تغییر می‌دهد، لذا برای گونه‌هایی با دانسیته کم؛ مانند صنوبر لرزان و صنوبر هیبرید بسیار مناسب می‌باشد [۱۱]. لذا یکی دیگر از روش‌های دوستدار محیط‌زیست نوین و تکوین یافته که گرایش تازه‌ای در تولید مواد چوبی متراکم شده مقاوم می‌باشد تحت تأثیر قرار دادن چوب توسط ترکیبی از حرارت، رطوبت و عمل مکانیکی می‌باشد که به نام تیمار گرمایی - مکانیکی شناخته شده است [۱۲، ۱۳]؛ به‌طوری‌که چوب در اثر اصلاح گرمایی، آب‌گریز [۱۲، ۱۴] و نیز مقاوم به عوامل مخرب بیولوژیکی می‌شود [۱۵] و از طرف دیگر با به‌کارگیری نیروهای فشاری، ویژگی‌های مکانیکی چوب متراکم شده افزایش می‌یابد [۱۲]؛ لذا متراکم‌سازی به روش گرمایی - مکانیکی، مقاومت و سختی چوب را افزایش داده و به‌ویژه برای گونه‌های سبک و با دانسیته کم مانند صنوبرها مناسب می‌باشد [۱۱، ۱۲].

به‌طورکلی، ضرورت استفاده از تیمار بخار گرمایی - مکانیکی در تولید گلولام به دلیل حذف معایب و محدودیت‌های چوب ماسیو است؛ بنابراین، به دست آوردن شرایط بهینه در این روش جدید می‌تواند خواص عملکردی برتر محصول را به همراه داشته باشد. به‌عبارت‌دیگر، در تیمار بخار گرمایی - مکانیکی، نه‌تنها شرایط مناسب بخاردهی و گرما می‌تواند خواص فیزیکی

طراحی بالا و اشکال مختلف کاربرد، تولید آسان، مقاومت بالا و عملکرد فوق‌العاده، گلولام را به‌عنوان یک انتخاب برتر برای سازه‌های مسکونی و پروژه‌های ساختمانی و دیگر سازه‌های تجاری سبک ساخته است [۳]. با این حال گلولام دارای برخی از معایب و محدودیت‌های چوب ماسیو از جمله جذب و دفع رطوبت، تغییرات ابعادی، تخریب توسط عوامل مخرب زیستی، اشعه ماورای بنفش و هوازگی و برخی ضعف‌های مکانیکی و ... را نیز به همراه دارد، لذا در سال‌های اخیر سعی شده است که با استفاده از روش‌های متعدد اصلاحی، ویژگی‌های این مواد را اصلاح نموده و آن‌ها را برای کاربردهایی با قابلیت‌هایی فراتر از آنچه تاکنون به کار می‌روند مورد استفاده قرار داد.

یکی از روش‌های اصلاح، تیمار گرمایی می‌باشد. در فرآیند گرمایی، اتصالات لیگنوسلولزی به‌وسیله یون‌های هیدرونیوم به وجود آمده از هیدرولیز آب مورد حمله قرار می‌گیرند. به عبارتی، آب در درجه حرارت 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؛ پلی‌ساکاریدها را هیدرولیز می‌نماید. پروتون تشکیل‌شده از آب (یون‌های هیدرونیوم)، واکنش‌های استیل زدایی و هیدرولیز را افزایش می‌دهد [۴]. در این روش، ترکیبات مضر، مشکلات مربوط به خوردگی و بازیابی مواد شیمیایی و انهدام آن‌ها وجود ندارد [۵]. تیمار بخار، با حذف گروه‌های استیل همی سلولز و تولید اسید استیک سبب هیدرولیز همی سلولزها و کاهش گروه‌های هیدروکسیل می‌گردد. هیدرولیز اسیدی پلی‌ساکاریدهای دیواره سلولی، مونوساکاریدهای قابل حل در آب (آرابینوز، گالاکتوز، گلوکز، زایلوز و مانوز) را تولید می‌نماید [۶]. حضور اسید استیک مشتق شده از همی سلولز هم‌چنین عاملی برای افزایش تخریب لیگنین می‌باشد. تخریب اتصالات B-O-4 در لیگنین سوزنی‌برگان در طول فرآیند گرمایی دلیل اصلی کاهش سفتی چوب می‌باشد [۷]. لیگنین نوساختار شده (بازسازی‌شده) موجب افزایش مقاومت به شکست در نمونه‌های تیمار شده می‌گردد. هم‌چنین لیگنین اصلاح‌شده مقاومت چوب تیمار شده به جذب آب را افزایش می‌دهد [۸]. بنابراین تیمار گرمایی،

مواد و روش‌ها

در ابتدا نمونه‌های چوبی با ابعاد $50 \times 50 \times 50$ میلی‌متر از چوب صنوبر (*Populus deltoides*) تهیه و به مدت ۲۴ ساعت قبل از تیمار در آب غوطه‌ور گردیدند. سپس قطعات تهیه‌شده در درون رآکتور بخارزنی قرار داده‌شده و در دماهای ۱۳۰، ۱۵۰ و ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان‌های ماندگاری ۲۰ و ۴۰ دقیقه تیمار شدند (شکل ۱).

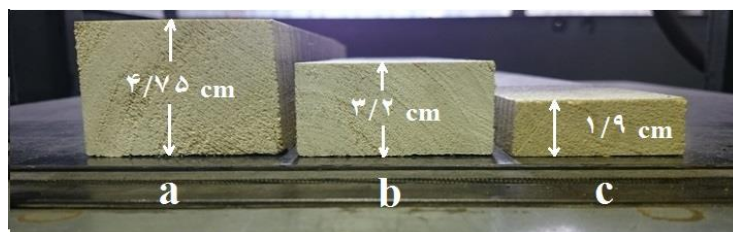


شکل ۱- رآکتور بخارزنی برای تیمار بخار گرمایی چوب صنوبر

مناسب را فراهم کند، بلکه فرایند فشرده‌سازی، برخی از ضعف‌های مکانیکی ناشی از تیمار بخار گرمایی مانند کاهش وزن و کاهش مقاومت را برطرف می‌نماید. لذا هدف از این پژوهش بررسی تیمار و فشرده‌سازی چوب صنوبر به روش تیمار اصلاح ترکیبی بخار گرمایی- مکانیکی و بررسی امکان ساخت تیر لایه‌ای از آن، ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی تیرهای ساخته‌شده و بررسی ویژگی‌های خط چسب در تیرهای ساخته‌شده از چوب‌های تیمار شده به روش اصلاح ترکیبی بخار گرمایی- مکانیکی می‌باشد.

۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند تا به رطوبت کاربردی موردنظر (حدود ۱۵٪) برسند. در گام بعدی نمونه‌های شاهد و تیمار شده با استفاده از پرس گرم آزمایشگاهی در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۲۰ دقیقه با دو سطح فشردگی ۴۰ و ۶۰ درصد نسبت به ضخامت اولیه (شکل ۲) و در راستای شعاعی تحت فشار پرس 55 kg/cm^2 فشرده شدند [۱۲].

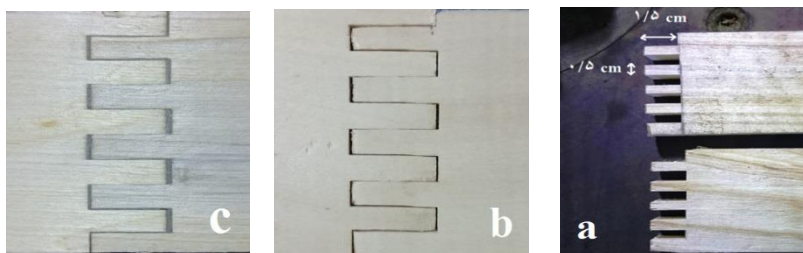
در این مرحله با توجه به این‌که برای ساخت هر گلولام تعداد ۶ بلوک موردنیاز بود و با توجه به متغیرهای در نظر گرفته‌شده برای ساخت گلولام و نیز با در نظر گرفتن تعداد ۵ تکرار برای هر تیمار؛ در مجموع تعداد ۴۵۰ بلوک چوب صنوبر تهیه و تحت تیمار بخار گرمایی قرار گرفتند. پیش از فرآیند فشرده‌سازی و به دلیل رطوبت بالای نمونه‌ها، ابتدا آن‌ها را در هوای آزاد قرار داده تا از رطوبت آن‌ها کاسته شود و در مرحله بعد در داخل آون و در دمای



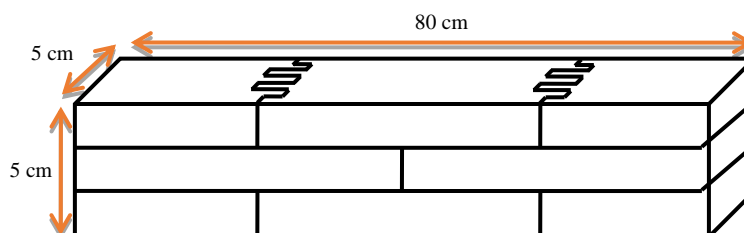
شکل ۲- ضخامت نمونه پیش از پرس برای ضرایب فشردگی ۶۰٪ (a) و ۴۰٪ (b)، ضخامت بعد از پرس برای هر دو ضرایب فشردگی (c)

خورده گردید (شکل ۳). سپس قبل از عملیات چسب‌زنی و ساخت گلولام، با توجه به نحوه قرار گرفتن اتصالات در گلولام، قطعات مختلف هر تیر بر اساس شکل ۴ بر روی هم مونتاژ و آماده‌سازی شدند.

قطعات فشرده‌شده ابتدا پرداخت شدند و در ابعاد طولی موردنظر برای ساخت گلولام برش خوردند. در مرحله بعد با استفاده از تیغه‌های شیارزن ۶ تیغه اقدام به ایجاد اتصالات انگشتی از نوع عمودی بر روی قطعات برش



شکل ۳- ابعاد و تعداد اتصالات انگشتی (a)، اتصال انگشتی قبل (b) و بعد از چسب زنی (c)



شکل ۴- نحوه برش و چینش لایه‌ها در تیر لایه‌ای

گلولام با توجه به عوامل متغیر (سه سطح دمای بخارزنی، دو سطح زمان ماندگاری و دو سطح ضریب فشرده‌سازی) و ۵ تکرار و همچنین شاهد (شاهد و شاهد با ضرایب فشردگی ۴۰ و ۶۰ درصد) ساخته شد (شکل ۵). در پایان ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های تهیه‌شده بر اساس استاندارد ASTM D 143-09، ASTM D 905-03 و ISO 8375 مورد ارزیابی قرار گرفتند [۱۷، ۱۸، ۱۹]. نتایج حاصل از آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی نیز با استفاده از طرح آماری کاملاً تصادفی متعادل تحت آزمایش فاکتوریل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

چسب مورد استفاده برای ساخت گلولام، چسب دوبخشی پلی‌اورتان (بخش چسب با کد ML-518 و بخش هاردنر با کد HA-418) و مقدار مصرف آن 200 g/m^2 بود. لایه‌های چسب‌زنی و مونتاژ شده گلولام تحت پرس سرد هیدرولیک کارگاهی با فشار 0.8 N/mm^2 ، مدت زمان ۸ ساعت و دمای محیط قرار داده شدند [۱۶]. در نهایت با توجه به ویژگی‌های فیزیکی چسب، برای پلیمر شدن بهتر و کامل‌تر آن و نیز انجام مراحل بعدی به مدت یک ماه در شرایط آزمایشگاهی (دمای $25 \pm 2^\circ \text{C}$ و رطوبت نسبی $65 \pm 5\%$) قرار داده شدند تا ضمن متعادل‌سازی، گیرایی چسب (Post curing) نیز کامل گردد. در مجموع، ۷۵



شکل ۵- نمونه‌هایی از گلولام‌های ساخته‌شده از چوب صنوبر تیمار شده با فرایند بخار گرمایی مکانیکی

نتایج و بحث

گرمایی، زمان ماندگاری و ضریب فشردگی را در سطح ۹۵ و ۹۹ درصد نشان می‌دهد.

جدول شماره ۱ خلاصه تجزیه واریانس خواص فیزیکی و مکانیکی و اثرات مستقل و متقابل دمای تیمار بخار

جدول ۱- تجزیه واریانس (مقادیر محاسبه شده F') برای اثر مستقل و متقابل متغیرها بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی گلولام

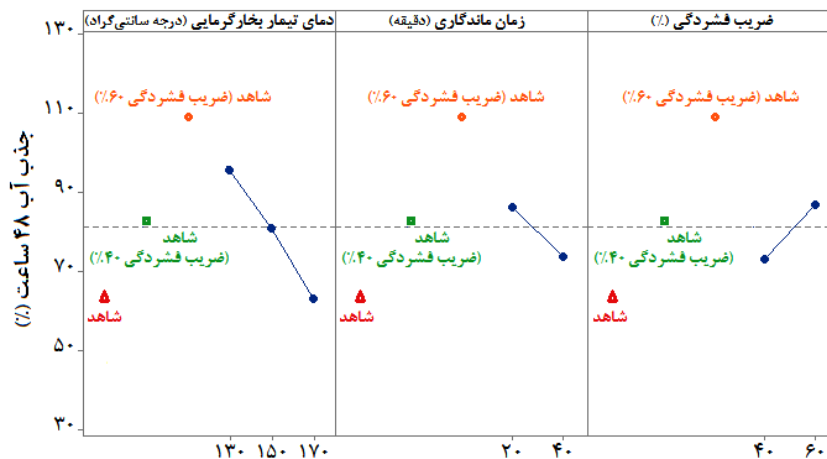
منبع تغییرات	درجه آزادی	جذب آب	واکشیدگی شعاعی	واکشیدگی مماسی	جدا شدن لایه‌ها	مقاومت خمشی	مدول الاستیسیته	مقاومت برشی خط چسب
دمای تیمار بخار گرمایی ($^{\circ}C$)	۲	۴۵/۳۷۲***	۴۴/۵۵۴***	۱۴/۴۷۵***	۳/۸۸۵*	۹/۳۵۸***	۱۲/۹۷۳***	۴/۹۲۵***
زمان ماندگاری (دقیقه)	۱	۱۹/۷۸۶***	۱۸/۹۶۷***	۱۰/۶۱۸***	۵/۱۸۹*	۸/۲۸۹***	۰/۰۱۷ ns	۰/۲۲۸ ns
ضریب فشردگی (درصد)	۱	۲۴/۳۳۵***	۱۷۴/۶۴۸***	۴/۳۶۸*	۴/۷۷۰*	۱۲/۳۶۶***	۸/۴۸۲***	۰/۱۶۲ ns
دمای تیمار بخار گرمایی * زمان ماندگاری	۲	۵/۹۰۰***	۳/۲۱۴*	۶/۵۷۴**	۳/۶۶۹*	۰/۵۰۶ ns	۰/۱۹۴ ns	۳/۳۴۲*
دمای تیمار بخار گرمایی * ضریب فشردگی	۲	۰/۸۲۳ ns	۲/۱۸۲ ns	۰/۰۳۸ ns	۰/۳۹۶ ns	۲/۰۹۳ ns	۰/۶۶۱ ns	۰/۵۳۰ ns
زمان ماندگاری * ضریب فشردگی	۱	۰/۷۸۵ ns	۰/۱۰۳ ns	۰/۰۰۱ ns	۲/۲۸۰ ns	۰/۳۰۶ ns	۰/۰۴۱ ns	۶/۹۱۴***
دمای تیمار بخار گرمایی * زمان ماندگاری * ضریب فشردگی	۲	۰/۲۳۰ ns	۰/۱۵۳ ns	۰/۱۴۵ ns	۰/۱۶۴ ns	۲/۶۸۲ ns	۲/۷۲۴ ns	۳/۳۶۲*

***: معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد، **: معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد، ns: معنی‌دار نشده

۳-۱. جذب آب گلولام

بررسی میزان جذب آب گلولام‌های ساخته‌شده از نمونه‌های شاهد و تیمار شده نشان داد که افزایش دمای تیمار بخار گرمایی و زمان ماندگاری سبب کاهش میزان جذب آب و افزایش ضریب فشردگی سبب افزایش میزان جذب آب گلولام‌ها گردیده است (شکل ۶). شکل ۶ به‌خوبی بیانگر تأثیر چشمگیر افزایش دمای تیمار بر کاهش میزان جذب آب می‌باشد، به‌طوری‌که میزان جذب آب گلولام‌های ساخته‌شده از نمونه‌های تیمار شده در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد حتی با توجه به فشردگی شدن آن‌ها، کمتر از گلولام‌های ساخته‌شده از نمونه‌های شاهدی می‌باشد که هیچ‌گونه تیماری بر روی آن‌ها اعمال نشده است. هم‌چنین با نگاهی به تأثیر زمان ماندگاری بر میزان جذب آب گلولام در شکل ۶ مشخص می‌گردد که زمان ماندگاری نیز در کاهش میزان جذب آب تأثیر بسزایی داشته است. حذف یا بلوکه شدن گروه‌های هیدروکسیل و

نیز لیگنین اصلاح‌شده (نوساختار شده) سبب کاهش خاصیت هیگروسکوپی چوب می‌گردد (۸، ۱۲). هم‌چنین به‌کارگیری چسب ضد آب پلی اورتان نیز می‌تواند عاملی مؤثر در کاهش جذب آب گلولام باشد. مهم‌ترین عامل در افزایش جذب آب گلولام، تیمار فشردگی و افزایش ضریب فشردگی می‌باشد که مقدار دانسیته در نمونه‌های تیمار شده با فرایند ترکیبی بخار گرمایی کمتر از 0.18 g/cm^3 به دست آمد. افزایش میزان فشردگی لایه‌ها از ۴۰ به ۶۰ درصد سبب افزایش میزان جذب آب گلولام گردیده است (شکل ۶)؛ در حقیقت افزایش ماده چوبی در حجم برابر سبب افزایش جذب آب می‌گردد و مهم‌تر این‌که در اثر واکشیدگی، میزان خلل و فرج ایجادشده در نمونه‌های با ضریب فشردگی ۶۰٪ بیشتر از نمونه‌های با ضریب فشردگی ۴۰٪ می‌باشد و در نتیجه ظرفیت جذب آب افزایش می‌یابد.



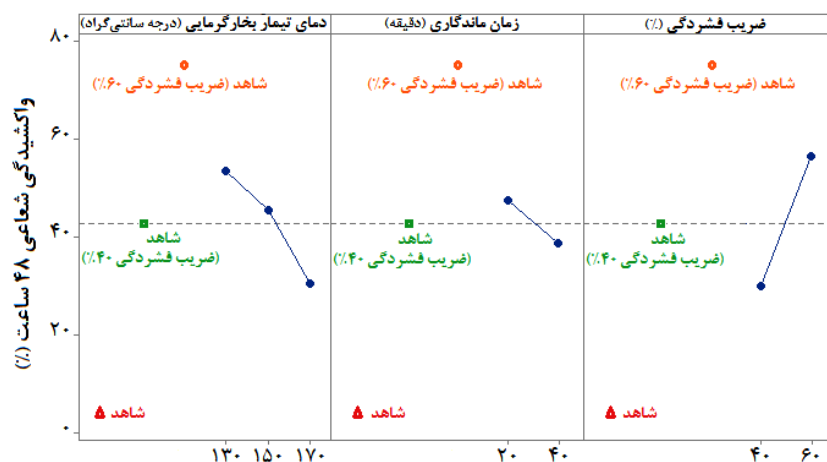
شکل ۶- تأثیر دمای تیمار بخار گرمایی، زمان ماندگاری و ضریب فشردگی بر جذب آب ۴۸ ساعت گلولام

در سطوحی پایین‌تر از گلولام‌های ساخته‌شده از نمونه‌های شاهد با همان ضرایب فشردگی می‌باشد که این موضوع تأثیر چشمگیر تیمار بخار گرمایی در کاهش جذب رطوبت و واکسیدگی شعاعی را نشان می‌دهد (شکل ۷). هم‌چنین تأثیر ضریب فشردگی بر واکسیدگی شعاعی گلولام در شکل ۷ نشان می‌دهد که با افزایش ضریب فشردگی لایه-ها، میزان واکسیدگی شعاعی گلولام افزایش یافته است که به دلیل بیشتر شدن ماده چوبی در حجم برابر و در نتیجه افزایش برگشت‌پذیری می‌باشد. در حقیقت تیمار فشرده-سازی و افزایش ضریب فشردگی مهم‌ترین عامل در افزایش برگشت‌پذیری و در نتیجه افزایش واکسیدگی در راستای فشردگی می‌باشد.

۲-۳. واکسیدگی شعاعی (واکسیدگی در راستای

فشردگی) و مماسی گلولام

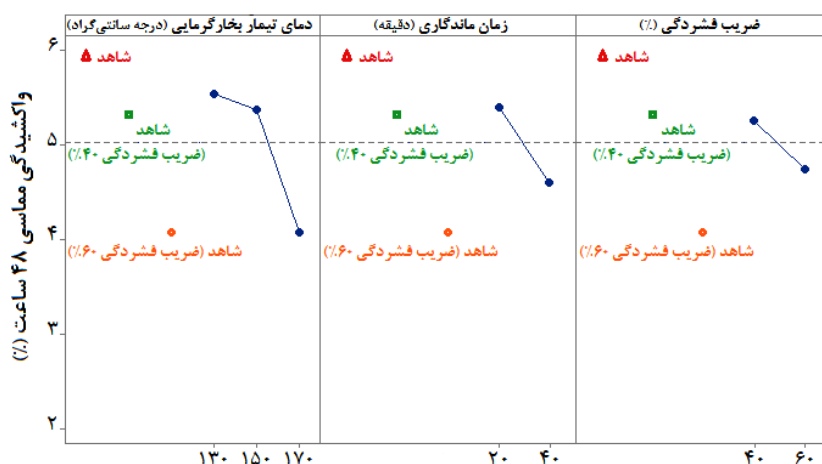
نتایج اثرگذاری فرآیند بخار گرمایی - مکانیکی بر واکسیدگی شعاعی (واکسیدگی در راستای فشردگی) ۴۸ ساعت غوطه‌وری در آب گلولام‌های ساخته‌شده از نمونه-های شاهد و تیمار شده نشان دادند که با افزایش دمای تیمار بخار گرمایی و زمان ماندگاری میزان واکسیدگی شعاعی گلولام کاهش و با افزایش ضریب فشردگی میزان واکسیدگی شعاعی گلولام افزایش می‌یابد (شکل ۷). تأثیر دمای تیمار بخار گرمایی و زمان ماندگاری بر واکسیدگی شعاعی ۴۸ ساعت گلولام بیانگر آن است که میزان واکسیدگی شعاعی گلولام‌های ساخته‌شده از نمونه‌های تیمار شده با فرآیند تیمار ترکیبی بخار گرمایی - مکانیکی



شکل ۷- تأثیر دمای تیمار بخار گرمایی، زمان ماندگاری و ضریب فشردگی بر واکسیدگی شعاعی (واکسیدگی در راستای فشردگی) ۴۸ ساعت گلولام

با توجه به این که در اثر فشردگی لایه خارجی نمونه‌ها حالت کماتی یا نیم دایره‌ای به سمت بیرون پیدا کرد، لذا در هنگام کناره‌بری گلولام‌های ساخته‌شده از نمونه‌های فشرده‌شده با ضریب فشردگی ۶۰٪ میزان ماده بیشتری نسبت به گلولام‌های ساخته‌شده از نمونه‌های فشرده‌شده با ضریب فشردگی ۴۰٪ برداشته یا حذف گردید؛ بنابراین پس از غوطه‌وری نمونه‌ها و وقوع واکنشیدگی در راستای فشردگی، کناره‌های (ضخامت) نمونه‌ها نیز به صورت مقعر درآمد و میزان واکنشیدگی مماسی گلولام کاهش یافت.

نتایج بررسی تأثیر تیمار بخار گرمایی- مکانیکی بر واکنشیدگی مماسی ۴۸ ساعت غوطه‌وری در آب گلولام‌ها نشان دادند که با افزایش دمای تیمار بخار گرمایی، زمان ماندگاری و ضریب فشردگی میزان واکنشیدگی مماسی گلولام کاهش می‌یابد (شکل ۸). کاهش واکنشیدگی مماسی گلولام با افزایش دمای تیمار بخار گرمایی و زمان ماندگاری به دلیل هیدرولیز همی سلولزها و حذف و یا بلوکه شدن گروه‌های هیدروکسیل می‌باشد [۱۲]؛ اما کاهش واکنشیدگی مماسی گلولام با افزایش میزان فشردگی لایه‌ها از ۴۰ به ۶۰ درصد به این علت می‌باشد که



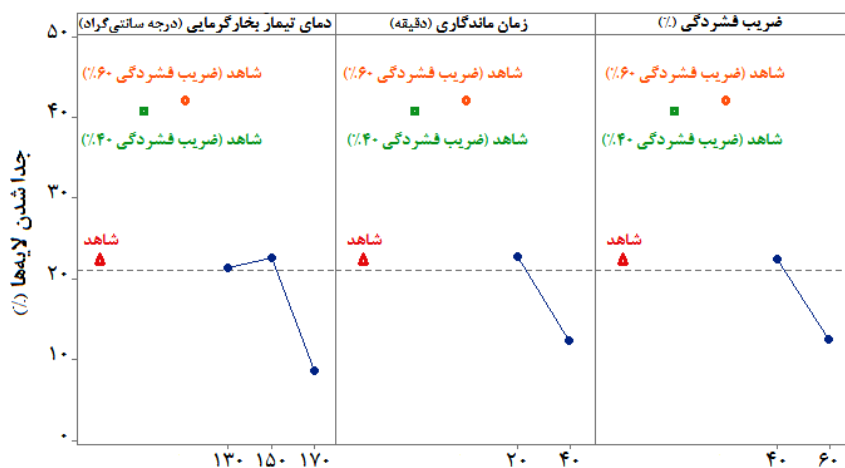
شکل ۸- تأثیر دمای تیمار بخار گرمایی، زمان ماندگاری و ضریب فشردگی بر واکنشیدگی مماسی ۴۸ ساعت گلولام ۳-۳. جدا شدن لایه-های گلولام (Delamination) پس از چرخه‌های غوطه‌وری - خشکاندن

لایه‌ها، میزان جدا شدن لایه‌ها افزایش یافته است؛ ولی در گلولام‌های ساخته‌شده از نمونه‌های تیمار شده با فرآیند بخار گرمایی با افزایش ضریب فشردگی لایه‌ها میزان جدا شدن لایه‌ها کاهش یافته است. به نظر می‌رسد که انجام عمل فشردگی با ضریب فشردگی ۶۰٪ سبب ایجاد ترک‌ها و شکست‌های ریز و افزایش خلل و فرج و در نتیجه نفوذ بهتر چسب و ایجاد اتصالات مکانیکی توسط چسب می‌گردد. به طوری کلی مقدار جدا شدن لایه‌ها در گلولام-های ساخته‌شده از نمونه‌های تیمار بخار گرمایی شده با ضرایب فشردگی ۴۰ و ۶۰ درصد در سطوحی پایین‌تر از گلولام‌های ساخته‌شده از نمونه‌های شاهد با ضرایب فشردگی مشابه می‌باشد (شکل ۹). افزایش دمای تیمار بخار گرمایی و زمان ماندگاری به دلیل تغییر ساختار شیمیایی پلی‌ساکاریدها سبب کاهش جذب رطوبت و

نتایج بررسی تأثیر فرآیند بخار گرمایی- مکانیکی بر جدا شدن لایه‌های گلولام پس از دو چرخه غوطه‌وری- خشکاندن (هر چرخه شامل ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب و ۲۴ ساعت خشکاندن در آن با دمای $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$) نشان دادند که با افزایش دمای تیمار بخار گرمایی لایه‌ها از ۱۳۰ به ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد میزان جدا شدن لایه‌های گلولام اندکی افزایش یافته و مجدداً از دمای تیمار بخار گرمایی ۱۵۰ به ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته است (شکل ۹). از طرفی افزایش زمان ماندگاری نیز باعث کاهش میزان جدا شدن لایه‌های گلولام گردیده است؛ لذا به‌طور کلی تیمار بخار گرمایی دارای اثر مثبت بر جلوگیری از جدا شدن لایه‌های گلولام بوده است (شکل ۹). نکته قابل‌توجه در شکل ۹ آن است که در گلولام‌های ساخته‌شده از نمونه‌های شاهد با افزایش ضریب فشردگی

تیمار شده با فرآیند بخار گرمایی - مکانیکی کاهش می یابد.

واکسیدگی و در نتیجه کاهش تنش های برشی ناشی از پدیده واکسیدگی می گردد [۱۲]؛ لذا جدا شدن لایه های گلولام در چرخه های غوطه وری - خشکاندن در نمونه های



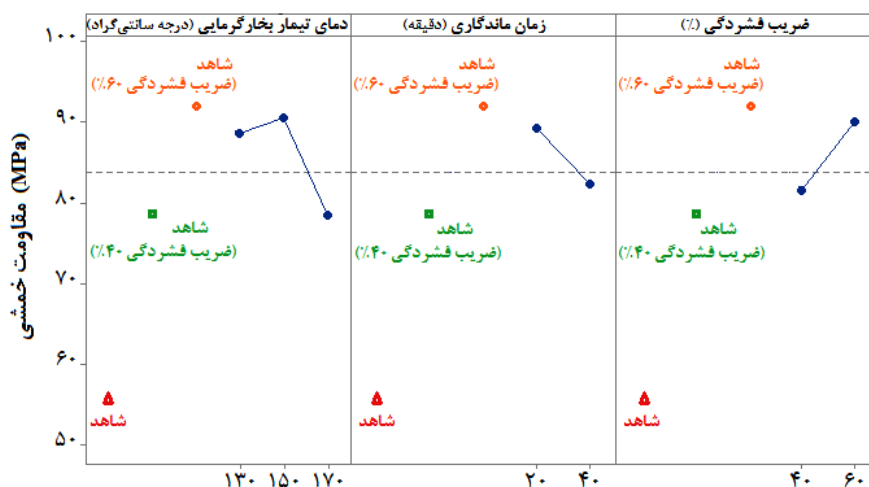
شکل ۹- تأثیر دمای تیمار بخار گرمایی، زمان ماندگاری و ضریب فشردگی بر جدا شدن لایه های گلولام پس از چرخه دوم غوطه وری - خشکاندن

خمشی کاهش می یابد. تشدید شرایط تیمار بخار گرمایی سبب تخریب بیشتر ساختار پلی ساکاریدها، ترد و شکننده شدن لیگنین و نیز کاهش طول زنجیره سلولز و در نتیجه کاهش مقاومت خمشی می گردد [۱۲]. تأثیر عملیات فشرده سازی و افزایش ضریب فشردگی بر مقاومت خمشی گلولامها در شکل ۱۰ نشان می دهد که در گلولامهای ساخته شده از نمونه های تیمار شده با فرآیند بخار گرمایی و شاهد، افزایش ضریب فشردگی لایه ها سبب بالا رفتن مقاومت خمشی گلولام می گردد که به دلیل بالا رفتن میزان دانسیته می باشد [۲۰].

۳-۴. مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته

خمشی گلولام

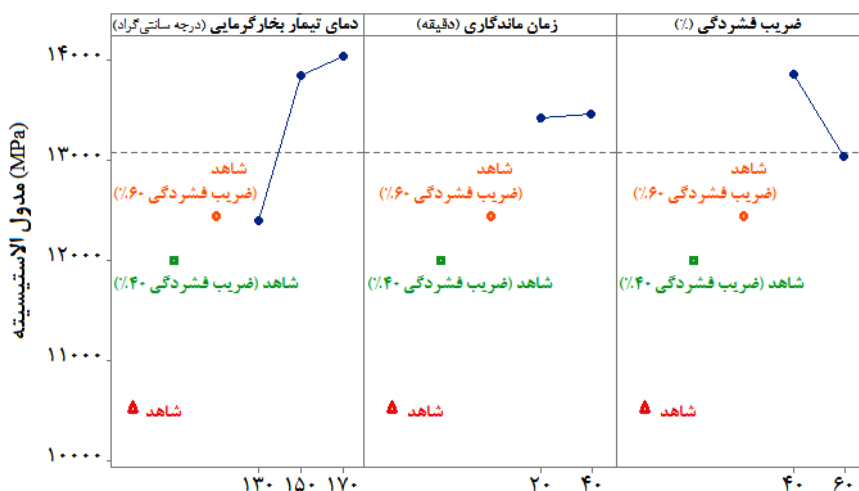
نتایج تأثیر فرآیند تیمار ترکیبی بخار گرمایی - مکانیکی بر مقاومت خمشی گلولامهای ساخته شده از نمونه های شاهد و تیمار شده نشان دادند که با افزایش دمای تیمار بخار گرمایی از ۱۳۰ به ۱۵۰ درجه سانتی گراد مقاومت خمشی اندکی افزایش یافته و در دمای ۱۷۰ درجه سانتی گراد کاهش می یابد (شکل ۱۰). همچنین تأثیر زمان ماندگاری بر مقاومت خمشی گلولام در شکل ۱۰ نشان می دهد که با افزایش زمان ماندگاری میزان مقاومت



شکل ۱۰- تأثیر دمای تیمار بخار گرمایی، زمان ماندگاری و ضریب فشردگی بر مقاومت خمشی گلولام

ضریب فشردگی لایه‌ها از ۴۰ به ۶۰ درصد، مدول الاستیسیته گلولام‌ها افزایش می‌یابد که به دلیل افزایش دانسیته می‌باشد؛ اما در گلولام‌های ساخته‌شده از نمونه‌های تیمار شده با فرآیند بخار گرمایی، افزایش ضریب فشردگی باعث کاهش مدول الاستیسیته گردید که به نظر می‌رسد به دلیل ایجاد ترک‌ها، شکاف‌ها و شکست‌های کوچک در ساختار چوب و در نتیجه کاهش صلبیت می‌باشد.

نتایج بررسی تأثیر فرآیند بخار گرمایی- مکانیکی بر مدول الاستیسیته گلولام‌های ساخته‌شده نیز نشان دادند که با افزایش دمای تیمار بخار گرمایی میزان مدول الاستیسیته گلولام افزایش می‌یابد (شکل ۱۱). در حقیقت در دمای بخار گرمایی بالا ساختار پلی‌ساکاریدها و از جمله لیگنین ترد و شکننده می‌گردد [۱۲]، یعنی خاصیت ارتجاعی چوب کاهش و یا به عبارتی دیگر مدول الاستیسیته افزایش می‌یابد. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که در نمونه‌های شاهد با انجام عمل فشردسازی و نیز افزایش

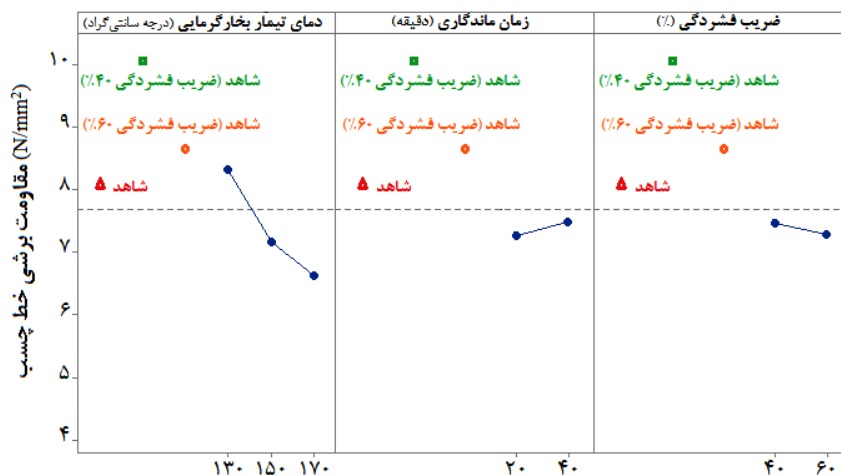


شکل ۱۱- تأثیر دمای تیمار بخار گرمایی، زمان ماندگاری و ضریب فشردگی بر مدول الاستیسیته گلولام

۳-۵. مقاومت برشی خط چسب گلولام

های ساخته شده از نمونه های شاهد به طور کلی انجام عمل فشرده سازی لایه ها سبب افزایش مقاومت برشی خط چسب گلولام به دلیل بالا رفتن دانسیته می گردد، اما با افزایش ضریب فشرده گی لایه ها از ۴۰ به ۶۰ درصد میزان این ویژگی مکانیکی کاهش می یابد (شکل ۱۲). در این خصوص نیز نتایج نشان می دهند که بازهم غالب شکست ها در آزمون مقاومت برشی خط چسب در بخش چوبی اتفاق افتاده است؛ و این بدان مفهوم است که افزایش ضریب فشرده گی سبب ایجاد شکست های کوچک در ساختار فیزیکی چوب و افزایش تنش های برشی در اثر وارد شدن نیروی برشی و در نهایت کاهش مقاومت برشی خط چسب می گردد. به طور کلی مقاومت برشی خط چسب گلولام های ساخته شده از نمونه های تیمار شده با فرآیند بخار گرمایی کمتر از گلولام های ساخته شده از نمونه های شاهد می باشند.

نتایج تأثیر فرآیند تیمار ترکیبی بخار گرمایی - مکانیکی بر مقاومت برشی خط چسب گلولام نشان دادند که با افزایش دمای تیمار بخار گرمایی میزان مقاومت برشی خط چسب کاهش می یابد (شکل ۱۲). نتایج به دست آمده از نمونه های آزمون مقاومت برشی خط چسب نشان دادند که تمامی شکست ها در قسمت چوب اتفاق افتاده است و نه در ناحیه چسب؛ که این نکته مؤید آن است که با افزایش دمای تیمار بخار گرمایی به دلیل هیدرولیز پلی ساکاریدها، طول زنجیره سلولزی کاهش یافته و مهم تر این که لیگنین و ساختار چوب ترد و شکننده می شود، لذا انجام عمل فشرده سازی سبب ایجاد ترک ها و شکست های کوچک در ساختار فیزیکی چوب و در نتیجه کاهش مقاومت برشی چوب و در نهایت منجر به کم شدن مقاومت برشی خط چسب می گردد. هم چنین در گلولام -



شکل ۱۲- تأثیر دمای تیمار بخار گرمایی، زمان ماندگاری و ضریب فشرده گی بر مقاومت برشی خط چسب گلولام

خمشی، افزایش مدول خمشی و کاهش مقاومت برشی خط چسب گردد. نتایج این پژوهش نشان دادند که شرایط اپتیمم فرآیند ترکیبی بخار گرمایی - مکانیکی برای به دست آوردن محصولی با ویژگی های فیزیکی و مکانیکی برتر، دمای بخار گرمایی ۱۵۰ درجه سانتی گراد، زمان ماندگاری ۲۰ دقیقه و ضریب فشرده گی ۴۰٪ می باشد.

نتیجه گیری

به طور کلی نتایج نشان دادند که در ساخت گلولام، به کارگیری تیمار ترکیبی بخار گرمایی - مکانیکی می تواند سبب افزایش میزان جذب آب و واکنشیدگی شعاعی، کاهش واکنشیدگی مماسی، کاهش میزان جدا شدن لایه ها در چرخه های غوطه وری - خشکاندن، افزایش مقاومت

منابع

- [1] Andre, A., 2006. Fibres for Strengthening of Timber Structures, Research Report, Forest and Wood Product Research and Development Corporation, Australia, 3: 1–91.
- [2] Yang, T.H., Wang, S.Y., Tsai, M.J., and Lin, C.Y., 2009. The Charring Depth and Charring rate of Glued Laminated Timber After a Standard Fire Exposure Test. *Building and Environment*, 44: 231–236.
- [3] Smith, I., Foliente, G., Nguyen, M., and Syme, M., 2005. Capacities of Dowel-Type Fastener Joints in Australian Pine. *Journal of Materials in Civil Engineering. ASCE*, 17(6): 664–75.
- [4] Liu, S., 2008. A kinetic Model on Autocatalytic Reactions in Woody Biomass Hydrolysis. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy.*, 2: 135–147.
- [5] Garrote, G., Domínguez, H., and Parajó, J.C., 1999. Hydrothermal Processing of Lignocellulosic Materials, *Holz als Roh- und Werkstoff*, 57: 191–202.
- [6] Lam, P.S., 2011. Steam Explosion of Biomass to Produce Durable Pellet, Ph.D. Dissertation, The University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- [7] Assor, C., Placet, V., Chabbert, B., Habrant, A., Lapierre, C., Pollet, B., and Perre, P., 2009. Concomitant Changes in Viscoelasticity Properties and Amorphous Polymers During the Hydrothermal Treatment of Hardwood and Softwood. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57: 6830–6837.
- [8] 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.
- [9] Mitchell, P.H., 1988. Irreversible Property Changes of Small Loblolly Pine Specimens Heated in Air, Nitrogen, or Oxygen. *Wood and Fiber Science*, 20(3): 320–55.
- [10] Stamm, A.J., 1964. *Wood and Cellulose Science*, New York: Ronald Press, p. 549.
- [11] Gong, M., Lamason, C., and Li, L., 2010. Interactive Effect of Surface Densification and Post-Heat-Treatment on Aspen Wood, *Journal of Materials Processing Technology.*, 210: 293–296.
- [12] 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)*, Stockholm, Sweden, 353-360.
- [13] Navi, P., and Heger, F., 2004. Combined Densification and Thermo-Hydro-Mechanical Processing of Wood, *MRS Bull*, 29: 332–336.
- [14] Tjeerdsma, 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.

- [15] Khademi, L., and Mohebbi B., 2011. Bioresistance of Poplar Wood Compressed by Combined Hydro-Thermo-Mechanical Wood Modification (CHTM): Soft-Rot and Brown-Rot. *International Biodeterioration & Biodegradation* , 65: 866-870.
- [16] Ohnesorge, D., Richter, K., and Becker, G., 2010. Influence of Wood Properties and Bonding Parameters on Bond Durability of European Beech Glulams, *Annals of Forest Science*, 67 (6): 601.
- [17] Standard Methods of Testing Small Clear Specimens of Timber. American Society for Testing of Materials, ASTM D 143-09, 2014.
- [18] Standard Test Methods for Strength Properties of Adhesives Bond in Shear by Compression Loading. American Society for Testing of Materials, ASTM D 905-03, 2003.
- [19] Timber Structures- Glued Laminated Timber -Test Methods for Determination of Physical and Mechanical Properties, 2: 15. ISO 8375. 2009.
- [20] Blomberg, J., 2005. Elastic Strain at Semi-Isostatic Compression of Scots Pine (*Pinus sylvestris*). *Journal of Wood Science.*, 51: 401-404.

The effect of hygro-thermo-mechanical modification on the applied properties of glulam made from poplar

Abstract

The objective of this study was to investigate the physical and mechanical properties of glulam made from compressed poplar wood (*Populus deltoides*) by technique of Combined Hygro-Thermo-Mechanical Treatment (CHTMT) which is combination of two techniques of hygrothermal treatment and densification of wood. The poplar wood blocks were initially treated hygrothermally at temperatures of 130, 150, and 170°C for holding times of 20 and 40 minutes. Afterwards, the densification process was carried out under a hot press (at 160°C for 20 minutes) at two levels of compression set, i.e. 40 and 60 percent based on the blocks thickness (radial direction). For production of glulam, the blocks were jointed together by finger joint and polyurethane resin. The produced glulam were physically and mechanically tested for its water absorption, radial and tangential swelling, delamination, bending strength, modulus of elasticity and shear strength. Results revealed that physical and mechanical properties of glulam were enhanced due to the CHTMT treatment. According to the results, water absorption and radial swelling of glulam were increased due to the CHTMT, significantly. Moreover, this treatment reduced the delamination of samples after soaking- drying cycles. It was also found that the CHTMT could significantly enhance mechanical properties of glulam such as bending strength and bending modulus of the elasticity; but decreases shear strength of glue line. Generally, results showed positive effects of CHTMT in glulam production.

Keywords: Glulam, Combined Hygro-Thermo-Mechanical Treatment (CHTMT), Physical and Mechanical Properties, Compression set.

R. Hajihassani^{1*}
B. Mohebbi²
S. Kazemi Najafi³

¹ Assistant Prof., Wood and forest products division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

² Associate Prof., Department of Wood and Paper Sciences, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

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

Corresponding author:
Reza.Hajihassani@gmail.com

Received: 2019/09/15
Accepted: 2019/12/26