بررسی مقایسه‌ای اثر نوع پیش تیمار و شرایط فشرده‌سازی بر خواص فیزیکی و مکانیکی چوب‌های پالونیا و صنوبر

چکیده

به دلیل کمبود منابع جنگلی، استفاده از گونه‌های چوبی تندرشد موردتوجه طراحان و مهندسان قرارگرفته است. وزن مخصوص و مقاومت‌های مکانیکی کم، از چالش‌های اساسی به‌کارگیری برخی ازاین‌گونه‌های چوبی به‌ویژه در تولید فراورده‌های ساختمانی و ویژگی نهایی آنها می‌باشد. استفاده از روش‌های مختلفی همچون تیمارهای گرمابی و گرمایی توأم با تکنیک فشرده‌سازی می‌تواند راهکاری برای رفع این مشکل باشد. این مطالعه با هدف بررسی اثر نوع پیش‌تیمار و شرایط فشردگی بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی چوب پالونیا (*Paulownia fortunei*) و صنوبر (*Populus deltoides*) انجام‌شده است. بدین منظور، از پیش‌تیمار با آب ۲۵°C و فشردگی در پرس گرم ۱۶۰°C و همچنین پیش‌تیمار با بخارآب ۱۶۰°C و فشردگی در پرس سرد ۶۰°C استفاده شد. فشردگی در دو سطح ۲۵ و ۵۰ درصد و به مدت ۲۰ دقیقه در پرس با فشار ۵ مگاپاسگال جهت رسیدن به ضخامت نهایی ۲cm انجام شد. سپس متعادل‌سازی نمونه‌ها در پرس سرد با هدف کاهش برگشت‌پذیری ضخامت و رسیدن به دما و رطوبت تعادل در محیط انجام شد. جهت بررسی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های حاصله، آزمون‌هایی شامل: دانسیته، جذب آب و واکشیدگی ضخامت (پس از ۹۶ ساعت غوطه‌وری در آب)، مدول‌گسیختگی، مدول‌الاستیسیته خمشی، مقاومت به ضربه و سختی انجام شدند. نتایج نشان داد که چوب صنوبر به دلیل دانسیته بالاتر، از خواص فیزیکی و مکانیکی مطلوب‌تری نسبت به گونه پالونیا برخوردار می‌باشد. به‌جز واکشیدگی‌ضخامت، خواص فیزیکی مطلوب و مقاومت‌های مکانیکی بالاتر در نمونه‌های چوبی اصلاح‌شده به روش بخارآب–پرس سرد بدست‌آمد. تأثیرگذاری بیشتر فرآیند اصلاح با بخارآب–پرس سرد بر روی خواص به‌خوبی مشاهده شد. مقادیر جذب آب و واکشیدگی‌ضخامت نمونه‌های چوبی با افزایش درصد فشردگی افزایش یافت. با افزایش درصد فشردگی و به‌تبع آن افزایش دانسیته نمونه‌های چوبی، به غیر از مقاومت به ضربه بقیه خواص مکانیکی روند کاهشی داشتند.

واژگان کلیدی: گونه تند رشد، تیمار گرمایی، فشرده‌سازی، خواص فیزیکی و مکانیکی.

کامبیز راشدی[۱]
پیام مرادپور[۲*]
حمید زارع حسین‌آبادی[۳]

[۱] دانشجوی دکتری گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

[۲] استادیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

[۳] دانشیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

مسئول مکاتبات:
pmoradpour@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۳۰

مقدمه

چوب، یکی از قدیمی‌ترین مواد طبیعی می‌باشد که بشر توانسته در طول تاریخ از آن در زمینه‌های مختلفی از قبیل: صنایع ساختمان‌سازی، بسته‌بندی، ساخت مبلمان، کفپوش‌سازی، قالب‌سازی، نماسازی و غیره استفاده نماید. چوب به‌عنوان یک منبع تجدید پذیر، محبوبیت روزافزون برای استفاده در صنایع مختلف داشته و به‌طور گسترده‌ای از آن در ساخت‌وساز استفاده می‌شود. با توجه به افزایش نرخ رشد جمعیت و به‌تبع آن افزایش سرانه مصرف چوب، یافتن راهکارهای مناسب، اقتصادی و دوستدار محیط-زیست جهت کاهش بهره‌برداری از جنگل‌های طبیعی همواره موردتوجه محققان و تولیدکنندگان صنایع چوب بوده است. در این راستا، استفاده از گونه‌های تندرشد (مانند پالونیا، صنوبر و اکالیپتوس) می‌تواند به‌عنوان یک‌راه حل مناسب جهت احیای بیشتر جنگل‌های طبیعی و جبران کمبود چوب مصرفی در کشورهای فقیر از منابع چوبی ازجمله کشورمان ایران باشد. صنوبرها در میان درختان به‌عنوان گونه‌های چوبی با دوره بهره‌برداری کوتاه‌مدت، کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف چوب و رفع نیازهای چوبی به‌ویژه در مناطق فاقد پوشش جنگلی دارند. سرعت رشد زیاد این درختان سبب شده است تا بتوانند در دوره‌های زمانی ۱۰ تا ۲۰ ساله چوب فراوانی تولید نمایند. این‌گونه با تولید بیش از دو میلیون مترمکعب چوب در سال، نقش ارزنده‌ای در تأمین منابع سلولزی و کاهش فشار بر جنگل‌های طبیعی ایفا می‌کند [۱]. برخی از ارقام پالونیا در شرایط طبیعی به ارتفاع ۴۰ تا ۵۰ متر و قطر ۲ متر می‌رسند. با توجه به اینکه رشد حجمی درختان پالونیا به‌طور متوسط ۰/۰۳ تا ۰/۰۵ و حتی تا ۰/۱۵ مترمکعب در سال می‌باشد و این درختان می‌توانند در سن ۵ تا ۶ سالگی با قطری حدود ۳۰ الی ۴۰ سانتی‌متر به سن بهره‌برداری برسند، لذا به‌عنوان یکی از منابع تأمین چوب موردتوجه قرارگرفته‌اند [۲]. یکی از چالش‌های اساسی در به‌کارگیری برخی از گونه‌های تندرشد به‌ویژه در تولید فراورده‌هایی با کاربرد ساختمانی، دانسیته و مقاومت‌های مکانیکی پائین آنها می‌باشد که ضروری است این مشخصه‌ها با به‌کارگیری روش‌هایی بهبود یابد. علم اصلاح چوب، به مفهوم تغییر ماده با هدف تغییر دادن یا بهتر کردن یک یا چند عیب آن می‌باشد و از جنبه‌های مختلفی امکان تغییر و بهبود خواص چوب، اصلاح ویژگی‌ها، افزایش قابلیت‌ها و برداشتن موانع پیشرو در کاربردهای گونه‌های تندرشد را فراهم می‌نماید [۳]. اصلاح چوب با توجه به نوع کاربرد و شرایط می‌تواند به روش‌های مختلفی ازجمله: اصلاح شیمیایی، حرارتی، آنزیمی، مکانیکی و یا ترکیبی از آنها انجام گیرد [۳]. ازجمله تکنیک‌های مؤثر در اصلاح فیزیکی و مکانیکی چوب گونه‌های تندرشد، افزایش دانسیته می‌باشد که با استفاده از فشرده کردن چوب به همراه فرآیندهایی چون تیمار با آب، بخارآب، تیمار شیمیایی و غیره قابل انجام می‌باشد [۴]. فشرده‌سازی[1] چوب فرایندی است که در آن بخش بیشتری از فضاهای خالی یا حفره‌های سلولی بافت چوب توسط خود ماده چوبی جایگزین می‌گردد. در این فرآیند، عناصر سازنده چوب ازجمله آوندها و فیبرها در هم فرورفته، تخلخل چوب کاهش و وزن مخصوص آن افزایش می‌یابد. حجم منافذ و حفرات سلولی چوب از طریق متراکم کردن چوب در جهت عرضی کاهش‌یافته و درنتیجه دانسیته افزایش می‌یابد که می‌تواند منجر به بهبود خصوصیات مکانیکی چوب شود [۵]. تاکنون مطالعات گسترده‌ای در زمینه بررسی مدول‌گسیختگی، مدول‌الاستیسیته و قدرت نگهداری میخ و پیچ [۶ و۷]، سختی برینل [۸] و دانسیته [۹] و سایر ویژگی چوب‌های فشرده‌شده انجام‌شده است.

یکی از روش‌های نوین که در تولید مواد چوبی فشرده‌شده به کار گرفته می‌شود، قرار دادن چوب در معرض ترکیبی از اعمال حرارت، رطوبت و عمل مکانیکی می‌باشد که به نام تیمار گرم آبی- مکانیکی شناخته‌شده است [۱۰ و ۱۱]؛ به‌طوری‌که چوب در اثر اصلاح گرم آبی، آب‌گریز شده [۱۲] و از سوی دیگر با به‌کارگیری نیروهای فشاری، ویژگی‌های مکانیکی چوب فشرده‌شده افزایش می‌یابد [۱۰]. حرارت و رطوبت در فرآیند فشرده‌سازی تغییرات شیمیایی ملایمی را در ساختار چوب ایجاد می‌کند [۱۳]. در حقیقت رطوبت فاکتور دیگری است که به کمک دما چوب را انعطاف‌پذیر می‌کند. با اعمال حرارت، لیگنین از دمای که در آن به حالت سخت و شکننده

[1] Densification

هست خارج می‌گردد و می‌توان چوب را بدون صدمه به دیواره سلول‌ها و ساختار آن، فشرده نمود، ولی این کار به دمای بالایی احتیاج دارد. به دلیل پایین بودن هدایت حرارتی چوب و بالا بودن گرمای ویژه آن، به زمان طولانی نیاز هست، اما رطوبت باعث می‌شود که در دمای پایین‌تر به این حالت رسیده و از دیگر معایب همچون تخریب حرارتی، تردی و سوختن قسمت‌های سطحی جلوگیری گردد. مسلماً با حضور رطوبت، هدایت حرارتی چوب بیشتر شده و حرارت در آن یکنواخت و سریع‌تر انتقال پیدا می‌کند و موجب کاهش زمان و بهبود کیفیت چوب فشرده‌شده می‌گردد [۱۴]. در تیمار گرم آبی و در درجه حرارت بالا، آب به یون‌های هیدرونیوم تبدیل شده و با حمله به همی‌سلولزها و تجزیه آنها منجر به تشکیل اسیدهای آلی می شوند. سپس پلی‌ساکاریدها در اثر حمله اسیدهای آلی به ساختارهای بسپاری دیواره‌های سلولی، هیدرولیز می شوند. همچنین یون‌های هیدرونیوم، واکنش‌های استیل زدایی و هیدرولیز را افزایش می‌دهد [۱۵]. در تیمار با بخار، هیدرولیز همی‌سلولزها و کاهش گروه‌های هیدروکسیل با حذف گروه‌های استیل همی‌سلولز و تولید اسید استیک صورت می‌گردد. هیدرولیز اسیدی پلی‌ساکاریدهای دیواره سلولی، مونوساکاریدهای قابل‌حل در آب را تولید می‌نماید [۱۶]. حضور اسید استیک هم‌چنین عاملی برای افزایش تخریب لیگنین می‌باشد[۱۷]. لیگنین بازسازی‌شده منجر به افزایش مقاومت به شکست در نمونه‌های تیمار شده می‌گردد [۱۸]. بنابراین تیمار گرم آبی، تغییرات مطلوبی را در ساختار فیزیکی چوب به همراه دارد؛ ولی متاسفانه 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 [۱۹]. لذا برای برطرف نمودن این مشکل می‌توان از دیگر روش‌های اصلاحی ازجمله اصلاح مکانیکی به‌تنهایی یا در ترکیب با آنها استفاده نمود. با توجه به مطالب بیان‌شده، این تحقیق با هدف بررسی اثر روش پیش‌تیمار و دمای فشرده‌سازی (۱- پیش‌تیمار با آب معمولی و فشردگی در پرس گرم، ۲- پیش‌تیمار با بخارآب و فشردگی در پرس سرد) و همچنین درصد فشردگی بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی چوب پالونیا و صنوبر انجام‌شده است. همچنین به‌کارگیری و بررسی اثر این روش‌های تیمار ترکیبی با هدف کاهش هزینه های اصلاح، می‌تواند از نوآوری‌های این تحقیق باشد.

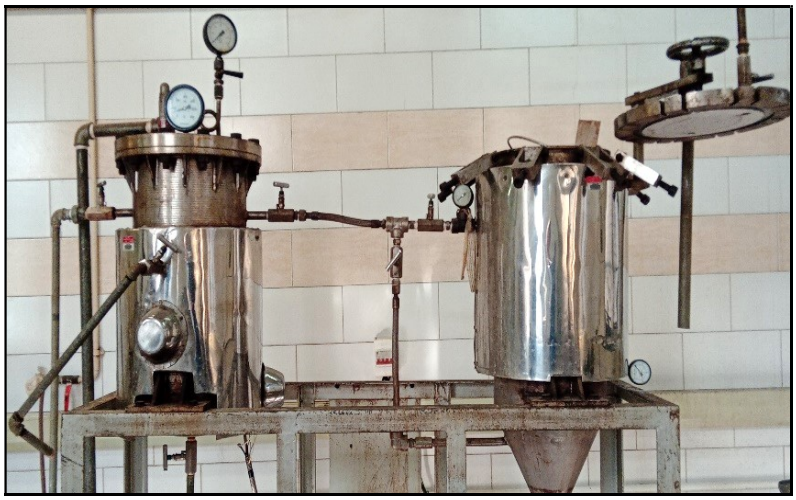
مواد و روش‌ها

برای انجام این تحقیق، چوب پالونیا (*Paulownia fortunei*) از مزرعه زراعت چوب استان گلستان و چوب صنوبر (*Populus deltoides*) از بازار چوب‌فروشی در کرج تهیه شدند و سپس به کارگاه فراورده‌های مرکب گروه علوم و صنایع و چوب و کاغذ دانشگاه تهران منتقل شدند. الوار چوبی جهت رسیدن به رطوبت ۱۲درصد، در اتاق مشروط سازی تحت دمای ۲۵°C و رطوبت نسبی ۶۵٪ قرار گرفتند. پس از مشروط سازی الوارهای چوبی، پیش‌تیمار و فشرده‌سازی نمونه‌ها بر اساس طرح آزمایش‌های پیش‌بینی‌شده در این تحقیق انجام شدند (جدول ۱). در این تحقیق نوع گونه چوبی (پالونیا و صنوبر)، نوع پیش‌تیمار و دمای فشرده‌سازی (۱- آب معمولی- پرس گرم، ۲- بخارآب-پرس سرد) و همچنین درصد فشردگی (۲۵ و ۵۰ درصد) به‌عنوان عوامل متغیر در نظر گرفته شدند. طول و عرض نمونه‌های چوبی به ترتیب ۳۰ و ۶ سانتی‌متر و همچنین ضخامت نمونه‌های چوبی ۲/۷ و ۴ سانتی‌متر به ترتیب برای فشردگی ۲۵ و ۵۰ درصد انتخاب شدند تا پس از فشرده‌سازی به ضخامت ۲cm برسند.

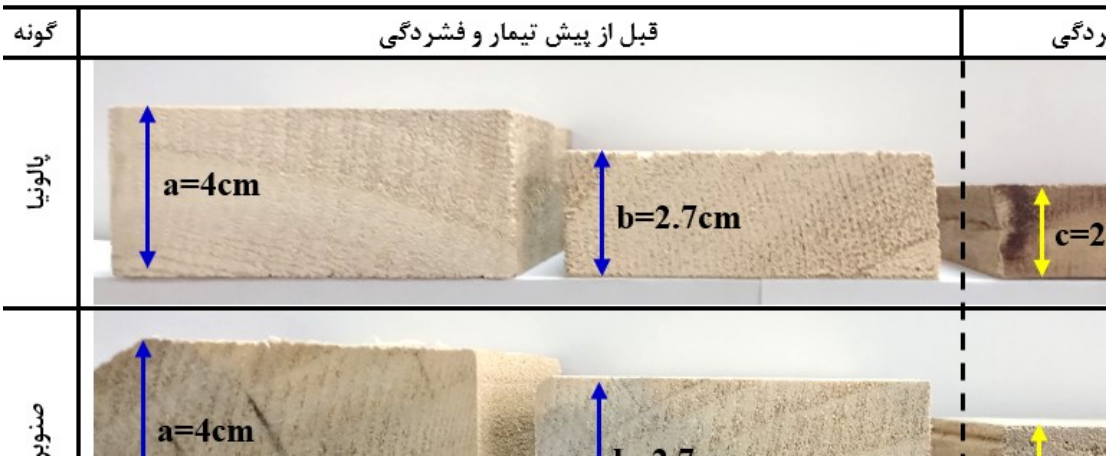
جدول ۱- طرح آزمایش‌های مورداستفاده در تحقیق

نوع گونه	تیمار ترکیبی	مقدار فشردگی (٪)	کد تیمارها
پالونیا (Pa)	-	-	control
	آب معمولی- پرس گرم (WHP)	۲۵	PaWHP25
		۵۰	PaWHP50
	بخارآب - پرس سرد (SCP)	۲۵	PaSCP25
		۵۰	PaSCP50
صنوبر (Po)	-	-	control
	آب معمولی- پرس گرم (WHP)	۲۵	PoWHP25
		۵۰	PoWHP50
	بخارآب - پرس سرد (SCP)	۲۵	PoSCP25
		۵۰	PoSCP50

پیش تیمار چوب‌های پالونیا و صنوبر به دو روش و با استفاده از آب با دمای معمولی (۲۵°C) و بخارآب (۱۶۰°C) انجام شد. تیمار آب در مخزن آب و به روش غوطه‌وری به مدت ۲۴ ساعت و تیمار بخار توسط دستگاه بخارزنی به مدت ۲۰ دقیقه در محفظه بخارزنی انجام گرفت. دستگاه بخارزنی جهت پیش‌تیمار گرمایی چوب-های پالونیا و صنوبر در شکل ۱ آمده است. پس از پیش-تیمار، فشردگی نمونه‌های چوبی نسبت به ضخامت تا حد ممکن در جهت شعاعی و با استفاده از پرس آزمایشگاهی BURKLE موجود در کارگاه مبلمان و فراورده‌های مرکب چوبی گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ دانشگاه تهران، در دو دمای ۶۰°C (پرس سرد) و ۱۶۰°C (پرس گرم) جهت رسیدن به دو سطح فشردگی ۲۵ و ۵۰ درصد انجام شد. فشار و زمان پرس جهت فشردگی به ترتیب 5MPa و ۲۰ دقیقه انتخاب شدند. ضخامت تخته‌ها پس از فشرده‌سازی به ۲ سانتی‌متر رسیدند و برای کنترل میزان فشردگی از شابلون‌های فولادی با ضخامت ۲ سانتی‌متر استفاده شد (شکل ۲). سپس متعادل‌سازی نمونه‌ها با هدف کاهش برگشت‌پذیری ضخامت و همچنین رسیدن به ضخامت نهایی و رطوبت تعادل در پرس سرد بدون اعمال فشار به سطح تخته‌ها انجام شد.



شکل ۱- دستگاه بخارزنی جهت پیش‌تیمار گرمایی



شکل ۲- ضخامت نمونه‌ها قبل و بعد از پیش‌تیمار و فشردگی در پرس برای درصد فشردگی a=۵۰ و b=۲۵ و رسیدن به ضخامت ۲cm

لازم به ذکر است قبل و بعد از پیش‌تیمار و فشرده‌سازی هر دو گونه چوبی، نمونه‌های استاندارد جهت اندازه‌گیری و تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی شامل دانسیته در رطوبت ۱۲ درصد (D_{12})، جذب آب (WA) و واکشیدگی‌ضخامت (TS) بعد از ۹۶ ساعت غوطه‌وری در آب، مدول گسیختگی (MOR)و مدول الاستیسیته خمشی (MOE)، مقاومت به ضربه (IS) و سختی (H) تهیه شدند. برای اندازه‌گیری مدول‌گسیختگی، مدول‌الاستیسیته خمشی و سختی از دستگاه Instron مدل ۴۴۸۶ استفاده شد. سختی نمونه‌های چوبی به روش جانکا در جهت عمود بر الیاف اندازه‌گیری شد. آزمون مقاومت به ضربه نیز با استفاده از دستگاه پاندولی ۱۰۰ ژول به روش شارپی و بدون فاق انجام شد. به‌منظور تحلیل نتایج به‌دست‌آمده، از طرح کاملاً تصادفی تحت طرح آزمایشات فاکتوریل کامل استفاده شد. بر این اساس از ترکیب سطوح عوامل متغیر ۸ تیمار به دست آمد. درنهایت تحلیل نتایج با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد.

نتایج و بحث

در جدول ۲، مقادیر میانگین و انحراف‌معیار خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های پالونیا و صنوبر پیش‌تیمار و فشرده‌شده نشان داده‌شده و با مقادیر نمونه‌های شاهد مقایسه شده است.

خواص فیزیکی

نتایج تجزیه واریانس اثر مستقل و متقابل عوامل متغیر بر خواص فیزیکی چوب‌های پالونیا و صنوبر پیش‌تیمار و فشرده‌شده در جدول ۳ آمده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده می‌توان اظهار داشت، به‌جز اثر درصد فشردگی بر جذب آب و اثر نوع گونه بر واکشیدگی-ضخامت، اثر مستقل بقیه عوامل بر خواص فیزیکی معنی-دار می‌باشند. نتایج تجزیه واریانس نشان می‌دهند اثر متقابل همه عوامل متغیر بر دانسیته چوب معنی‌دار می-باشد و این در حالی است که تنها اثر متقابل (درصد فشردگی × نوع تیمار) بر جذب آب و اثر متقابل (درصد فشردگی × نوع تیمار × نوع گونه چوبی) معنی‌دار شده است.

جدول ۲- مقادیر میانگین و انحراف‌معیار خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های پالونیا و صنوبر شاهد و پیش تیمار و فشرده‌شده

نوع گونه	تیمار ترکیبی	مقدار فشردگی (٪)	D_{12} (gr/cm^3)	WA(96-h) (٪)	TS(96-h) (٪)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	IS (J)	H (kN)
پالونیا (Pa)	-	-	۰/۲۹ (۰/۰۵)	۱۰۳/۵۰ (۲۲/۳۰)	۱۶/۰۵ (۶/۲۵)	۷۱/۱۲ (۱۳/۱۵)	۶۶۷۸ (۲۵۳۲)	۱۲/۷ (۳/۹)	۰/۹۶ (۰/۳۳)
	آب معمولی- پرس گرم (WHP)	۲۵	۰/۶۵ (۰/۰۳)	۱۰۱/۶۰ (۹/۸۱)	۱۸/۷۶ (۷/۱۵)	۷۱/۹۰ (۱۷/۱۴)	۵۱۸۶ (۱۴۲۳/۹)	۱۳/۴ (۳/۵۷)	۲/۱ (۰/۳۷)
		۵۰	۰/۸۱ (۰/۰۳)	۹۹/۶۰ (۱۲/۰۹)	۲۱/۹۲ (۱۰/۰۲)	۵۶/۴۵ (۹/۰۴)	۵۳۰۷ (۳۵۷/۱۱)	۱۶/۶ (۲/۰۷)	۱/۶۰ (۰/۲۷)
	بخارآب - پرس سرد (SCP)	۲۵	۰/۸۲ (۰/۰۵)	۷۱/۳۰ (۲۴/۷۴)	۲۲/۸۰ (۶/۱۳)	۷۶/۶۱ (۲۰/۴۱)	۶۶۱۳ (۳۱۷/۶)	۱۱/۲ (۲/۷۷)	۲/۱۲ (۰/۵۰)
		۵۰	۰/۸۱ (۰/۰۷)	۸۶/۴۰ (۱۴/۱۷)	۶۲/۵۰ (۱۱/۹۱)	۷۰/۹۷ (۵/۵)	۱۰۸۸۴ (۱۱۲۳/۰۵)	۲۴/۲ (۵/۲۶)	۲/۵۰ (۰/۳)
صنوبر (Po)	-	-	۰/۴۴ (۰/۰۴)	۹۱/۲۰ (۱۹/۳۲)	۱۲/۴۱ (۵/۴)	۷۷/۸۰ (۱۲/۶)	۶۱۳۴ (۱۵۹۲)	۱۷/۷۰ (۲/۹)	۱/۴۲ (۰/۱۷)
	آب معمولی- پرس گرم (WHP)	۲۵	۰/۷۶ (۰/۰۲)	۸۱/۱۰ (۱۳/۲۲)	۲۷/۳۲ (۵/۹۸)	۱۰۲/۳۳ (۳/۵۱)	۱۴۱۵۷ (۱۰۵۴/۶۲)	۳۴/۸ (۱/۹۲)	۲/۹۳ (۰/۱۲)
		۵۰	۰/۸۳ (۰/۰۴)	۷۴/۰۲ (۲۲/۵۳)	۴۷/۶۰ (۱۵/۴۸)	۶۴/۵۵ (۱۶/۰۷)	۱۰۷۳۰ (۱۹۶۶/۶۱)	۲۰/۵۰ (۱/۸۱)	۲/۴۵ (۰/۱۹)
	بخارآب - پرس سرد (SCP)	۲۵	۰/۹۳ (۰/۰۶)	۵۳/۵۲ (۱۰/۶۴)	۴۲/۵۰ (۱۴/۷۳)	۹۶/۸۰ (۱۱/۴۵)	۱۲۴۸۰ (۸۵۱/۵۸)	۲۵/۴ (۴/۷۲)	۲/۵۵ (۰/۸۳)
		۵۰	۰/۹۸ (۰/۰۶)	۷۲/۳۰ (۲۲)	۴۸/۸۰ (۱۶/۰۶)	۸۵/۲۵ (۱۱/۹۳)	۱۰۹۰۷ (۵۲۵/۰۲)	۳۷ (۵/۷۴)	۲/۳۰ (۰/۶۳)

اعداد داخل پرانتز انحراف معیار می‌باشند

جدول۳- تجزیه واریانس اثر مستقل و متقابل عوامل متغیر بر خواص فیزیکی چوب‌های پالونیا و صنوبر پیش‌تیمار و فشرده‌شده

منابع تغییرات	D_{12}		WA(96-h)		TS(96-h)	
	df	MS	df	MS	df	MS
WSP	۱	۰/۰۶۲**	۱	۴۵۴۷/۸۰**	۱	۱۲۱۳/۳۳ ns
TT	۱	۰/۰۸۸**	۱	۳۹۷۴/۵۱**	۱	۲۷۸۷/۸۵**
CP	۱	۰/۰۲۹**	۱	۴۶۰/۹۰ ns	۱	۳۶۱۷/۳۰**
WSP × TT	۱	۰/۰۰۸**	۱	۱۵۱/۵۱ ns	۱	۵۹۹/۱۸ ns
WSP × CP	۱	۰/۰۰۱**	۱	۱/۴۴ ns	۱	۱۹۸/۲۵ ns
TT × CP	۱	۰/۰۱۵**	۱	۱۳۸۵/۰۳*	۱	۳۸۱/۷۷ ns
WSP × TT × CP	۱	۰/۰۰۸**	۱	۵۷/۲۴ ns	۱	۱۹۱۳/۵۷*
خطا	۴۰	۱/۱۳۷×۱۰$^{-۵}$	۱۶	۲۹۱/۹۵	۱۶	۳۱۸/۶۴
کل	۴۸	-	۲۴	-	۲۴	-

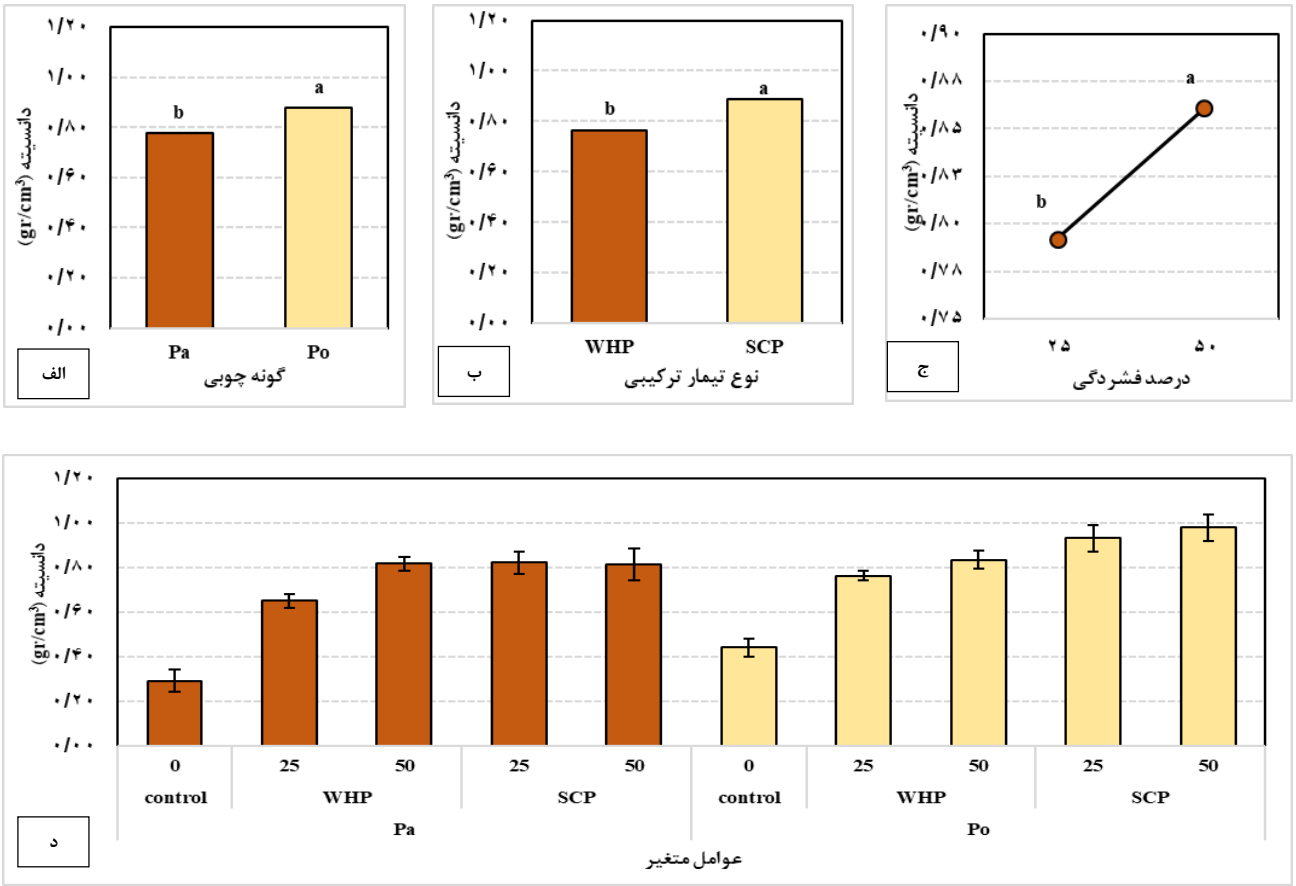
(**: معنی‌داری در سطح ۱ درصد)، (*: معنی‌داری در سطح ۵ درصد)، (ns: غیر معنی‌دار)، (MS: میانگین مربعات)، (df: درجه آزادی)
(گونه چوبی:WSP)، (نوع تیمار:TT)، (درصد فشردگی: CP)

دانسیته (D_{12})

در شکل ۳ (الف- د)، اثر مستقل و متقابل عوامل متغیر بر دانسیته چوب پالونیا و صنوبر پیش‌تیمار و فشرده‌شده به همراه گروه‌بندی میانگین‌ها و انحراف‌معیار داده‌ها ارائه‌شده است. نتایج نشان می‌دهند که دانسیته چوب صنوبر قبل و بعد از فشردگی بیشتر از چوب پالونیا

می‌باشد. پس از پیش‌تیمار و فشردگی، دانسیته چوب صنوبر ۱۶۵ درصد و دانسیته چوب پالونیا ۹۷ درصد نسبت به نمونه شاهد خود افزایش‌یافته است (شکل ۳- الف). فشردگی بیشتر در چوب پالونیا می‌تواند ناشی از خلل و فرج زیاد و حجم کم ماده چوبی آن باشد. اصلاح نمونه‌ها با بخارآب- پرس سرد در مقایسه با اصلاح با آب- پرس گرم، در حدود ۱۶ درصد دانسیته بالاتری را نتیجه داد (شکل۳- ب). بر این اساس می‌توان گفت پیش‌تیمار با بخارآب نسبت به آب سرد منجر به نرم‌شدن بهتر بافت چوب و فشردگی بیشتر در پرس شده است. نفوذ بیشتر بخار نسبت به آب به درون دیواره سلولی و شکل‌پذیری چوب همراه با افزایش فشردگی، موجب بهبود و تسریع فرایند فشرده‌سازی می‌شود. همچنین اثر افزایش دما در بهبود فشردگی بافت چوب در پیش‌تیمار با بخارآب در مقایسه با پرس گرم بیشتر می‌باشد. لازم به ذکر است با افزایش مقدار فشردگی از ۲۵ درصد به ۵۰ درصد، دانسیته نمونه-های چوبی ۹ درصد افزایش‌یافته است (شکل۳- ج).

نتایج مربوط به اثر متقابل عوامل متغیر بر دانسیته در شکل ۳- د آمده است. بر طبق نتایج به‌دست‌آمده، در نمونه‌های چوبی اصلاح‌شده، کمترین و بیشترین مقدار دانسیته به ترتیب مربوط به تیمارهای PoSCP50 (۰/۹۸gr/cm^3) و PaWHP25 (۰/۶۵ gr/cm^3) می‌باشند. رطوبت به همراه حرارت عوامل اثرگذار بر قابلیت انعطاف-پذیری بافت چوب و فشردگی آن می‌باشند. با اعمال حرارت، لیگنین نرم شده و می‌توان چوب را بدون صدمه به دیواره سلول‌ها و ساختار آن، فشرده نمود و با حضور رطوبت هدایت حرارتی چوب بیشتر شده و سرعت انتقال حرارت در آن افزایش‌یافته و موجب بهبود کیفیت چوب فشرده‌شده می‌گردد [۱۴]. اصولاً فشرده‌سازی با از بین بردن منافذ موجود در چوب، سبب افزایش دانسیته می-گردد. تحقیقات انجام‌شده در این رابطه مؤید این مطلب می‌باشد [۲۰ و ۲۱].

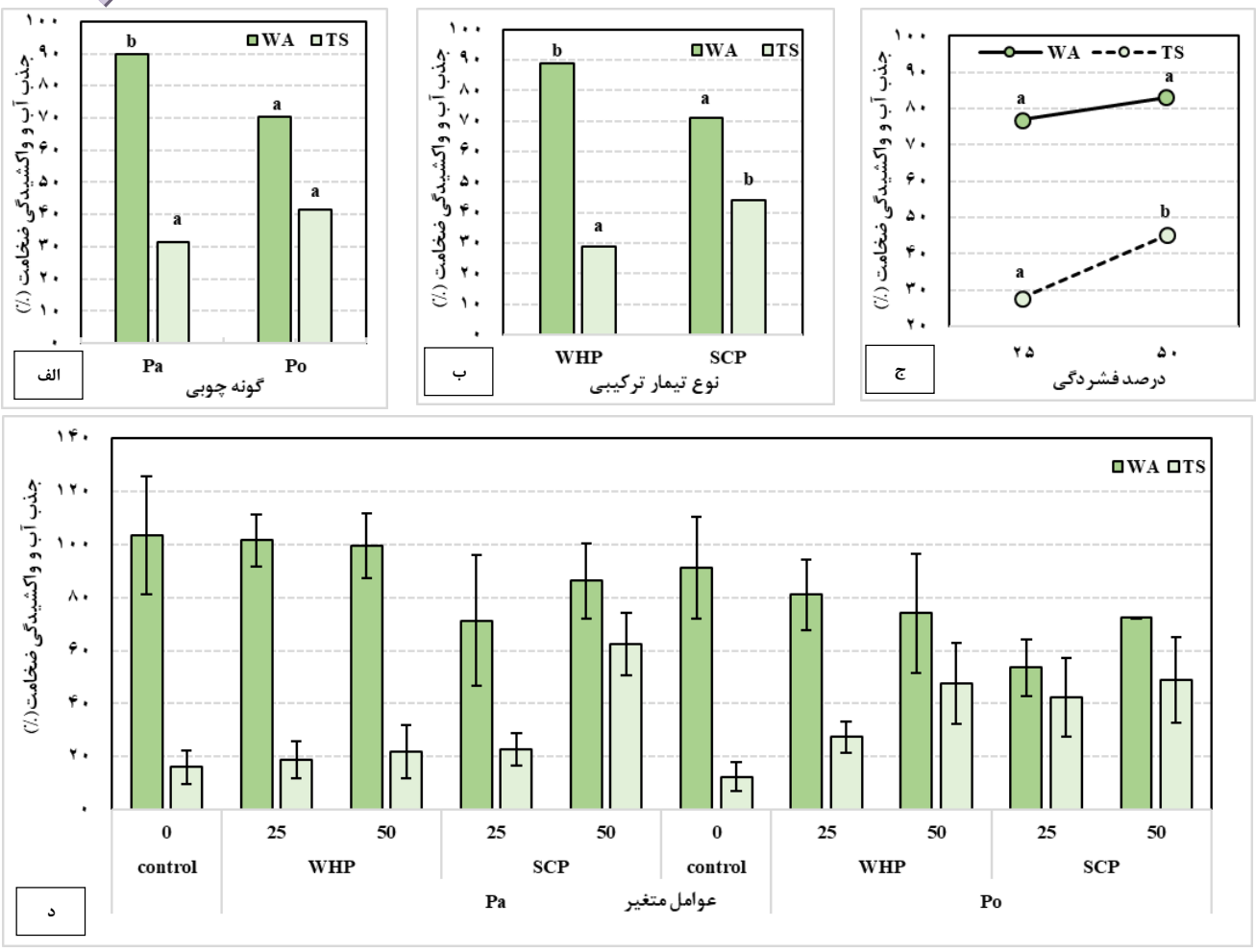


شکل۳ - اثر مستقل و متقابل عوامل متغیر بر دانسیته چوب پالونیا و صنوبر پیش‌تیمار و فشرده‌شده

جذب آب و واکشیدگی ضخامت (پس از ۹۶ ساعت غوطه‌وری در آب)

اثر مستقل و متقابل عوامل متغیر بر جذب آب و واکشیدگی ضخامت چوب پالونیا و صنوبر پیش‌تیمار و فشرده‌شده پس از ۹۶ ساعت غوطه‌وری در آب به همراه گروه‌بندی میانگین‌ها و انحراف معیار داده‌ها در شکل ۴ (الف- د) ارائه‌شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهند که چوب پالونیا در مقایسه با چوب صنوبر از جذب آب بیشتر و واکشیدگی ضخامت کمتری برخوردار می‌باشد (شکل ۵- الف). جذب آب بالای چوب پالونیا را می‌توان به حفرات سلولی درشت و میزان بیشتر خلل و فرج آن نسبت داد که آب زیادی را می‌توانند طی فرایند غوطه‌وری در خود ذخیره نمایند. در چوب صنوبر به دلیل دانسیته بالا و همچنین حجم زیاد ماده چوبی، واکشیدگی ضخامت بیشتری مشاهده شد. نتایج حاصل از بررسی اثر مستقل نوع تیمار ترکیبی نشان می‌دهد که کمترین مقدار جذب - آب (۷۱٪) و واکشیدگی ضخامت (۲۹٪) به ترتیب مربوط به تیمار بخارآب- پرس گرم و تیمار آب سرد- پرس گرم می‌باشد (شکل ۴- ب). تیمار بخار، با حذف گروه‌های استیل همی‌سلولز و تولید اسید استیک سبب هیدرولیز همی‌سلولزها و کاهش گروه‌های هیدروکسیل می‌گردد که می‌تواند منجر به کاهش جذب آب نمونه‌های چوبی گردد [۱۶، ۲۲، ۲۳].

با توجه به اینکه در حجم ثابتی از ماده چوبی، چوب-های اصلاح‌شده شده با بخارآب-پرس سرد از فشردگی بیشتر و به‌تبع آن از دانسیته بالاتری (شکل ۳- ب) برخوردار بوده که این مسئله می‌تواند واکشیدگی ضخامت بیشتری را به همراه داشته باشد. مطابق با شکل ۴- ج می‌توان به این نکته پی برد که با افزایش درصد فشردگی جذب آب و واکشیدگی ضخامت روند افزایشی خواهند داشت (شکل ۴-ج). مقدار واکشیدگی ضخامت متأثر از جذب رطوبت و بازگشت ضخامت دیواره‌ها در طولانی‌مدت هست و از سوی دیگر درصد فشردگی بیشتر، توان بیشتری برای جذب رطوبت و واکشیدگی ضخامت ایجاد می‌نماید. معمولاً برگشت ضخامت بیشتر در درصد بالاتر میزان فشردگی دیده می‌شود. ضمن اینکه کاهش واکشیدگی به نقش تیمارهای گرمایی در تشکیل پیوندهای عرضی پلیمرهای دیواره سلولی و همچنین تغییر ماهیت شیمیایی الیاف مرتبط می‌باشد [۲۴]. با توجه به نتایج اثر متقابل عوامل متغیر ارائه‌شده در شکل ۴- د مشاهده می‌شود، در نمونه‌های اصلاح‌شده کمترین و بیشترین مقادیر جذب آب مربوط به تیمارهای PoSCP25 (۵۳/۵۲٪) و PaWHP25 (۱۰۱/۶٪) می‌باشند. کمترین مقدار واکشیدگی ضخامت در تیمار PaWHP25 (۱۸/۷۶٪) دیده شد و همچنین بیشترین مقدار واکشیدگی ضخامت متعلق به تیمار PaSCP50 (۶۲/۵٪) بود.



شکل۴ - اثر مستقل و متقابل عوامل متغیر بر جذب آب و واکشیدگی ضخامت چوب پالونیا و صنوبر پیش‌تیمار و فشرده‌شده

خواص مکانیکی

در جدول ۴، نتایج تجزیه واریانس اثر مستقل و متقابل عوامل متغیر بر خواص مکانیکی چوب‌های پالونیا و صنوبر پیش‌تیمار و فشرده‌شده ارائه‌شده است. نتایج نشان می‌دهند به‌جز اثر مستقل درصد فشردگی بر MOE و اثر نوع تیمار و درصد فشردگی بر سختی، اثر مستقل بقیه عوامل متغیر بر خواص مکانیکی معنی‌دار می‌باشند. نتایج تجزیه واریانس حاکی از آن است که تنها اثر متقابل (درصد فشردگی × نوع تیمار) بر MOR و اثر متقابل (نوع تیمار × گونه چوبی) بر سختی معنی‌دار شده است. لازم به ذکر است، اثر متقابل (درصد فشردگی × نوع تیمار × نوع گونه چوبی) بر MOE و اثر متقابل (نوع تیمار × نوع گونه چوبی) بر مقاومت به ضربه معنی‌دار نشده است.

جدول۴- تجزیه واریانس اثر مستقل و متقابل عوامل متغیر بر خواص مکانیکی چوب‌های پالونیا و صنوبر پیش‌تیمار و فشرده‌شده

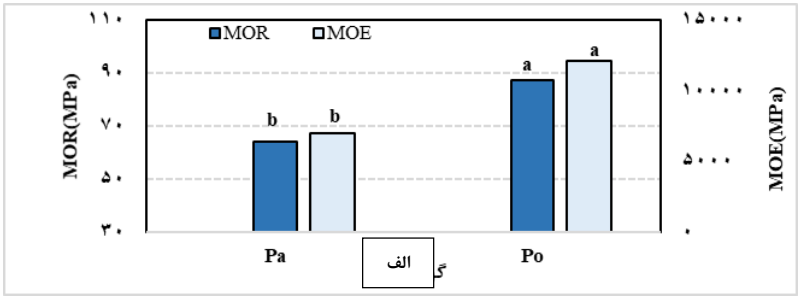
منابع تغییرات	MOR		MOE		IS		H	
	df	MS	df	MS	df	MS	df	MS
WSP	۱	۳۲۴۴/۳۰**	۱	۱۵۴۲۸۵۱۷۵/۰۴**	۱	۱۷/۰۳**	۱	۲/۴۰**
TT	۱	۱۱۱۰/۸۴*	۱	۱۱۳۵۶۱۲۸/۳۷**	۱	۰/۹۹*	۱	۰/۱۳ns
CP	۱	۳۰۶۶/۳۶**	۱	۱۳۹۰۸۰/۳۷ns	۱	۱/۱۲**	۱	۰/۳۹ns
TT × WSP	۱	۲۱۷/۲۰ns	۱	۲۷۱۱۲۸۷۸/۳۷**	۱	۰/۰۲ns	۱	۱/۳۸*
CP × WSP	۱	۲۵/۵۴ns	۱	۳۳۰۸۰۹۷۲/۰۴**	۱	۲/۲۵**	۱	۰/۲۵ns
CP × TT	۱	۱۱۷۸/۲۴*	۱	۱۳۵۱۳۵۰۳/۳۷**	۱	۸/۰۱**	۱	۰/۸۰ns
CP × TT × WSP	۱	۴/۷۵ns	۱	۱۹۷۷۴۳۰/۰۴ns	۱	۱/۶۴**	۱	۰/۲۸ns
خطا	۱۶	۱۶۷/۲۹	۱۶	۱۱۸۷۲۲۲/۲۰	۳۲	۰/۱۴	۳۲	۰/۲۱
کل	۲۴	-	۲۴	-	۴۰	-	۴۰	-

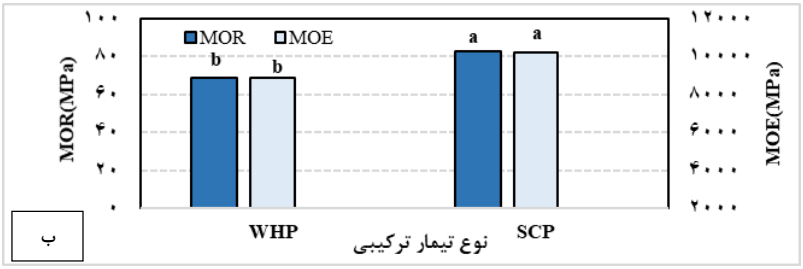
(**: معنی‌داری در سطح ۱ درصد)، (*: معنی‌داری در سطح ۵ درصد)، (ns: غیر معنی‌دار)، (MS: میانگین مربعات)، (df: درجه آزادی)
(گونه چوبی:WSP)، (نوع تیمار:TT)، (درصد فشردگی: CP)

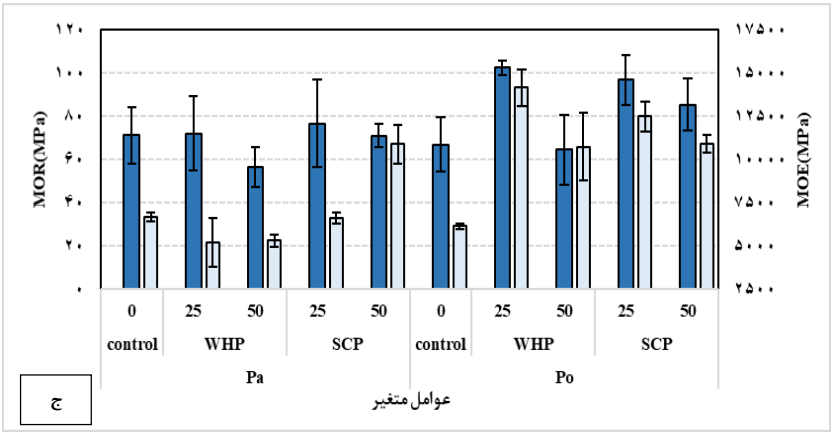
مدول گسیختگی (MOR) و مدول الاستیسیته خمشی (MOE)

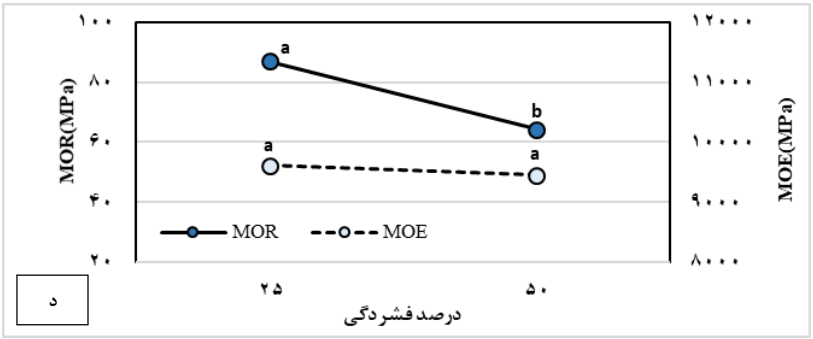
اثر مستقل و متقابل عوامل متغیر بر MOR و MOE چوب پالونیا و صنوبر پیش‌تیمار و فشرده‌شده به همراه گروه‌بندی میانگین‌ها و انحراف‌معیار داده‌ها در شکل ۵ (الف-د) نشان داده‌شده است. مطابق با شکل ۵-الف، MOR و MOE در گونه چوبی صنوبر بیشتر از چوب پالونیا می‌باشد. این افزایش می‌تواند ناشی از دانسیته بالای چوب صنوبر در مقایسه با دانسیته چوب پالونیا باشد، زیرا با افزایش دانسیته چوب، مقاومت خمشی افزایش می‌یابد. بعد از پیش‌تیمار و فشردگی، MOR چوب صنوبر ۳۷/۵ درصد نسبت به نمونه شاهد خود افزایش‌یافته، درصورتی‌که دانسیته چوب پالونیا ۱۰ درصد نسبت به نمونه شاهد خود کاهش‌یافته است. مقدار MOE چوب صنوبر و پالونیای فشرده‌شده نسبت به نمونه شاهد خود به ترتیب ۹۶٪ و ۴/۷۵٪ روند افزایشی داشته است. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن است که MOR و MOE در چوب‌های تیمارشده با استفاده از بخارآب و فشرده‌شده در پرس سرد به ترتیب در حدود ۲۰٪ و ۱۶٪ بیشتر از چوب-های اصلاح‌شده با استفاده از آب-پرس گرم می‌باشد (شکل ۵-ب). این افزایش می‌تواند ناشی از افزایش دانسیته چوب‌های اصلاح‌شده با استفاده از بخارآب- پرس سرد باشد (شکل۳-ب). البته افزایش MOR و MOE نمونه‌ها متناسب با افزایش دانسیته نمی‌باشد و این موضوع می‌تواند ناشی از تخریب سلول‌ها طی فرایند فشرده‌سازی بخصوص در روش آب- پرس‌گرم باشد. بر اساس شکل ۵-ج، با افزایش مقدار فشردگی از ۲۵ به ۵۰ درصد، MOR و MOE نمونه‌ها روند کاهشی داشته است. به‌طورکلی، با فشرده کردن چوب و کاهش حجم نمونه‌ها، دانسیته و مقاومت خمشی افزایش می‌یابد، اما افزایش بیش‌ازحد مقدار فشردگی موجب شکست و تخریب دیواره‌های سلولی شده و با ایجاد ترک‌ها، شکاف‌ها و شکست‌های کوچک در ساختار چوب می‌تواند منجر به کاهش مقاومت خمشی و مدول‌الاستیسیته گردد [۲۵].

بر طبق نتایج به‌دست‌آمده از اثر متقابل عوامل متغیر، در نمونه‌های اصلاح‌شده تیمار PaWHP50 (۵۶/۴۵ مگا پاسکال) و PoWHP25 (۱۰۲/۳۳ مگا پاسکال) به ترتیب کمترین و بیشترین MOR را به خود اختصاص داده‌اند. کمترین مقدار MOE در تیمار PaWHP25 (۳۶/۴۵ مگا پاسکال) و بیشترین مقدار در تیمار PoWHP25 (۱۰۲/۳۳ مگا پاسکال) مشاهده شد.





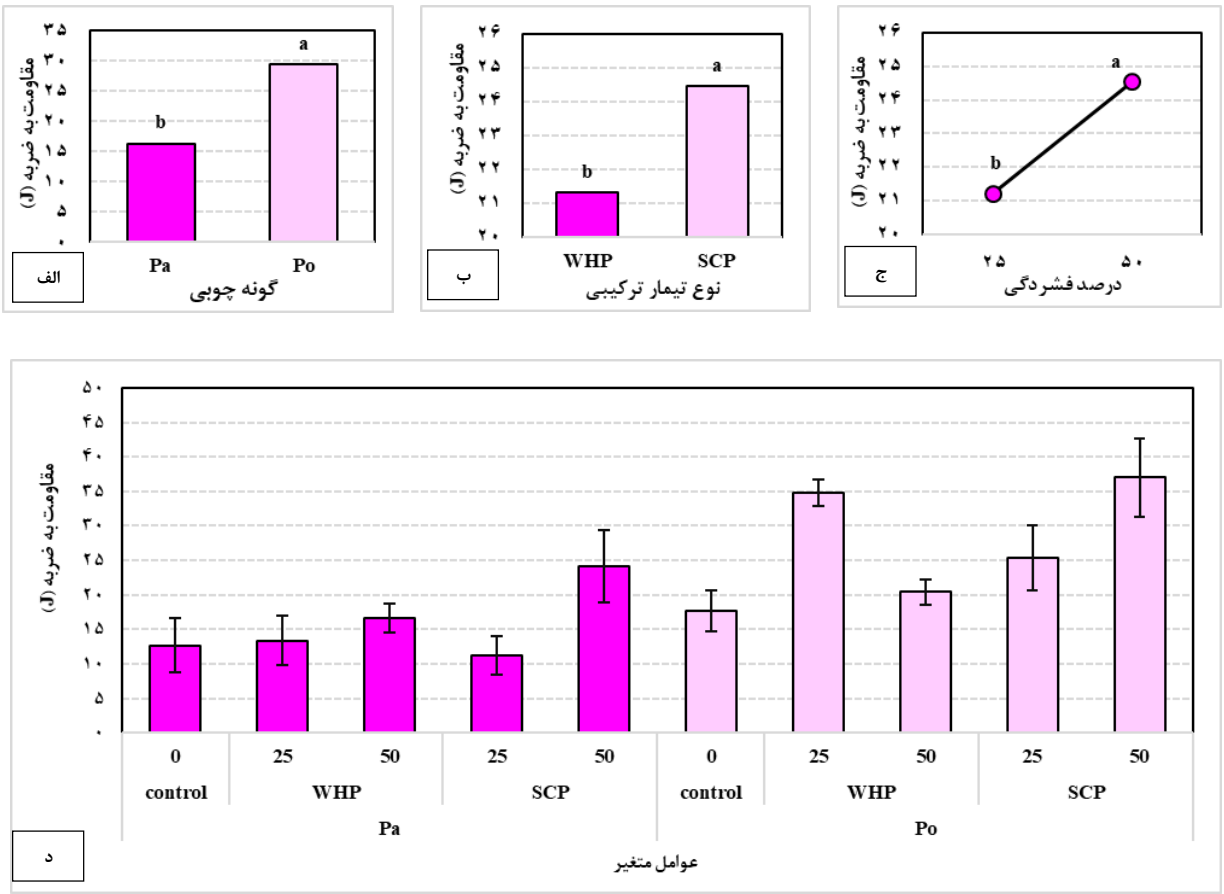




شکل۵ - اثر مستقل عوامل متغیر بر مدول‌گسیختگی و مدول‌الاستیسیته خمشی چوب پالونیا و صنوبر پیش‌تیمار و فشرده‌شده

مقاومت به ضربه

در شکل ۶ (الف-د) اثر مستقل و متقابل عوامل متغیر بر مقاومت به ضربه چوب پالونیا و صنوبر پیش‌تیمار و فشرده‌شده به همراه گروه‌بندی میانگین‌ها و انحراف‌معیار داده‌ها نشان داده‌شده است. نتایج نشان می‌دهند چوب صنوبر دارای مقاومت به ضربه بیشتری نسبت به چوب پالونیا می‌باشد. لازم به ذکر است پس از پیش‌تیمار و فشردگی، مقاومت به ضربه چوب صنوبر ۶۶ درصد و مقاومت به ضربه چوب پالونیا ۲۹ درصد نسبت به نمونه شاهد خود افزایش‌یافته است (شکل ۶- الف). بررسی اثر نوع تیمار ترکیبی در شکل ۶ -ب نشان می‌دهد که نمونه-های اصلاح‌شده با استفاده از بخارآب- پرس سرد نسبت به نمونه‌های اصلاح‌شده به روش آب معمولی- پرس گرم از ۱۵ درصد مقاومت به ضربه بیشتری برخوردار می‌باشند. تشکیل پیوندهای عرضی لیگنین براثر واکنش‌های تراکمی طی فرایند تیمار گرم آبی می‌تواند از دلایل افزایش مقاومت به ضربه باشد. این پیوندها می‌توانند سبب ایجاد ساختاری یکنواخت و یکپارچه در دیواره‌های سلولی گشته و در هنگام وارد شدن نیروهای ناشی از ضربه، به توزیع یکنواخت انرژی ضربه کمک نمایند [۲۶ و ۲۷]. با افزایش درصد فشردگی مقاومت به ضربه نمونه‌ها افزایشی در حدود ۱۶ درصد را نشان داده است (شکل ۶-ج). بر طبق نتایج به‌دست‌آمده از اثر متقابل عوامل متغیر که در شکل ۶-د آمده است، تیمار PaSCP25 (۱۱/۲ ژول) و PoSCP50 (۳۷ ژول) به ترتیب کمترین و بیشترین مقاومت به ضربه را در نمونه‌های اصلاح‌شده به خود اختصاص داده‌اند.



شکل۶ - اثر مستقل و متقابل عوامل متغیر بر مقاومت به ضربه چوب پالونیا و صنوبر پیش‌تیمار و فشرده‌شده

سختی

در شکل ۷ (الف- د)، اثر مستقل و متقابل عوامل متغیر بر سختی چوب پالونیا و صنوبر پیش‌تیمار و فشرده-شده به همراه گروه‌بندی میانگین‌ها و انحراف‌معیار داده‌ها ارائه‌شده است. شکل ۷- الف نشان می‌دهد که سختی چوب صنوبر قبل و بعد از اصلاح بیشتر از چوب پالونیا می‌باشد. پس از پیش‌تیمار و فشردگی، سختی چوب صنوبر۸۰ درصد و سختی چوب پالونیا ۱۱۵ درصد نسبت به نمونه شاهد خود افزایش‌یافته است. سختی چوب به‌طور تقریبی با دانسیته آن متناسب می‌باشد [۲۸]. دانسیته ویژه بالای چوب صنوبر از یک‌سو و همچنین افزایش دانسیته ناشی از فشردگی بافت چوب صنوبر در سطوح می‌تواند از دلایل سختی بالای آن باشد. نتایج نشان می-دهند، اصلاح نمونه‌ها با روش بخارآب - پرس سرد در مقایسه با روش آب معمولی- پرس گرم توانسته است به مقدار جزئی سختی را افزایش دهد که می‌تواند به افزایش دانسیته حاصل از این روش اصلاحی نسبت داده شود (شکل ۷- ب). بر این اساس می‌توان گفت به دلیل نفوذ بهتر بخار به درون سلول‌های چوبی در مقایسه با آب سرد، نرم‌شدن بهتر بافت چوب و فشردگی بیشتر در پرس به-ویژه در لایه‌های سطحی اتفاق می‌افتد. همچنین در اصلاح گرم آبی چوب، افزایش سختی می‌تواند به دلیل فرآیندهای تراکمی در لیگنین و همی‌سلولز باشد، زیرا مولکول‌ها تجزیه‌شده و می‌توانند پیوندهای شیمیایی جدید ایجاد کنند [۲۷]. نتیجه این تحقیق با تحقیقات Rautkari و همکاران (۲۰۱۳) مطابقت دارد [۲۹]. لازم به ذکر است با افزایش مقدار فشردگی از ۲۵ درصد به ۵۰ درصد، کاهش جزئی در سختی نمونه‌های چوبی مشاهده شد (شکل۷- ج) که می‌تواند ناشی از شکست ساختار دیواره سلولی چوب در حین فشرده‌سازی باشد [۸]. نتایج مربوط به اثر متقابل عوامل متغیر بر سختی در شکل ۷- د آمده است. بر طبق نتایج به‌دست‌آمده، کمترین و بیشترین مقدار سختی به ترتیب مربوط به تیمارهای PaWHP50 (۱/۶ kN) و PoWHP25 (۲/۹۳ kN) در نمونه‌های اصلاح-شده می‌باشند.

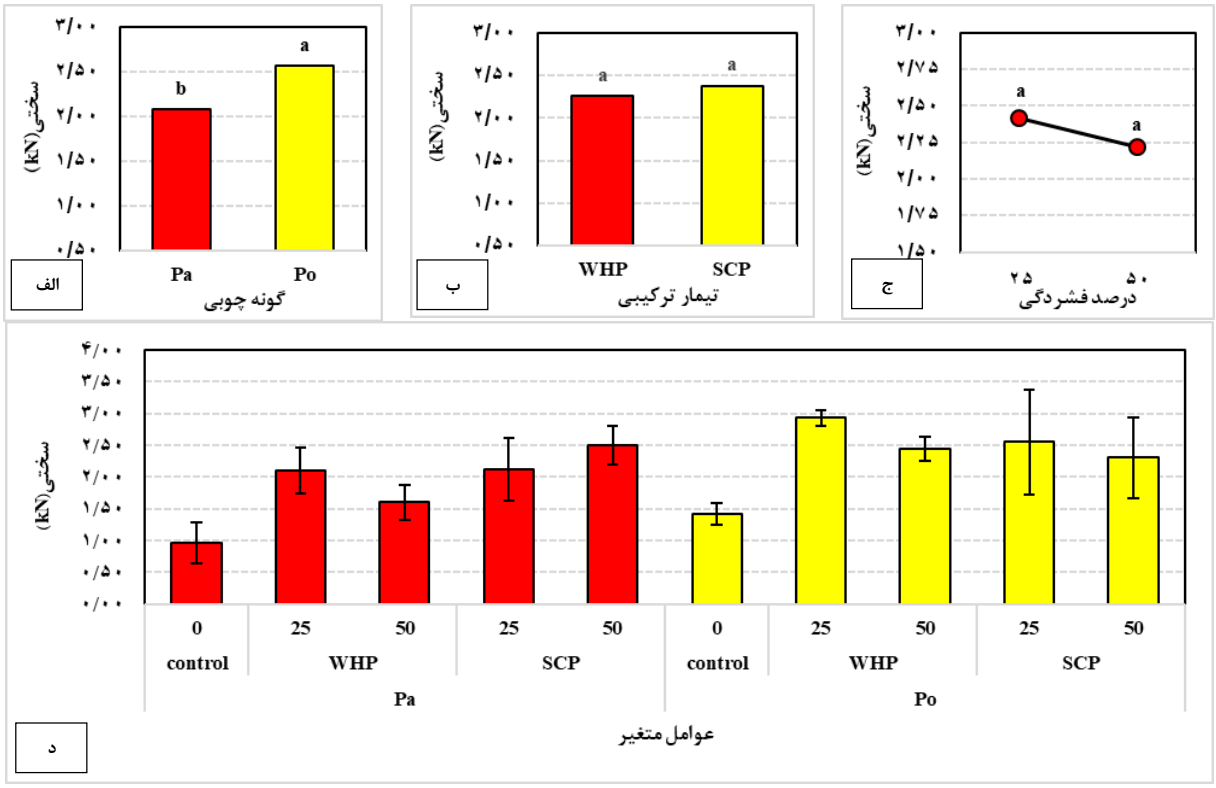
نتیجه‌گیری

این پژوهش برای بررسی و مقایسه ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی دو گونه پالونیا و صنوبر قبل و بعد از انجام دو فرآیند اصلاح ترکیبی پیش تیمار آب-پرس‌گرم و بخارآب-پرس سرد انجام شد. نتایج این بررسی نشان داد که چوب صنوبر به دلیل داشتن دانسیته بالاتر از خواص فیزیکی و مکانیکی مطلوب‌تری نسبت به گونه پالونیا برخوردار می-باشد. به‌جز واکشیدگی ضخامت، خواص فیزیکی مطلوب و مقاومت‌های مکانیکی بالاتر در نمونه‌های چوبی اصلاح‌شده به روش بخارآب-پرس سرد به دست آمد. تأثیرگذاری بیشتر فرآیند بخارآب-پرس سرد نسبت به فرآیند اصلاح ترکیبی آب معمولی- پرس‌گرم بر روی خواص کاربردی ارزیابی‌شده، به‌خوبی مشاهده شد. مقادیر جذب آب و واکشیدگی ضخامت نمونه‌های چوبی با افزایش درصد فشردگی افزایش یافت. با افزایش درصد فشردگی و به همراه آن افزایش دانسیته نمونه‌های چوبی، به غیر از مقاومت به ضربه بقیه خواص مکانیکی روند کاهشی داشتند. بررسی میکروسکوپی ساختار چوب‌های اصلاح-شده و اندازه‌گیری ویژگی‌هایی همچون گرادیان دانسیته، برگشت ضخامت فنری، زاویه تماس (تر شوندگی)، زبری سطح جهت تحلیل بهتر نتایج و همچنین استفاده از گونه‌های اصلاح‌شده در ساخت کامپوزیت‌های ساختمانی بر پایه چوب ماسیو مانند گلولام[2] تیرلایه‌ای متقاطع (CLT)[3] تیرلایه‌ای متصل‌شده با میخ (NLT)[4] و تیرلایه-ای متصل‌شده با پین چوبی (DLT)[5] می‌توانند از موضوعات قابل‌تأمل برای تحقیقات بعدی باشند.

سپاسگزاری

این تحقیق در قالب رساله دکتری با حمایت مالی معاونت علمی دانشکده منابع طبیعی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران با شماره گرنت ۳۰۵۴۱/۶/۴ انجام گرفته است.

2 Glulam
3 Cross Laminated Timber
4 Nail Laminated Timber
5 Dowel Laminated Timber



شکل۷ - اثر مستقل و متقابل عوامل متغیر بر سختی چوب پالونیا و صنوبر پیش‌تیمار و فشرده‌شده

منابع

[1] Ghasemi, R., Asadi, F., and Torabi, A., 2009. Evaluation of height and diameter growth of indigenous and exotic poplar clones in one growing season. Iranian Journal of Forest, 1(4): 333-343.

[2] Bahrinejad, A., and Khazaeian, A., 2013. Industrial applications of fast-growing species of poplar and Paulownia wood. In: proceedings second national conference on sustainable agricultural development and healthy environment. Sept.12 Hamadan. Iran, p 1-9.

[3] Hill, C.A., 2007. Wood modification: chemical, thermal and other processes. John Wiley & Sons, (Vol. 5) 264 p.

[4] 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.

[5] Gholamiyan, H. and Gholampoor, B., 2020. Investigation of the effect of palm texture densification on surface properties and coating quality with water-based and solvent-based coatings for use in furniture. Iranian Journal of Wood and Paper Industries, 11(3): 419-431.

[6] Sekalu, M. and Khazaeian, A., 2012. The effect of chemical modification with phenol formaldehyde and densification on mechanical properties of Paulownia Wood. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 3(1): 13-28 (In Persian).

[7] Madhoushi, M., Grey, M., Tabarsa, T., and Rafighi, A., 2012. Nail and Screw Withdrawal Strength, MOE and MOR in Densified Poplar Wood. Journal of Wood & Forest Science and Technology, 18(4): 45-54.

[8] Laine, K., Rautkari, L., and Hughes, M., 2013. The effect of process parameters on the hardness of surface densified Scots pine solid wood. European Journal of Wood and Wood Products, 71(1): 13-16.

[9] Esteves, B., Duarte, S., and Nunes, L., 2017. Densification and Heat Treatment of Martine Pine Wood, wood research, 86(16): 373-388.

[10] Mohebby, B., Sharifinia-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, 15: 353-360.

[11] Kutnar, A., Kamke, F.A., Petrič, M. and Sernek, M., 2008. The influence of viscoelastic thermal compression on the chemistry and surface energetics of wood. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 329(1-2):82-86.

[12] Welzbacher, C.R., Wehsener, J., Rapp, A.O. and Haller, P., 2008. Thermo-Mechanical Densification Combined with Thermal Modification of Norway Spruce (Picea abies Karst) in Industrial Scale-Dimensional Stability and Durability Aspects. Holz Roh Werkst, 66: 39–49.

[13] Varga, D. and Van der Zee, M.E., 2008. Influence of Steaming on Selected Wood Properties of Four Hardwood Species. Holz RohWerkst, 66 (1): 11–18.

[14] Edalat, H.R., Tabarsa, T., and Reisi, M., 2008. Densification of Paulownia wood by using of hot-press. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 23(2):136-148.

[15] Liu, S., 2008. A kinetic Model on Autocatalytic Reactions in Woody Biomass Hydrolysis, J. Biobased Mater. Bio., 2: 135–147.

[16] Lam, P.S., 2011. Steam Explosion of Biomass to Produce Durable Pellet, Ph.D. Dissertation, The University of British Columbia, Vancouver, Canada.

[17] 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, J. Agric. Food. Chem, 57: 6830–6837.

[18] 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.

[19] 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.

[20] Boonstra, M. J., Rijsdijk, J. F., Sander, C., Kegel, E., Tjeerdsma, B., Militz, H., and Stevens, M., 2006. Microstructural and physical aspects of heat-treated wood: Part 2. Hardwoods. Maderas. Ciencia y tecnología, 8(3): 209-218.

[21] Mirzaei, G., Mohebby, B., & Tasooji, M., 2012. The effect of hydrothermal treatment on bond shear strength of beech wood. European Journal of Wood and Wood Products, 70(5): 705-709.

[22] Navi, P., and Girardet, F., 2000. Effects of thermo-hydro-mechanical treatment on the structure and properties of wood. Holzforschung, 54(3): 287-293.

[23] Navi, P., and Heger, F., 2004. Combined densification and thermo-hydro-mechanical processing of wood. MRS Bulletin, 29(5): 332-336.

[24] Boonstra, M.J., and Blomberg, J., 2007. Semi-isostatic densification of heat-treated Radiate pine. Wood Science Technology, 41(7): 607-617

[25] Hajihassani, R., Mohebbi, B. and Kazemi Najafi, S., 2020. The effect of hygro-thermo-mechanical modification on the applied properties of glulam made from poplar. Iranian Journal of Wood and Paper Industries, 11(2):241-253.

[26] 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.

[27] 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, 40: 549-561.

[28] Ebrahimi, G., 1997. strengths of wood and its elements analysis of wood-based composites panel warping. first Ed., Tehran University Publications, Tehran, 380 p. (In Persian).

[29] Rautkari, L., Laine, K., Kutnar, A., Medved, S. and Hughes, M., 2013. Hardness and density profile of surface densified and thermally modified Scots pine in relation to degree of densification. Journal of Materials Science, 48(6):2370-2375.

Comparative investigation of the effect of pretreatment type and densification conditions on physical and mechanical properties of paulownia and poplar woods

Abstract

Due to the lack of forest resources, the use of fast-growing wood species has been considered by designers and engineers. Low density and mechanical strength are the main challenges of using some of these wood species, especially in the manufacturing of construction products and their final properties. Using different methods such as hydrothermal and hygrothermal treatments combined with compaction techniques can be a solution to this problem. This study aimed to investigate the effect of pretreatment type and densification conditions on the physical and mechanical properties of paulownia (*Paulownia fortune*) and poplar (*Populus deltoides*) wood. For this purpose, pretreatment with water at 25˚C and compression in hot press at 160˚C, and also pretreatment with steam at 160˚C and compression in cold press at 60C˚ were used. Compression was performed at two levels of 25 and 50 percent for 20 minutes in a press with a pressure of 5MPa to reach a final thickness of 2cm. Then, the equilibration of the samples in the cold press was performed to reduce the spring back and reach the temperature and equilibrium moisture content. To investigate the physical and mechanical properties of the samples, tests including density, water absorption, and thickness swelling (after 96 hours of immersion in water), modulus of rupture, modulus of elasticity, impact strength, and hardness were performed. The results showed that the poplar wood has better physical and mechanical properties than the paulownia wood due to its higher density. Except for thickness swelling, desirable physical properties and higher mechanical strengths were obtained in wood samples modified by the steam-cold pressing method. The greater impact of the wood modification process by steam-cold pressing on the properties was well observed. Water absorption and thickness swelling values of wood samples increased with increasing compaction percentage. The mechanical properties of wood had shown a decreasing trend, with increasing compaction and consequently increasing the density of wood samples, except for impact resistance.

Keywords: Fast-growing species, Hygrothermal treatment, Densification, Physico-mechanical properties.

K. Rashedi[1]
P. Moradpour[2*]
H. Zarea Hosseinabadi[3]

[1] Ph. D Candidate, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

[2] Assistant Prof., Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

[3] Associate Prof., Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

Corresponding author:
pmoradpour@ut.ac.ir

Received: 2021/12/10
Accepted: 2022/01/20