

بررسی امکان بهبود ویژگی‌های مقاومتی چوب صنوبر با روش ترکیبی اصلاح گرمابی - مکانیکی (CHTM)

حوری شریف نیا^۱، بهبود محبی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد علوم چوب و کاغذ، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

در این پژوهش با ابداع شیوه‌ای جدید و ترکیب دو روش اصلاحی گرمابی (Hydrothermal) و مکانیکی (Mechanical) اقدام به اصلاح ویژگی‌های مکانیکی چوب صنوبر شد. بدین منظور نمونه‌هایی به ابعاد $50 \times 55 \times 50$ mm تهیه شدند و در رآکتور ویژه‌ای، با دماهای ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ درجه سلسیوس و به مدت ۳۰ دقیقه در درون آب تیمار شدند. پس از آن نمونه‌ها با پرس و تحت فشار ۸۰ بار و دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۰ دقیقه و با ضریب فشردگی ۶۰٪ فشرده شدند. چگالی، خصوصیات خمشی (مدول کشسانی و مدول گسیختگی) و مقاومت به ضربه نمونه‌های تیمار شده اندازه‌گیری شدند و با نمونه‌های تیمار نشده مقایسه شدند. نتایج به دست آمده نشان دادند که چگالی، مدول کشسانی و مقاومت به ضربه چوب صنوبر با افزایش دمای تیمار فزونی یافتند و بالاترین چگالی، مدول کشسانی و مقاومت به ضربه در دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس به دست آمد. افزایش دما تا ۱۲۰ درجه سلسیوس، مدول گسیختگی را بالا برد؛ ولی افزایش دما تا ۱۸۰ درجه سلسیوس، این مدول را تا حد چوب صنوبر تیمار نشده کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: تیمار ترکیبی گرمابی-مکانیکی، چگالی، خواص خمشی، مقاومت به ضربه

مقدمه

منابع جنگلی هر کشوری پشتوانه توسعه پایدار در سطوح مختلف کشاورزی، آب و خاک و تعادل زیست محیطی آن است و نابودی آن نابسامانی‌های بسیاری را به همراه دارد. از آن جایی که صنایع چوب و کاغذ کشورمان وابسته به منابع جنگلی است و افزایش جمعیت نیز تقاضای تولید فرآورده های بیش تر و جدیدتر را به همراه دارد و از سوی دیگر، کاهش روز افزون منابع چوبی محدودیت‌های زیادی را برای این صنعت ایجاد کرده است؛ رویکرد صنایع را به بهره برداری از منابع چوبی تندرویی مانند صنوبر باعث شده است. زیرا در کشورمان، گستره وسیع کشت این درختان (در حدود ۸۰۰ هزار هکتار) و میزان تولید سالانه آنها که با میزان تولید جنگل‌های صنعتی شمال ایران برابری می‌کند، قابلیت پاسخ‌گویی به بخش مهمی از نیاز صنایع را دارد؛ اما کیفیت پایین چوب صنوبر، دوام اندک آن در برابر عوامل مخرب زیستی و مقاومت‌های مکانیکی کم این چوب در مقایسه با دیگر گونه‌های چوبی مورد بهره برداری در صنعت، سبب محدودیت زیادی در کاربرد این چوب شده است؛ به ویژه در کارهایی که جنبه مقاومتی در آنها اهمیت زیادی دارد.

در این پژوهش ابتکاری بدین اندیشه توجه شد که ویژگی های فیزیکی و مکانیکی چوب صنوبر با ترکیب دو روش اصلاحی چوب؛ اعم از اصلاح گرمایی^۱ و مکانیکی^۲ بهینه شود تا قابلیت کاربرد این چوب در صنعت کشور فراهم شود؛ زیرا با اصلاح گرمایی می‌توان پس از تغییر ساختار شیمیایی و بسپاری چوب، ویژگی‌های فیزیکی، دوام زیستی و بسیاری از ویژگی‌های دیگر چوب را تغییر داد و ضمن نرم کردن چوب در طی تیمار گرمایی، قابلیت فشرده کردن چوب را افزایش داد تا به کمک روش اصلاح مکانیکی (فشرده سازی مکانیکی) نیز به بالا بردن مقاومت‌های چوب دست یابید.

بر پایه بررسی‌های انجام شده توسط پژوهشگران پیشین، مشخص شده است که اصلاح گرمایی سبب کاهش آب-دوستی و افزایش پایداری ابعاد چوب می‌شود [۱۹، ۲۰، ۱۴]

و مقاومت آن را در برابر عوامل مخرب قارچی زیاد می‌کند [۲۰]. با تیمار گرمایی بلورینگی سلولز افزایش پیدا می‌کند [۶، ۲۱، ۲۳] و مدول کشسانی نیز فزونی می‌یابد [۲۲].

درباره اصلاح مکانیکی چوب نیز باید گفت که نخستین تجربه فشرده سازی از دهه ۱۹۳۰ میلادی با فرآورده‌ای به نام لیگنوستون^۳ در آلمان آغاز شد [۱۱، ۱۲]. در آغاز فشرده چوب در جهت شعاعی، زیر پرس و بدون گرمادهی صورت گرفت و در مرحله بعد پرس در دو جهت شعاعی و مماسی و با اعمال گرمادهی انجام شد. این روش‌ها به دلیل وجود حافظه شکلی^۴ در چوب، با مشکل بازگشت فتری^۵ مواجه بودند؛ یعنی چوب پس از فشرده شدن به ضخامت اولیه باز می‌گشت. برای رفع این مشکل Ito و همکاران [۸، ۹] و Inoue و همکاران [۷] از فشرده چوب همگام با گرمادهی بهره‌گیری نمودند. این کار تأثیر زیادی در جلوگیری از بازگشت فتری داشت؛ ولی با گذشت زمانی طولانی‌تر، چوب تاحدی به ضخامت پیشین نزدیک می‌شد. Navi و Girardet [۱۵] با وارد کردن هم زمان بخار با فشرده سازی، راه مناسبی برای کاهش بازگشت ضخامت چوب یافتند؛ اما این روش مقاومت زیستی چوب فشرده را در برابر قارچ پوسیدگی سفید افزایش نمی‌داد [۱۷].

با توجه به این که روش‌های پیشین نیازمند دستگاه‌ها و ادواتی گران قیمت بودند و از سوی دیگر دوام زیستی نیز در برابر عوامل مخرب افزایش چندانی نمی‌یافت؛ این اندیشه نوین در ذهن شکل گرفت که در ضمن بهره‌گیری از شیوه‌ای ساده‌تر برای رسیدن به هدف‌هایی برتر، با در هم آمیختن شیوه‌های تیمار گرمایی و مکانیکی، و بهره‌گیری از اثرگذاری‌های هر دو روش بر روی چوب صنوبر بتوان به ساخت فرآورده‌ای جدید دست یافت. بر این پایه، روشی ابداع شد که اصلاح ترکیبی گرمایی- مکانیکی یا روش CHTM^۶ نامیده شد و به عنوان اختراع

³ Lignostone

⁴ Shape memory

⁵ Springback

⁶ Combined-Hydro-Thermo-Mechanical Modification (CHTM)

¹ Hydrothermal modification

² Mechanical modification

$$MOR = \frac{3P_{max}L}{2WB^2} \quad \text{رابطه ۱}$$

MOR = مدول گسیختگی (KN/mm²)،

P_{max} = بیشینه نیرو (KN)،

L = طول دهانه (mm)، W = پهناي نمونه (mm)،

B = ضخامت نمونه (mm)

$$MOE = \frac{L^3 (P_{40\%} - P_{10\%})}{4WB^3 (X_{40\%} - X_{10\%})} \quad \text{رابطه ۲}$$

MOE = مدول کشسانی ظاهری (KN/mm²)،

L = طول دهانه (mm)، W = پهناي نمونه (mm)،

B = ضخامت نمونه (mm)

X_{10,40%} = جا به جایی در نقاط ۱۰ و ۴۰ درصد بار بیشینه (mm)،

P_{10,40%} = بار در نقاط ۱۰ و ۴۰ درصد بار بیشینه (KN/mm²)

برای تعیین مقاومت به ضربه، نمونه‌هایی به ابعاد ۲۸×۲۸×۲ سانتی‌متر تهیه شدند و با بهره‌گیری از دستگاه آزمون ضربه نوع پاندولی Schenk این آزمون بر پایه استاندارد ASTM D-143 انجام شد. در هر یک از آزمون‌های تعیین مقاومت و برای هر یک از تیمارهای دمایی، ۵ نمونه به عنوان تکرار گزینش و مورد سنجش قرار گرفتند.

در اداره ثبت اختراعات با شماره ۴۹۲۱۲ ثبت گردید. در این جا نیز به بررسی اثر این روش در قالب اثر دمای تیمار بر تغییر چگالی، مقاومت‌های خمشی و ضربه چوب صنوبر پرداخته شده است.

۲- مواد و روش‌ها:

نمونه‌های چوب مورد نیاز از درختان سرپای صنوبر (*Populus deltoides* clone 79/51) با قطر حدود ۵۰ سانتی‌متر و رشد کرده در مرکز تحقیقات صفرابسته گیلان (آستانه اشرفیه) تهیه شدند. این نمونه‌ها از ۲ متر اول تنه و با ابعاد (L) × ۵۰۰ (t) × ۵۰ (r) میلی‌متر بریده شدند. از آن جایی که در طی تیمار گرمایی، آب ناقل گرما است؛ بلوک‌های چوبی تهیه شده به مدت ۲۴ ساعت در آب قرار گرفتند تا رطوبت یکسانی داشته باشند. سپس به درون رآکتور ویژه اصلاح چوب منتقل شدند. رآکتور یادشده تا ۲/۳ از آب ۱۰۰ درجه سلسیوس پر شده بود. بلوک‌های مورد نظر در دماهای ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ درجه سلسیوس و به مدت ۳۰ دقیقه تیمار شدند. در این مرحله، به طور عملی نمونه‌ها به روش گرمایی تیمار شدند. سپس نمونه‌ها به مدت ۲۰ دقیقه در پرس با فشار ۸۰ بار، در دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس و با ضریب فشردگی ۶۰٪ (تا ضخامت ۲ سانتی‌متر) فشرده شدند. فشرده کردن نمونه‌ها در جهت شعاعی (ضخامت) آنها انجام شد. نمونه‌های فشرده شده در اون و دمای ۲±۱۰۳ درجه سلسیوس خشک شدند تا به شرایط ثابت و قابل مقایسه‌ای برسند. نمونه‌های شاهد کلیه مراحل را همانند دیگر نمونه‌ها طی کردند و تنها تیمار گرمایی بر روی آنها اعمال نشد.

از نمونه‌های فشرده شده، بلوک‌های کوچکی به ابعاد ۲۸×۲۸×۲ سانتی‌متر تهیه و چگالی خشک آنها بر پایه استاندارد ASTM D 143-94 تعیین شد [۱]. برای اندازه‌گیری مقاومت به خمش ایستایی (استاتیک) نیز برپایه استاندارد ASTM D 143-94 نمونه‌هایی به ابعاد ۳۰×۲۸×۲ سانتی‌متر تهیه شدند و مقاومت آنها تعیین شد. مدول‌های گسیختگی و کشسانی نمونه‌ها با بهره‌گیری از رابطه‌های ۱ و ۲ محاسبه شدند.

نتایج

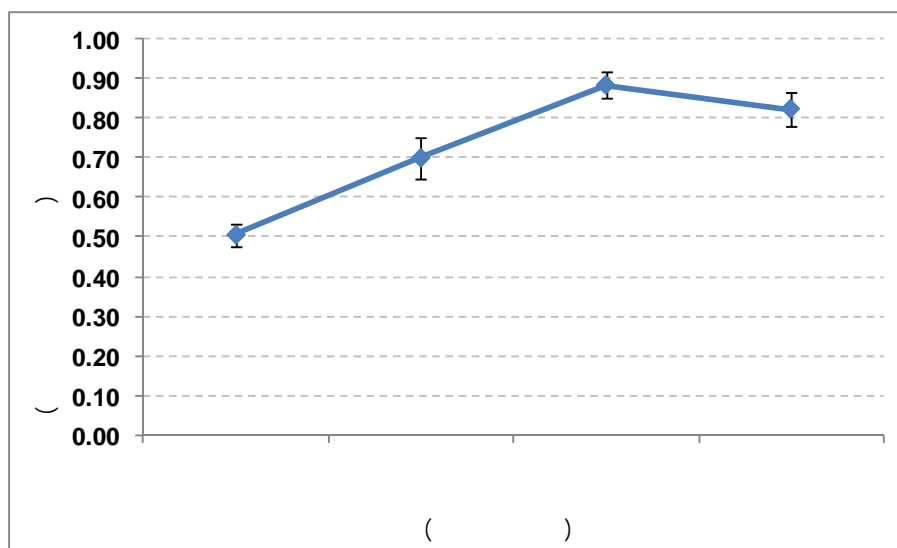
چگالی؛ یعنی ۱/۷۵ برابر چگالی خشک نمونه تیمار نشده دست یافته شد. گرچه با افزایش دما به ۱۸۰ درجه سلسیوس، کاهش اندکی روی داد؛ ولی کماکان چگالی آنها ۱/۶۳ برابر چگالی خشک نمونه های شاهد بود (جدول ۱).

نتایج بررسی چگالی خشک نمونه های فشرده شده به روش تیمار ترکیبی گرمایی-مکانیکی نشان دادند که با افزایش دمای تیمار، چگالی افزایش می یابد (شکل ۱)؛ به گونه ای که در دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس به بالاترین

جدول ۱- چگالی و مقاومت های اندازه گیری شده و میزان تغییرات ویژگی نسبت به چوب صنوبر

دما (°C)	چگالی خشک (g/cm ³)	مدول کشسانی (KN/mm ²)	مدول گسیختگی (KN/mm ²)	مقاومت به ضربه (KJ/m ²)
تیمار نشده	۰/۵۰	۹/۴۲	۰/۰۷	۳۰/۱۲
۱۲۰	(۱/۳۸*) ۰/۷۰	(۱/۳) ۱۲/۲۸	(۱/۴۸) ۰/۱۰	(۰/۹۲) ۲۷/۶۹
۱۵۰	(۱/۷۵) ۰/۸۸	(۱/۴۲) ۱۳/۴۰	(۱/۳۳) ۰/۰۹	(۳/۲) ۹۷/۲۲
۱۸۰	(۱/۶۳) ۰/۸۲	(۱/۴) ۱۳/۱۱	(۰/۹۶) ۰/۰۶	(۲/۰۳) ۶۷/۲۹

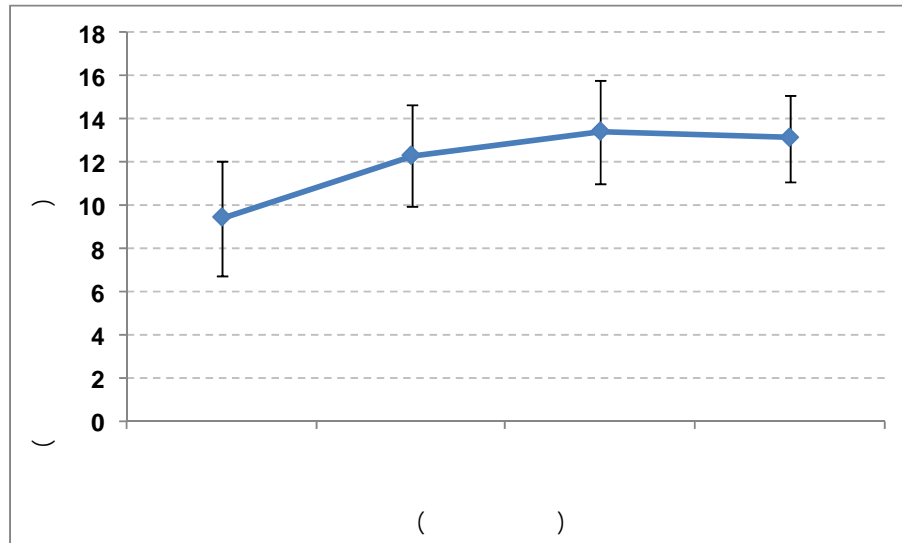
* ارقام درون پرانتز میزان افزایش یا کاهش ویژگی را نسبت به نمونه تیمار نشده نشان می دهند.



شکل ۱- اثر دمای تیمار بر تغییرات چگالی خشک

مدول کشسانی شد و سپس باعث کاهش جزئی آن در دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس شد. میزان افزایش مدول کشسانی نمونه‌های فشرده شده در دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس ۱/۴۲ برابر چوب صنوبر معمولی بود (جدول ۱)

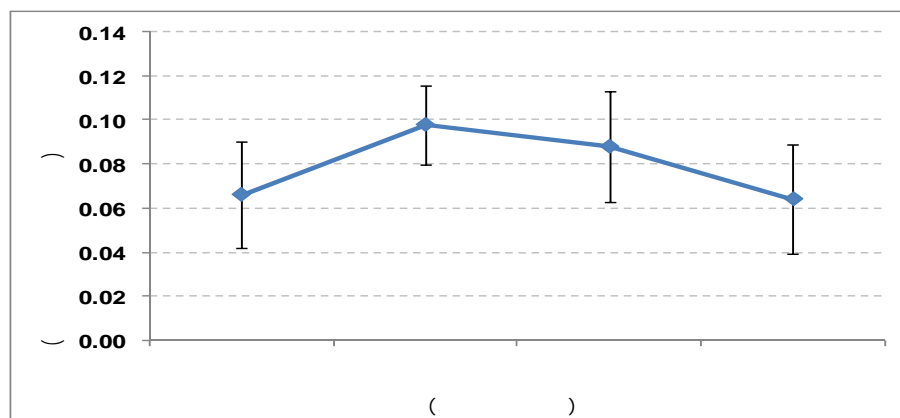
بررسی اثر تیمار ترکیبی گرمایی-مکانیکی بر مدول کشسانی نشان داد که افزایش دمای تیمار سبب بالا رفتن این ویژگی می‌شود (شکل ۲). نتایج بررسی نشان دادند که افزایش دما تا ۱۵۰ درجه سلسیوس سبب افزایش



شکل ۲- اثر دمای تیمار بر تغییرات مدول کشسانی

شده در دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس، تا ۱/۳۳ برابر افزایش مدول گسیختگی روی داد. با افزایش دما به ۱۸۰ درجه سلسیوس، افت قابل ملاحظه‌ای در مدول گسیختگی روی داد و این مدول به اندکی پایین‌تر از چوب تیمار نشده صنوبر (۰/۹۶ برابر) کاهش یافت (جدول ۱).

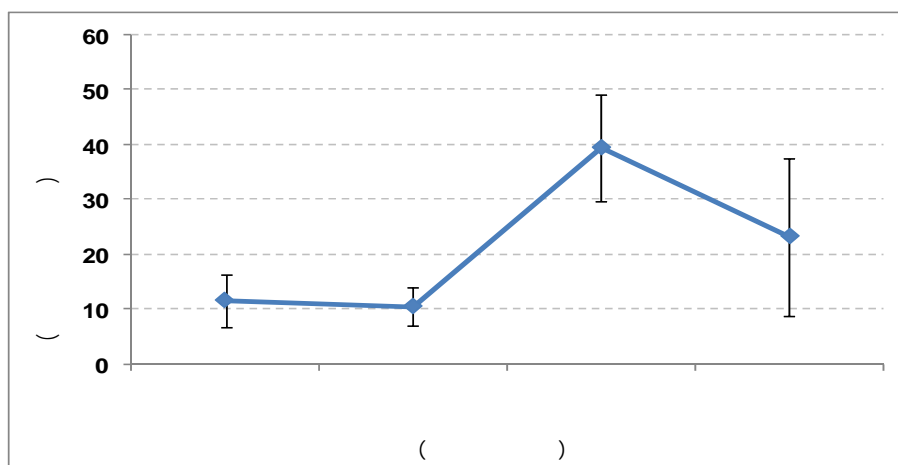
اندازه گیری مدول گسیختگی چوب صنوبر فشرده شده، نشان داد که افزایش دمای تیمار تا ۱۲۰ درجه سلسیوس افزایش ویژگی یادشده را به همراه داشت؛ به گونه‌ای که نمونه‌های تیمار شده در این دما بالاترین مدول گسیختگی را داشتند. میزان افزایش این ویژگی ۱/۴۸ برابر بود (جدول ۱)؛ در حالی که نمونه‌های صنوبر فشرده



شکل ۳- اثر دمای تیمار بر تغییر مدول گسیختگی

سلسیوس تغییری در مقاومت به ضربه ایجاد نکرد؛ ولی در دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس به بالاترین حد (۳/۲ برابر) افزایش دست یافته شد (جدول ۱).

با تغییر دما در طی تیمار ترکیبی گرمایی-مکانیکی، افزایش قابل توجهی در مقاومت به ضربه چوب فشرده شده صنوبر دیده شد (شکل ۴). افزایش دما تا ۱۲۰ درجه



شکل ۴- اثر دمای تیمار بر تغییرات مقاومت به ضربه

این پدیده، همراه شدن دمای پرس نیز بر انعطاف پذیری بیش تر الیاف تیمار شده که از قبل نرم شده بودند نیز کمک کرده است.

با توجه به اینکه مقاومت خمشی و مدول کشسانی، تا دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس افزایش قابل توجهی را از خود نشان دادند و سپس در دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس افت اندکی پیدا کردند؛ می توان دلیل این امر را تغییر در ساختار شیمیایی دیواره های سلولی دانست که در طی تیمار گرمایی روی داده است. از آن جایی که بر اثر بالاتر رفتن دمای تیمار، بسپارهای قندی دیواره های سلولی؛ به ویژه همی سلولزها دچار تخریب می شوند و از ساختار میکرو فیبریل ها خارج می شوند [۵، ۱۹]، پدیده نوآرایی^۳ در ساختار سلولز روی می دهد و بر پهنا و طول نواحی کریستالی افزوده می شود [۲، ۲۱، ۲۳]. رشد نواحی بلوری نقش به سزایی در افزایش مدول کشسانی دارد [۲، ۱۰].

بحث

در بیان دلیل افزایش چگالی خشک نمونه های تیمار شده، می توان چنین گفت که تیمار گرمایی چوب در درون آب، سبب نرم تر شدن آن شد و قابلیت شکل پذیری آن را در زیر بار پرس بالاتر برد. از آن جایی که لیگنین ماده ای گرماترم^۱ است [۱۳] و بر اثر گرما دهی روان می شود؛ بدین سبب قابلیت جا به جایی و شکل پذیری دیواره های سلولی افزایش می یابد و از سوی دیگر، با بروز پدیده چین خوردگی^۲ یا در هم فرو ریختن دیواره ها بر اثر تیمار گرمایی [۳، ۴]؛ قابلیت فشردن چوب در زیر پرس فزونی می یابد.

در نتیجه، چوب تیمار شده با آسانی بیشتری در زیر پرس فشرده می شود و با افزایش شدت تیمار بر چگالی آن افزوده می شود؛ لذا بر پایه نتایج، می توان چنین بیان داشت که افزایش دمای تیمار سبب نرم شدن دیواره های سلولی شده است و قابلیت انعطاف پذیری آنها را بالاتر برده است و منجر به افزایش چگالی شده است. در کنار

^۱ Thermoplastic

^۲ Collapse

^۳ Reorientation

می‌توان گفت که این بررسی نشان داد که تیمار ترکیبی گرمایی-مکانیکی، قابلیت اصلاح ویژگی‌های مقاومتی چوب صنوبر را دارد و سبب افزایش مقاومت این ماده چوبی کم دوام می‌شود. با اصلاح ویژگی این چوب، می‌توان با آسودگی خاطر آن را برای نیازهای مقاومتی صنایع چوب به عنوان ماده‌ای مناسب به کار برد (مانند پارکت سازی، تولید کف پوش، چوب ضربه، تیرهای چوبی و ...).

در طی بررسی‌هایی، برخی از ویژگی‌های این ماده مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند؛ اما بررسی کارآیی این روش ابداعی بر روی چوب‌هایی با چگالی‌های مختلف ضروری به نظر می‌رسد. از سوی دیگر، بررسی اثر روش اصلاح ترکیبی بر دوام زیستی چوب‌های فشرده شده به این روش، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار خواهد بود تا بتوان قابلیت این نوع روش تیمار را در مقایسه با روش‌های پیشین مشخص نمود.

از سوی دیگر، افزایش دمای تیمار و تخریب پلی‌ساکاریدها با تولید اسید استیک، اسید فرمیک و فورفورال همراه است [۵، ۱۹]. حضور اسید در دیواره سلولی، سبب شکستن پیوندهای گلیکوزیدی بسیار سلولز می‌شود [۱۹] و کوتاه‌تر شدن زنجیرهای سلولزی را به همراه دارد. از آن جایی که طول زنجیرهای سلولز در مقاومت‌های کششی چوب اثر بارزی دارد [۱۶]؛ بدین سبب افت مدول گسیختگی نتیجه اثر گذاری‌های تیمار گرمایی در دامه‌های بالاتر از ۱۲۰ درجه سلسیوس خواهد بود.

افزایش مقاومت به ضربه نمونه‌های تیمار شده تا دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس و کاهش نسبی بعدی آن در دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس همانند مواردی است که درباره مدول گسیختگی بدان‌ها پرداخته شد.

در بررسی کلی، دیده شد که تیمار ترکیبی گرمایی-مکانیکی سبب افزایش مقاومت‌های مکانیکی شد. دلیل این افزایش می‌تواند به ازدیاد چگالی نیز باز گردد. اما درباره دلیل افزایش مقاومت به ضربه، می‌توان به تشکیل پیوندهای عرضی لیگنین بر اثر واکنش‌های تراکمی^۱ نیز اشاره کرد [۱۸، ۱۹]. این پیوندها می‌توانند سبب ایجاد ساختاری یک نواخت و یک پارچه در دیواره‌های سلولی شوند و در هنگام وارد شدن نیروهای ناشی از ضربه، منجر به توزیع یکنواخت انرژی تولید شوند. روشن است، موادی که قابلیت توزیع انرژی را داشته باشند، تحمل مقاومت به تنش‌های آنی را خواهند داشت.

نتیجه گیری

این بررسی بر پایه ترکیب دو نوع تیمار اصلاحی چوب، گرمایی و مکانیکی، انجام شد تا با بررسی اثر این روش ابداعی بپردازد. در این بررسی مشخص شد که تیمار ترکیبی گرمایی-مکانیکی به خوبی بر ویژگی‌های مکانیکی چوب صنوبر و چگالی آن اثر گذار بود. به گونه‌ای که افزایش دمای تیمار گرمایی و پرس سبب افزایش چگالی شد و این روش تیمار (ترکیبی) سبب بالاتر رفتن مقاومت‌های مکانیکی؛ مانند مدول کشسانی، مدول گسیختگی و مقاومت به ضربه شد. در نهایت

¹ Lignin condensation reactions

منابع

- 1- American Society for Testing and Materials, 2000. Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber, American Society for Testing and Materials, D 143-94.
- 2- Abe, K. and Yamamoto, H., 2006. Change in mechanical interaction between cellulose microfibril and matrix substance in wood cell wall induced by hygrothermal treatment, Wood Science Vol. 52: 107-110.
- 3- Boonstra, M.J., Rijdsdijk, J.F., Sander, C., Kegel, E., Tjeerdsma, B., Militz, H., van Acker, J. and Stevens, M., 2006a. Microstructural and physical aspects of heat treated wood. I. Softwoods, Maderas. Ciencia Y Tecnologia 8(3): 193-208.
- 4- Boonstra, M.J., Rijdsdijk, J.F., Sander, C., Kegel, E., Tjeerdsma, B., Militz, H., van Acker, J. and Stevens, M., 2006b. Microstructural and physical aspects of heat treated wood. II. Hardwoods, Maderas. Ciencia Y Tecnologia 8(3): 209-217.
- 5- Boonstra, M.J. and Tjeerdsma, B., 2006. Chemical analysis of heat treated softwoods, Holz Als Roh- Und Werkstoff 64: 204-211.
- 6- Garrote, G., Dominiguez, H. and Parajó, J.C., 1999. Hydrothermal processing of lignocellulosic materials, Holz als Roh- und Werkstoff 57: 191-202.
- 7- Inoue, M., Norimoto, M., Tanahashi, M. and Rowell, R.M., 1993. Steam heat fixation of compressed wood, Wood and Fiber Science Vol. 25 (3): 224-235.
- 8- Ito, Y., Tanahashi, M., Shigematsu, M. and Shinoda, Y., 1998b. Compressive-molding of wood by high-pressure steam-treatment: II. Mechanism of permanent fixation, Holzforchung Vol. 52 (2): 217-221.
- 9- Ito, Y., Tanahashi, M., Shigematsu, M., Shinoda, Y. and Ohta, C., 1998a. Compressive- molding of wood by high -pressure steam -treatment: I. Development of compressive molded squares from thinning, Holzforchung Vol. 52 (2): 211-216.
- 10- Jennings, J.D., 2003. Investigation the Surface Energy and Bond Performance of Compression Densified Wood, M. Sc. Thesis, Virginia Polymeric Institute and State University: 147 p.
- 11- Kollman, F.P., Kuenzi, E.W. and Stamm, A.J., 1975. Principle of Wood Science and Technology, Vol. II Wood Based Materials, 1st ed. Springer-Verlag Newyork, Heidelberg, Berlin: 703 p.
- 12- Kultikova, E.V., 1999. Structure and Properties Relationships of Densified Wood, M. Sc. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 139 p.
- 13- Morsing, N., 2000. The influence o f hydrothermal treatment on compression of beech perpendicular to grain, Ph.D. Thesis, Department of Structural Engineering and Materials, Technical University: 137 p.
- 14- Mohebbi, B. and Sanaei, I., 2005. Influences of the hydro-thermal treatment on physical properties of beech wood (*Fagus orientalis*), The International Research Group on Wood Preservation, IRG Document No.: IRG/WP 05-40303.
- 15- Navi, P. and Girardet, F., 2000. Effects of thermo-hydro-mechanical treatment on the structure and properties of wood, Holzforchung 54 (3): 287-293.
- 16- Rowell, R. M., 2005. Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites, 2nd ed. CRC Press, London: 378 p.

- 17- Skyba, O., Niemz, P. and Schwarze, F.W.M.R., 2008. Degradation of thermo-hygro-mechanically (THM)-densified wood by soft-rot fungi, *Holzforschung* Vol. 62: 277–283.
- 18- 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.
- 19- 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.
- 20- Tjeerdsma, B.F., Stevens, M. and Militz, H., 2000. Durability aspects of hydrothermally treated wood, The International Research Group on Wood Preservation, IRG Document No. IRG/WP 00-40160.
- 21- Wallenberger, F.T. and Weston, N., 2004. *Natural Fibers, Plastic and Composites*, 1st Ed. Springer, Berlin: 392 p.
- 22- Welzbacher C.R., Rapp A.O., Hallel P. and Wehsener J., 2005. Biological and mechanical properties of densified and thermally modified *Norway Spruce*. In: The second European Conference on Wood Modification. Oct 6-7 Göttingen, Germany: 20-27.
- 23- Yildiz, S. and Gümüşkaya, E., 2007. The effect of thermal modification on crystalline structure of cellulose in soft and hardwood, *Building and Environment* 42(4): 62-67.