

اثر تیمار حرارتی بر خواص آناتومی، فیزیکی، مؤلفه‌های رنگی و مکانیکی چوب توس

چکیده

از آنجایی که اطلاعات مربوط به تیمار حرارتی چوب به روش صنعتی عمدتاً مربوط به گونه‌های چوبی سوزنی‌برگ می‌باشد، این تحقیق به دنبال بررسی خواص فیزیکی، و مکانیکی گونه چوبی پهن‌برگ توس پس از انجام تیمار حرارتی در کوره‌های صنعتی می‌باشد. بدین منظور از چوب توس (Birch) طبق دستورالعمل اتحادیه ترمو وود فنلاند برای تولید ترمو وود کلاس D استفاده گردید. جذب آب، دانسیته خشک، بحرانی و ۱۲٪ رطوبت، همکشیدگی، واکشیدگی، و مؤلفه‌های رنگ ($L^*a^*b^*$)، ویژگی‌های آناتومی و آزمون ترشوندگی، خواص مکانیکی شامل MOR، MOE، مقاومت به ضربه و مقاومت فشاری موازی الیاف بررسی و با نمونه شاهد مقایسه شدند. نتایج نشان داد رنگ چوب ترموشده نسبت به نمونه شاهد به مقدار قابل توجهی تیره‌تر شده است. در چوب توس؛ درصد رطوبت چوب تیمار حرارتی شده نسبت به نمونه شاهد ۱۱۷/۷ درصد کاهش را نشان داد. دانسیته بحرانی چوب تیمار حرارتی شده نسبت به نمونه شاهد ۷/۳ درصد افزایش را نشان داد. دانسیته خشک نمونه بعد از تیمار حرارتی نسبت به نمونه شاهد ۰/۶ درصد کاهش را نشان داد. دانسیته بعد از تیمار حرارتی نسبت به نمونه شاهد ۲/۳ درصد افزایش را نشان داد. همکشیدگی و واکشیدگی نمونه ترمو شده نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۱۰۰/۵ و ۱۱۵/۴ درصد کاهش را نشان داد، تهیه مقطع از چوب تیمار حرارتی شده نسبت به نمونه شاهد سخت‌تر بود و تخریب آوندها و فیبرها اشعه چوبی قابل مشاهده بود. مدول الاستیسیته، مدول گسیختگی، مقاومت به ضربه و مقاومت به فشار موازی الیاف تیمار حرارتی شده نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۳/۲۲، ۳/۴، ۱۴۷/۹۷ و ۲/۹۵ درصد کاهش را نشان داد.

واژگان کلیدی: ترمو وود، توس، زاویه تماس، ویژگی‌های آناتومی، خواص فیزیکی، خواص مکانیکی.

احمد ثمریها

استادیار، گروه صنایع چوب، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

مسئول مکاتبات:

asamariha@tvu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۵

مقدمه

چوب به‌عنوان یک ماده مهندسی در صنایع مختلف بکار می‌رود؛ زیرا کم هزینه، تجدیدشونده و نسبتاً مقاوم است و هزینه انرژی تبدیل کمتری در حین فرآیند دارد. متأسفانه چوب و فرآورده‌های وابسته به آن علی‌رغم ویژگی‌های برتری که دارند، دارای خواص نامطلوب و

محدودکننده‌ای چون عدم ثبات ابعاد، کهنگی و هوازگی، تخریب زیستی، قابلیت اشتعال و تخریب بر اثر اشعه نور ماورای بنفش، اسیدها و بازها هستند. در نتیجه این عوامل کیفیت چوب کاهش یافته و عمر مفید آن محدودتر خواهد شد [۱]. فرایند اصلاح حرارتی به دهه ۱۹۳۰ برمی‌گردد و بیشتر در دهه ۱۹۹۰ توسعه یافت. تاکنون چندین نوع روش تجاری اصلاح حرارتی توسعه یافته است،

اصلاح حرارتی نمونه‌های چوب از نوع تیمار حرارتی خشک، با ترتیب سطح دمایی ۱۶۵ و ۲۱۰ درجه سانتی‌گراد بود. مدول الاستیسیته دینامیک و استاتیک، مقاومت خمشی، ضربه، سختی و دانسیته نمونه‌های چوب ترمو شده آزمون شدند. با مشاهده نتایج آزمون‌ها مشخص گردید که از یک سو تیمار حرارتی در دماهای بالا، ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌های چوب را کاهش داده؛ ولی از سویی دیگر منجر به ظاهری بهتر در نمونه‌های چوب و بهبود ثبات ابعاد آن‌ها شده است. به علاوه تیمار حرارتی در دماهای بالا به دلیل تغییرات شیمیایی شدیدی که در ساختار نمونه‌های چوب ایجاد کرد، ویژگی‌های مقاومتی را تحت تأثیر قرار داد [۹]. رنگ چوب در هنگام اصلاح حرارتی تیره می‌شود. رنگ چوب می‌تواند شاخصی از کیفیت چوب اصلاح شده با اعمال تیمار حرارتی باشد که در نتیجه کاربرد نهایی آن را در بازار تعیین کند. ویژگی‌های رنگ بیشتر در ترکیب متقابل با نور به ترکیب شیمیایی خاص هر چوب بستگی دارد. با این حال، درجه تغییر رنگ به شرایط اصلاح حرارتی، به‌ویژه دما و مدت زمان تیمار بستگی دارد [۱۰]. BARČÍK و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی اثر دمای اصلاح حرارتی بر تغییر رنگ چوب پرداختند. در این پژوهش تغییر رنگ گونه‌های چوب توس پس از تیمار حرارتی در دماهای ۱۶۰، ۱۸۰، ۲۱۰ و ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد، به وسیله سیستم CIELab اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که مقدار روشنی (L^*) کاهش یافته و رنگ چوب‌ها تیره‌تر شده است. با افزایش تدریجی دما از ۱۶۰ به ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد، مقدار b^* کاهش یافت. در مقابل اما مقدار a^* و تغییر رنگ کلی چوب‌ها (ΔE^*) افزایش پیدا کرد [۱۱]. در دو دهه اخیر، تحقیقات بر روی فرآیندهای اصلاح حرارتی چوب به عنوان جایگزین‌های زیست محیطی انجام شده است [۱۲]. اصلاح حرارتی چوب منجر به اصلاح رنگی، افزایش ثبات ابعادی، افزایش مقاومت به پوسیدگی و کاهش ویژگی‌های مکانیکی می‌شود [۱۳]. درخت توس با نام انگلیسی Brich در نیمکره شمالی به ویژه در شمال اروپا (روسیه) و کانادا و مناطقی از آسیا وجود دارد. توس گونه‌ای پهن برگ است، ریز بافت بوده و چوب برون آن به رنگ زرد روشن تا سفید و چوب درون قهوه‌ای روشن تا سرخ روشن است.

مانند ترمو وود^۱ در فنلاند، پلاتو^۲ در هلند، اصلاح حرارتی با روغن داغ^۳ در آلمان، روش‌های بوآ پردو^۴ و ریکتیفیکاسیون^۵ در فرانسه و اخیراً اصلاح حرارتی در محیط خلأ^۶ در برخی کشورها. اصلاح حرارتی چوب روشی است که به منظور رفع معایب چوب جهت افزایش دوام طبیعی، ثبات ابعاد، خواص هوازدگی و... صورت می‌گیرد [۲]. اصلاح چوب یکی از روش‌هایی است که موجب برطرف شدن برخی معایب چوب شده و از چوب یک ماده مهندسی مناسب برای کاربردهای خاص می‌سازد [۳]. اصلاح حرارتی انواع گوناگونی دارد که بسته به محیط گرمادهی (آب، بخار آب، روغن، نیتروژن و هوای خشک) نام ویژه‌ای دارد [۴]. هدف اصلی از اصلاح حرارتی چوب بهبود مقاومت آن به جذب رطوبت و پایداری ابعاد آن است. آب‌گریزی چوب اصلاح حرارتی شده ناشی از عوامل متعددی مانند کاهش گروه‌های هیدروکسیل چوب در اثر تخریب ترکیبات دیوار سلولی به‌ویژه همی سلولزها، افزایش کریستالیته سلولز، نرم‌شدگی لیگنین، تشکیل فرآورده‌های تخریب حرارتی، حجیم‌شدگی دیوار سلولی ناشی از پرشدن منافذ دیواره سلولی است [۵ و ۶]. بیشترین و جامع‌ترین فعالیت‌های تحقیقاتی در زمینه اصلاح حرارتی چوب توسط انجمن بین‌المللی ترمو وود در کشور فنلاند انجام شده است. ویژگی‌های مکانیکی چوب اصلاح شده بیشتر شرایط اصلاح و نوع گونه چوب بستگی دارد. [۷]. Percin و همکاران (۲۰۱۶) در بررسی تأثیر تیمار حرارتی بر ویژگی‌های مکانیکی چوب راش، حرارت‌دهی را در سه سطح دمایی ۱۵۰، ۱۷۵ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و در زمان‌های ۱، ۳ و ۵ ساعت انجام دادند که در نهایت به کاهش مدول الاستیسیته و مقاومت خمشی منتهی شد. دلیل آن به کاهش وزن به‌دست‌آمده پس از تیمار حرارتی نسبت داده شد، که می‌تواند به‌طور معنی‌داری ویژگی‌های مکانیکی چوب را تحت تأثیر قرار دهد [۸]. Borůvka و همکاران (۲۰۱۸) ویژگی‌های مقاومتی و الاستیک چوب توس تیمار حرارتی شده را بررسی کردند. در این بررسی

¹ Thermowood

² Plato

³ OHT-Oil Heat Treatment

⁴ Bois Perdure

⁵ Rectification

⁶ Thermo-vacuum modification

حرارتی) بر اساس استاندارد ASTM D-2244 به وسیله دستگاه رنگ‌سنج ساخت کشور چین در آزمایشگاه بخش تحقیقات چوب موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع اندازه‌گیری شد خواص مکانیکی نمونه‌ها شامل مقاومت به ضربه مطابق با استاندارد EN 10045 در آزمایشگاه مکانیک چوب دانشکده فنی انقلاب اسلامی و مقاومت به فشار موازی الیاف، مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته خمشی، مطابق با استاندارد ASTM D 143 در آزمایشگاه بخش تحقیقات چوب موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع اندازه‌گیری شدند. قبل از اندازه‌گیری خواص مکانیکی، نمونه‌ها در اتاق کلیما در رطوبت نسبی ۶۵ درصد و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ هفته متعادل‌سازی شدند. از طرح کاملاً تصادفی برای نمونه‌برداری استفاده شد. آزمون T مستقل برای مقایسه‌ی معنی‌داری یا عدم معنی داری میانگین داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار (SPSS) استفاده شد.

نتایج و بحث

برای بررسی عناصر سلولی قبل و بعد از تیمار حرارتی، اسلایدهای میکروسکوپی از سه مقطع عرضی، شعاعی و مماسی چوب‌ها تهیه شد و به تشریح این عناصر پرداخته شد. به طور کلی، تهیه مقاطع میکروسکوپی از نمونه‌های تیمار حرارتی شده سخت‌تر از نمونه‌های شاهد بود. نمونه‌های تیمار شده هنگام مقطع‌گیری خرد شده یا در حین مراحل رنگ‌آمیزی، قوام بافت خود را از دست می‌دادند. شکل ۱ مقاطع میکروسکوپی تهیه شده از نمونه شاهد چوب توس را نشان می‌دهد. توس پراکنده آوند بوده و دارای دواپر سالیانه مشخص است. به علت کوچک بودن پارانشیم‌ها نقوش حاصل از آنها مانند پرمگس‌ها در چوب راش و چنار قابل رؤیت نیستند. اغلب بافت چوب از الیاف لیبریفرم تشکیل شده که دارای غشای نازکی می‌باشند. آوندها دارای مقطع بیضی بوده و تا ۵۰ تا ۱۰۰ عدد در هر میلی‌متر مربع وجود دارند در نتیجه‌های بین آوندی در این گونه از نوع نردبانی می‌باشد.

چوب توس در مقایسه با سایر چوب‌های وارداتی کمتر مورد تحقیق قرار گرفته و اطلاعات کمی از آن در دسترس است. به همین دلیل این تحقیق با هدف بررسی اثر تیمار حرارتی بر خواص فیزیکی و مکانیکی چوب توس انجام شده است.

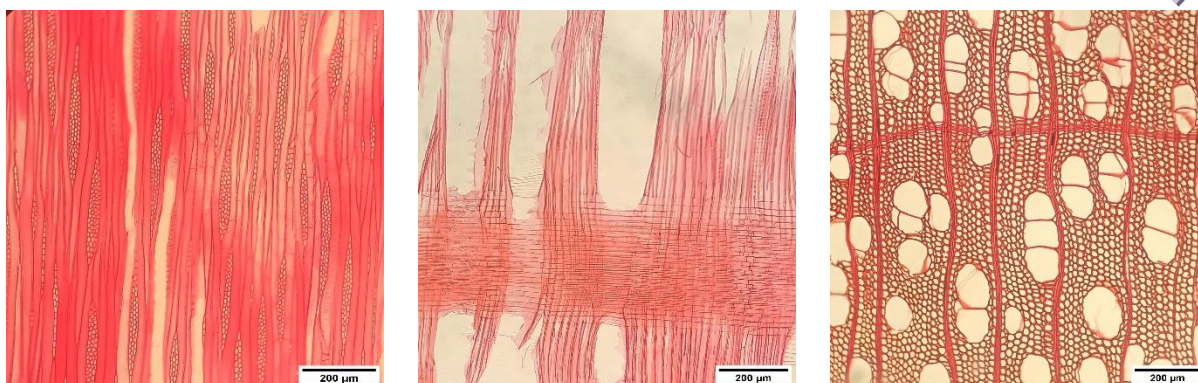
مواد و روش‌ها

در این تحقیق نمونه‌های موردنظر از گونه چوبی توس از سایت چوب‌فروشان خاوران تهیه و سپس اصلاح حرارتی نمونه‌های موردنظر با توجه به نوع فرایند حرارتی (Thermo-D) بر اساس روش انجمن بین‌المللی ترمو وود فنلاند در کارخانه مازند چوب آریا انجام شد. برای بررسی ویژگی‌های آناتومی چوب تعداد ۲ مکعب کوچک از نمونه‌ها در ابعاد ۱*۱*۱ سانتی‌متر مورد استفاده قرار گرفتند. برای بررسی ویژگی‌های آناتومیکی مطابق روش اولادی و همکاران (۱۳۹۵) انجام شدند [۱۴]. مطالعات میکروسکوپی نمونه‌های تهیه شده پس از تثبیت کامل در محیط آزمایشگاه و عکس‌برداری با نرم‌افزار Image J مقیاس‌گذاری شدند. بر اساس فهرست ویژگی‌های میکروسکوپی شناسایی پهن‌برگان انجمن بین‌المللی آناتومیست‌های چوب جهان (IAWA) ویژگی‌های چوب بررسی شد [۱۵]. آزمون ترشوندگی با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری زاویه تماس (Cam) ساخته شده توسط آزمایشگاه ترشوندگی در پژوهشگاه مواد و انرژی انجام شد. تصاویر با استفاده از دوربین رنگی صنعتی ۶۱۸U۲۳DFK به کمک یک لنز 2X گرفته شده‌اند. پس از فرایند اصلاح حرارتی خواص فیزیکی شامل مقدار رطوبت تعادل، دانسیته، جذب آب و واکنشیدگی حجمی نمونه‌های شاهد و ترمووود اندازه‌گیری شد و سپس کارائی ضد رطوبت (MEE)^۱، کارائی ضد واکنشیدگی (ASE)^۲ و نیز کارائی بازدارندگی جذب آب (WRE)^۳ نمونه‌های ترمو وود مطابق روش دستوریان و همکاران (۱۳۹۷) محاسبه شد [۱۶]. خصوصیات رنگ نمونه‌های چوب (قبل و بعد از تیمار

¹ Moisture exclusion efficiency

² Anti-swelling efficiency

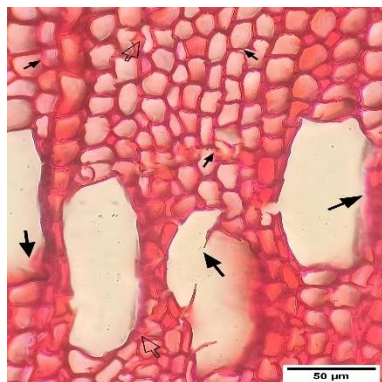
³ Water repellent efficiency



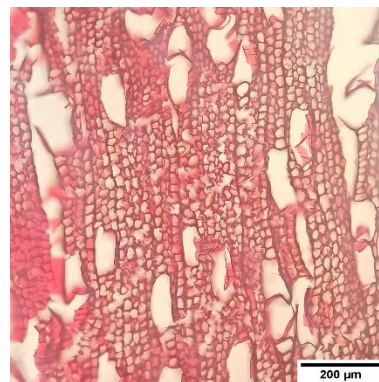
شکل ۱ مقاطع میکروسکوپی چوب شاهد توس (الف) مقطع عرضی (ب) مقطع شعاعی (ج) مقطع مماسی

تخریب اشعه چوبی، و وجود ترک و تخریب دیواره فیبرها، و تخریب آوندها مشاهده می‌شود. شکل د، تخریب دیواره آوندها، وجود ترک و تخریب منافذ در محل تلاقی آوندها و اشعه چوبی، و تخریب دریچه نردبانی آوندها مشاهده شد. شکل ه، تخریب اشعه چوبی، تخریب دریچه نردبانی آوندی، و تخریب دیواره آوندها مشاهده شد.

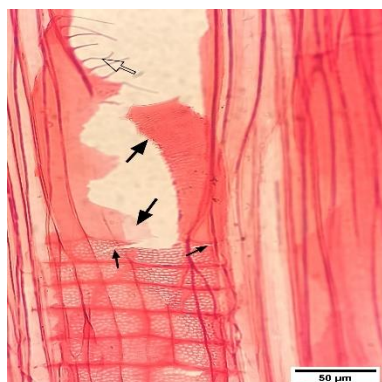
شکل ۲ مقاطع میکروسکوپی تهیه شده از چوب تیمار حرارتی شده چوب توس را نشان می‌دهد. تهیه مقطع از این چوب تیمار حرارتی شده این گونه سخت‌تر بود. شکل الف، تخریب و به هم ریختگی شکل آوندها و فیبرها قابل مشاهده است. در شکل ب، تخریب دیواره آوندها، و تخریب دیواره فیبرها و لایه بین سلولی، و جدا شدن دیواره‌های سلولی فیبرها قابل مشاهده است. شکل ج،



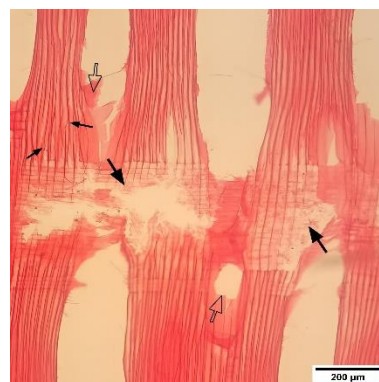
ب



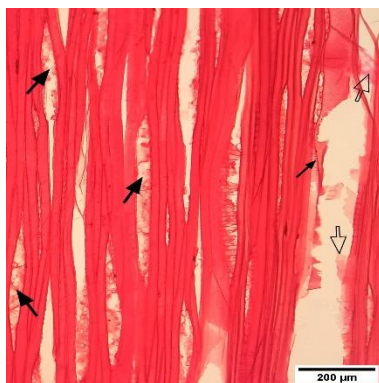
الف



د



ج



۵

شکل ۲ مقاطع میکروسکوپی چوب تیمار شده توس (الف و ب) مقاطع عرضی (ج و د) مقاطع شعاعی و (ه) مقطع مماسی

نمونه‌ی شاهد بود. مقدار میانگین واکشیدگی و همکشیدگی حجمی در نمونه‌ی شاهد به ترتیب برابر با ۱۷/۶۴، ۱۴/۹۹ درصد و در نمونه‌ی ترموود به ترتیب برابر با ۸/۵۲، ۷/۸۵ درصد بود. نتایج اندازه‌گیری مقدار جذب آب پس از ۲۴ ساعت غوطه‌وری نشان داد که مقدار جذب آب در ترموود توس به طور معنی‌داری کمتر از چوب معمولی است. مقدار میانگین جذب آب در نمونه‌ی شاهد برابر با ۱۱۳/۷۵ درصد و در نمونه‌ی ترموود برابر با ۵۴/۱۱ درصد بود. Mirzaei و همکاران (۲۰۱۲) علت کاهش مقدار جذب آب چوب تیمار شده را تخریب همی-سلولزها ذکر نمودند. [۲۲]. تحقیقات نشان می‌دهد که بسته به گونه‌ی چوبی مقدار جذب آب در چوب ترمو شده ممکن است کمتر یا بیشتر از چوب شاهد باشد. Tarmian و Mastouri (۲۰۱۸) دریافتند که مقدار جذب آب، در چوب ترمو وود ممرز بیشتر از چوب شاهد آن بود، در حالی که در ترمو وود نوئل و بلوط مقدار جذب آب کمتر از چوب شاهد این گونه‌ها بود. ایشان افزایش مقدار جذب آب در ترمو وود ممرز را به افزایش مقدار نفوذپذیری این چوب پس از اصلاح حرارتی نسبت دادند. [۲۳]. بر اساس استانداردهای انجمن ترموود فنلاند، مقدار کارایی ضد-رطوبت ترموود به طور متوسط برابر با ۵۰ درصد است [۱۹]؛ بنابراین، با توجه به مقدار به دست آمده در این تحقیق برای نمونه‌های ترمو وود توس (۶۰/۸ درصد) می‌توان گفت که نمونه‌ی ترمو وود تولیدی از کیفیت مطلوبی به لحاظ کاهش مقدار جذب رطوبت برخوردار است.

برای ارزیابی موفقیت روش‌های تیمار حرارتی چوب، شناخت و فهم تأثیر آن بر چوب، ساختار آناتومی چوب مهم است [۱۷]. به دلیل تخریب دیواره سلولی و ریزساختار چوب، ناشی از تغییرات شیمیایی در نمونه‌های تیمار شده با توجه به تصاویر میکروسکوپی و همچنین سختی گرفتن مقاطع میکروسکوپی از گونه توس نتایج نشان می‌دهد که تأثیر تیمار گرمایی روی این گونه شدیدتر بوده و در نتیجه ساختار سلولی بیشتر تخریب شده است. Boonstra و همکاران (۲۰۰۶) پس از یک روش بهینه‌سازی ترمو وود زبان گنجشک با بخار از تخریب ساختار چوب جلوگیری کردند، اگرچه انتظار می‌رفت که ساختار بخش روزنه‌ای در چوب زبان گنجشک باعث آسیب‌دیدگی در حین تیمار حرارتی شود [۱۸]. نتایج نشان داد که مقدار رطوبت تعادل در چوب ترمو وود توس کمتر از ۱۴۵ درصد مقدار آن در نمونه معمولی است (جدول ۱). سایر محققین نیز به نتایج مشابه دست یافتند [۱۹ و ۲۰]. دلایل متعددی برای کاهش رطوبت تعادل ترموود گزارش شده است. کاهش درجه بلورینگی سلولز، کاهش میزان گروه‌های هیدروکسیل در اثر تخریب ترکیبات دیوار سلولی چوب، پر شدن میکرو منافذ دیوار سلولی تشکیل پیوندهای عرضی در لیگنین از عوامل کاهنده قابلیت جذب رطوبت در چوب اصلاح حرارتی شده می‌باشند [۲۱]. نتایج نشان داد که مقدار واکشیدگی و همکشیدگی حجمی ترموود پس از غوطه‌وری در آب به مدت ۲۴ ساعت به طور معنی‌داری در سطح اعتماد ۹۵ درصد کمتر از مقدار واکشیدگی و همکشیدگی حجمی

جدول ۱. خواص فیزیکی ترمو وود چوب توس

| ویژگی | میانگین | انحراف معیار |
|--------------------------|---------|--------------|
| کارائی ضد رطوبت | ۵۹/۱۵ | ۲/۵۹ |
| کارائی بازدارندگی جذب آب | ۵۳/۹۹ | ۴/۸۸ |
| کارائی ضد واکشیدگی حجمی | ۵۳/۷۲ | ۴/۲۶ |

به نمونه شاهد نشان دهنده آب‌گریز شدن چوب اصلاح شده (نم‌پذیری کمتر) است. اکثر محققین دریافتند که اصلاح حرارتی از ترشوندگی چوب را کاهش می‌دهد [۲۰]. کاهش ترشوندگی به علت تخریب همی‌سلولزها و کاهش گروه‌های هیدروکسیل در دسترس چوب و پلاستیکی شدن لیگنین نسبت داده می‌شود [۲۰].

Durmaz و همکاران (۲۰۱۹) و Xie و همکاران (۲۰۲۰) کاهش دانسیته خشک، کاهش واکشیدگی و همکشیدگی و بهبود ثبات ابعادی چوب کاج جنگلی را به دلیل تخریب قندها (همی‌سلولزها) و تشکیل گروه‌های آب‌گریز بعد از تیمار حرارتی گزارش کردند [۲۴ و ۲۵].

آزمون T مستقل نشان داد که بین میانگین همه خواص فیزیکی به‌استثنای دانسیته خشک چوب توس قبل از تیمار حرارتی و بعد از تیمار حرارتی در سطح اطمینان ۹۹٪ اختلاف معنی‌دار آماری وجود دارد (جدول ۲). جدول ۳ نشان داد، دانسیته بحرانی، دانسیته در رطوبت ۱۲٪ و زاویه تماس چوب تیمار حرارتی شده نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۷/۳، ۲/۳ و ۴۳/۲ درصد افزایش را نشان داد. علاوه بر این دانسیته خشک، همکشیدگی و واکشیدگی حجمی بعد از تیمار حرارتی نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۰/۶، ۱۰۰/۵ و ۱۱۵/۴ درصد کاهش را نشان داد. افزایش زاویه تماس در نمونه ترمو شده نسبت

جدول ۲- آزمون T مستقل (مقدار T و سطح معنی‌داری)

| ویژگی | مقدار T | سطح معنی‌داری |
|-----------------------------------|---------|---------------|
| دانسیته بحرانی (g/cm^3) | ۱۰/۸۷۰ | ۰/۰۰۰ |
| دانسیته خشک (g/cm^3) | ۰/۸۰۹ | ۰/۴۲۰ |
| دانسیته در رطوبت ۱۲٪ (g/cm^3) | ۳/۳۹۵ | ۰/۰۰۴ |
| همکشیدگی حجمی (%) | ۲۲/۵۱۳ | ۰/۰۰۰ |
| واکشیدگی حجمی (%) | ۲۲/۰۵۰ | ۰/۰۰۰ |
| مدول الاستیسیته (Mpa) | ۰/۸۶۹ | ۰/۴ |
| مدول گسیختگی (Mpa) | ۰/۳۸۸ | ۰/۷۰۶ |
| مقاومت به ضربه (KJ/m^2) | ۹/۰۱۳ | ۰/۰۰۱ |
| مقاومت به فشار موازی الیاف (Mpa) | ۰/۳۹۷ | ۰/۶۹۸ |

جدول ۳. خواص فیزیکی نمونه‌های توس شاهد و ترموود

| نوع چوب | دانسیته بحرانی (g/cm^3) | دانسیته خشک (g/cm^3) | دانسیته در رطوبت ۱۲٪ (g/cm^3) | همکشیدگی حجمی (%) | واکشیدگی حجمی (%) | زاویه تماس (درجه) |
|----------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| شاهد | ۰/۴۳۴ (۰/۰۰۲) | ۰/۵۰۲ (۰/۰۰۷) | ۰/۴۷۵ (۰/۰۰۵) | ۱۳/۶۳ (۰/۷۴) | ۱۵/۷۹ (۰/۹۹) | ۶۰/۷ (۱/۱۶) |
| ترمو وود | ۰/۴۶۵ (۰/۰۰۸) | ۰/۴۹۹ (۰/۰۰۹) | ۰/۴۸۶ (۰/۰۰۹) | ۶/۸ (۰/۶۱) | ۷/۳ (۰/۷) | ۸۶/۹ (۰/۶۹) |

متماایل به سبز است. همچنین Δb مثبت به معنی تغییر رنگ متمایل به زرد و Δb منفی به معنی تغییر رنگ متمایل به آبی است. نتایج نشان داد که تیمار حرارتی باعث کاهش روشنی تخته‌ها نسبت به نمونه شاهد شد. تیمار حرارتی ترمو وود توس موجب افزایش تیرگی و تماایل به قرمزی و افزایش رنگ آبی چوب نسبت به نمونه شاهد شده است.

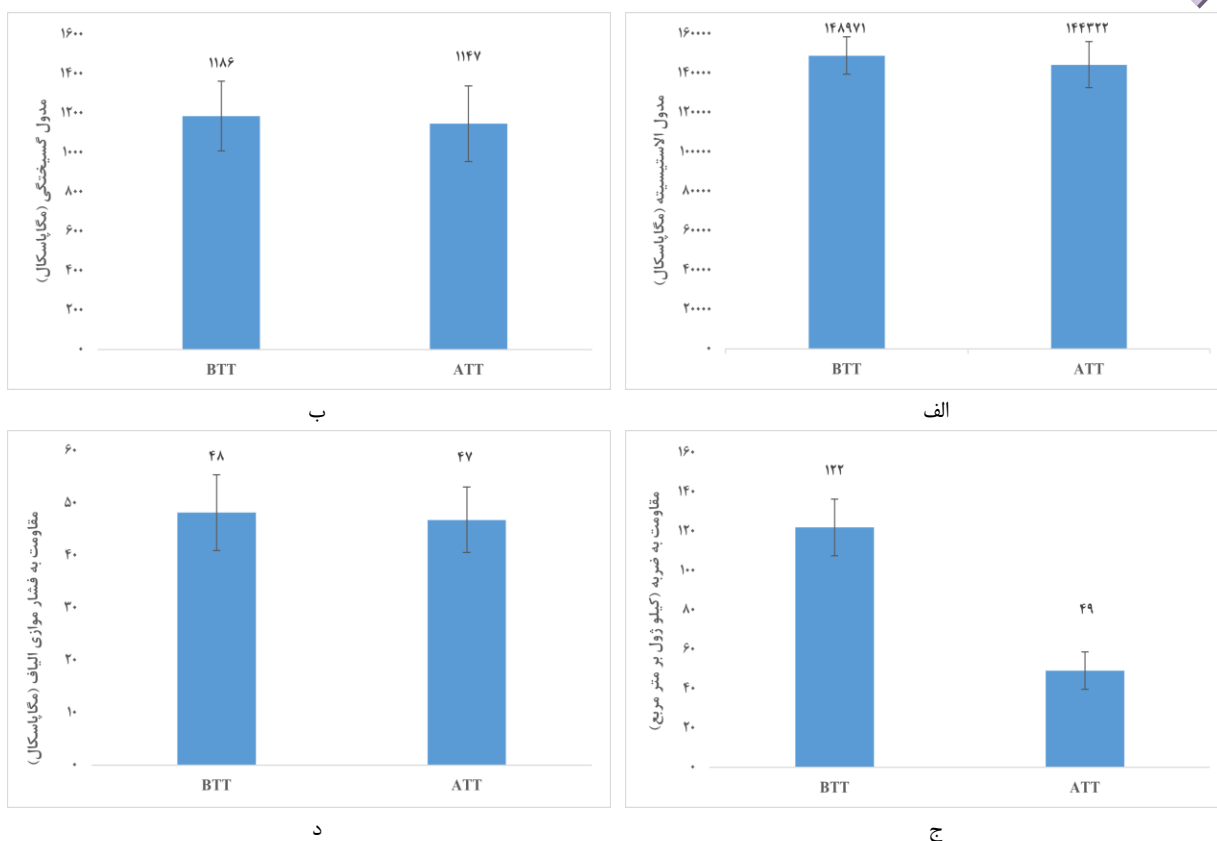
با بهره‌گیری از دستگاه رنگ‌سنج در سیستم CIE مؤلفه‌های رنگ شامل $L^* a^* b^*$ برای هر نمونه پیش از فرایند ترمو شدن (نمونه شاهد) و پس از تیمار حرارتی اندازه‌گیری شد. نتایج به دست آمده برای گونه چوبی توس در جدول ۴ آورده شده است. کاهش در میزان L به معنی تیره‌تر شدن نمونه است. Δa مثبت به معنی تغییر رنگ متمایل به قرمز و Δa منفی نیز به معنی تغییر رنگ

جدول ۴. تغییرات مؤلفه‌های نوری نمونه‌های چوب توس بعد از تیمار حرارتی

| نوع چوب | L^* | a^* | b^* | ΔL | Δa | Δb | ΔE^* |
|----------|----------------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------------|------------|----------------------|
| شاهد | 51 ± 25 $82/85$ | 2 ± 7 $-4/25$ | 8 ± 56 $27/69$ | - | - | - | - |
| ترمو وود | 44 ± 11 22 ± 93 | 0 ± 56 $2/65$ | 3 ± 04 $24/44$ | 2 ± 97 $-40/58$ | $8/78$ 1 ± 05 $-5/78$ | 1 ± 68 | $42/7$ 3 ± 91 |

تا د). کاهش خواص مکانیکی چوب با تخریب پلی ساکاریدهای چوب به‌ویژه همی سلولزها در دمای بالا با تولید اسیدهای آلی همراه است که می‌تواند سبب گسستن پیوندهای اتری در بسپار سلولز و کوتاه شدن طول زنجیره آن شود. به دلیل تأثیر بارز طول زنجیره سلولز بر مقاومت‌های کششی چوب، افت مدول گسیختگی در تیمارهای گرمایی قابل انتظار است [۷ و ۲۹]. بروز شکست و ترک‌های مویین ناشی از تیمار حرارتی در دیواره سلولی عاملی مؤثر بر خواص مکانیکی چوب است [۳۰]. تیمار حرارتی سبب افزایش تردی و شکنندگی چوب شده که عاملی برای کاهش مدول گسیختگی و مقاومت به ضربه نمونه چوبی است [۳۱]. کاهش حجم یا پدیده فروپاشی ساختاری چوب عاملی مؤثر در افزایش غیرمنتظره برخی از خواص مکانیکی چوب است [۲۳]. اصلاح لیگنین طی تیمار حرارتی سبب شد که اختلاف معنی‌داری بین مقاومت فشار موازی الیاف ترمووود و نمونه شاهد وجود نداشته باشد [۱۹].

با اعمال تیمار حرارتی، خواص نوری چوب شامل رنگ و مؤلفه‌های آن تغییر زیادی می‌کند و هرچه شدت تیمار بیشتر باشد، تیرگی چوب بیشتر می‌شود [۲۶]. تیره شدن چوب اغلب به دلیل تشکیل مواد حاصل از اکسیداسیون و تخریب اجزای چوب است [۲۷]. واکنش‌های تراکمی لیگنین و برخی مواد استخراجی و تشکیل محصولات جانبی به افزایش شدت رنگ قرمز در نمونه چوب کمک می‌کند. علاوه بر این، تیره شدن رنگ با افزایش مقدار لیگنین در ساختار چوب تیمار شده با حرارت اتفاق می‌افتد [۲۸]. آزمون T مستقل نشان داد که به‌استثنای مقاومت به ضربه چوب بین میانگین مدول الاستیسیته، مدول گسیختگی، و مقاومت به فشار موازی الیاف چوب توس قبل از تیمار حرارتی یا شاهد و بعد از تیمار حرارتی در سطح اطمینان ۹۵٪ اختلاف معنی‌دار آماری وجود ندارد (جدول ۲). مدول الاستیسیته، مدول گسیختگی، مقاومت به ضربه و مقاومت به فشار موازی الیاف چوب تیمار حرارتی نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۳/۲۲، ۳/۴، ۱۴۷/۹۷ و ۲/۹۵ درصد کاهش را نشان داد (شکل ۳-الف)



شکل ۳. مقایسه خصوصیات مکانیکی نمونه‌های چوبی توس قبل و بعد از ترمو شدن (الف) مدول الاستیسیته، (ب) مدول گسیختگی، (ج) مقاومت به ضربه، (د) مقاومت به فشار موازی الیاف

تیمار حرارتی شده نسبت به نمونه شاهد ۳/۴ درصد کاهش را نشان داد. مقاومت به ضربه تیمار حرارتی شده نسبت به نمونه شاهد ۱۴۷/۹۷ درصد کاهش را نشان داد که بیانگر اثر منفی اصلاح حرارتی بر مقاومت به ضربه است. مقاومت به فشار موازی الیاف تیمار حرارتی شده نسبت به نمونه شاهد ۲/۹۵ درصد کاهش را نشان داد.

سپاسگزاری

این تحقیق در قالب طرح فرصت مطالعاتی در صنعت انجام گرفته است، نویسنده از مدیریت محترم شرکت مازند چوب آریا به جهت حمایت از این تحقیق و اجرای فرصت مطالعاتی تشکر می‌کند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق خواص مختلف چوب توس قبل و بعد از تیمار حرارتی مورد بررسی قرار گرفت. رنگ چوب ترموشده نسبت به نمونه شاهد به مقدار قابل توجهی تیره تر شده است. دانسیته بحرانی چوب تیمار حرارتی شده نسبت به نمونه شاهد ۷/۳ درصد افزایش را نشان داد. دانسیته خشک نمونه بعد از تیمار حرارتی نسبت به نمونه شاهد ۰/۶ درصد کاهش را نشان داد. دانسیته بعد از تیمار حرارتی نسبت به نمونه شاهد ۲/۳ درصد افزایش را نشان داد. همکشیدگی نمونه ترمو شده نسبت به نمونه شاهد ۱۰۰/۵ درصد کاهش را نشان داد، واکشیدگی نمونه ترمو شده نسبت به نمونه شاهد ۱۱۵/۴ درصد کاهش را نشان داد. مدول الاستیسیته تیمار حرارتی شده نسبت به نمونه شاهد ۳/۲۲ درصد کاهش را نشان داد. مدول گسیختگی

منابع

- [1] Khademibami, L., and Bobadilha, G. S. 2022. Recent developments studies on wood protection research in academia: A review. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5, 28.
- [2] Militz, H. 2002. Thermal treatment of wood: European processes and their background. In: International Research Group Wood Pre, Section 4-Processes, N° IRG/WP 02-40241
- [3] Hill, C. A. 2007. *Wood modification: chemical, thermal and other processes*. John Wiley & Sons.
- [4] Talaei, A., Rezvani, M. H., and Doost Mohammadi, H. 2018. Investigation of adhesion strength of alkyd and nitro cellulose transparent coatings in different heat-treated poplar wood. *Journal of Color Science and Technology*, 12(3): 171-180. (In Persian).
- [5] Tarmian, A., and Mastouri, A. 2019. Changes in moisture exclusion efficiency and crystallinity of thermally modified wood with aging. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 12(1): 92-97.
- [6] Wentzel, M., Altgen, M., and Militz, H. 2018. Analyzing reversible changes in hygroscopicity of thermally modified eucalypt wood from open and closed reactor systems. *Wood Science and Technology*, 52(4): 889-907.
- [7] Dahmardeh Ghaleno, M., and Nazerian, M. 2013. The effects of heat treatment on the mechanical properties of eucalyptus (*Eucalyptus camaldulensis*) wood and changes in physical properties. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 20(1): 1-17. (In Persian).
- [8] Percin, O., Peker, H., and Atilgan, A. 2016. The effect of heat treatment on the some physical and mechanical properties of beech (*Fagus orientalis lipsky*) wood. *Wood Research*, 61(3): 443-456.
- [9] Borůvka, V., Dudík, R., Zeidler, A., and Holeček, T. 2019. Influence of site conditions and quality of birch wood on its properties and utilization after heat treatment. Part I—Elastic and strength properties, relationship to water and dimensional stability. *Forests*, 10(2): 189-210.
- [10] Sikora, A., Kačík, F., Gaff, M., Vondrová, V., Bubeníková, T., and Kubovský, I. 2018. Impact of thermal modification on color and chemical changes of spruce and oak wood. *Journal of Wood Science*, 64(4): 406-416.
- [11] Barčík, Š., Gašparík, M., and Razumov, E. Y. 2015. Effect of temperature on the color changes of wood during thermal modification. *Cellulose chemistry and technology*, 49(9-10): 789-798.
- [12] Ninane, M., Pollet, C., Hébert, J., and Jourez, B. 2021. Physical, mechanical, and decay resistance properties of heat-treated wood by Besson® process of three European hardwood species. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 25(2): 129-139.
- [13] Hajhassani, R., Zamani, S. M., Farzi, M., Mojerlou, S., and Ghahri, S. 2022. Effect of brown rot fungus on the functional characteristics of heat treated wood. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 13(2): 161-170. (In Persian)
- [14] Oladi, R., Gorgij, R., Emaminasab, M., and Nasiriani, S. 2017. Wood anatomy and physical and chemical properties of fast growing Athel tamarisk (*Tamarix aphylla* L.). *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 7(4): 511-522. (In Persian)
- [15] Wheeler, E.A., Baas, P. and Gasson, P.E., 1989. IAWA list of microscopic features for hardwood identification. *IAWA Jomal*, 10:219–332.
- [16] Dastoorian, F., Farhadi, F., Hoseinzadeh, F., and Zabihzadeh, M. (2018). Effect of thermal modification on chemical and physical properties of Iranian Beech (*Fagus orientalis*) and Velvet Maple (*Acer Velutinum*). *Iranian Journal of Wood and paper science research*, 33(1): 142-154. (In Persian)

- [17] Dogu, D., Yilgör, N., Mantanis, G., and Tuncer, F. D. 2017. Structural evaluation of a timber construction element originating from the great metéoron monastery in Greece. *BioResources*, 12(2): 2433-2451.
- [18] Boonstra, M. J., Rijdsdijk, 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.
- [19] Mohammadi Sardo, Gh. Tarmian, A., Azizi, M., Gholamian, H., Zare Hosseinabadi, H. 2022. Investigating the possibility of using plane tree thermowood for use in knotted structures, The fourth national conference of knowledge and innovation in the wood and paper industry, 4 August, Tehran, Iran, (In Persian)
- [20] Mahmoud Kia, M., Tarmian, A., Karimi, A., Abdolkhani, A., and Mastri Farahani, M. 2017. Effect of Bene gum on the physical and mechanical properties of oil-heat treated wood. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 8(3): 361-373. (In Persian)
- [21] Aydemir, D., Gunduz, G., and Onat, S. M. 2010. The impacts of heat treatment on lap joint shear strength of black pine wood. *The Journal of Adhesion*, 86(9): 906-914.
- [22] Mirzaei, G., Mohebbi, B., and 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.
- [23] Tarmian, A. and Mastouri, A. 2018. Water-repellent efficiency of thermally modified wood as affected by its permeability. *Journal of Forestry Research*, 29(3): 859-867.
- [24] Xie, J., Chen, L., Shao, H., He, L., Jiang, Y., Lu, D., ... and Qi, J. 2020. Changes in Physical-Mechanical Properties and Chemical Compositions of *Toona Sinensis* Wood Before and After Thermal Treatment. *Wood Research*, 65(6): 877-884.
- [25] Durmaz, E., Ucuncu, T., Karamanoglu, M., and Kaymakci, A. 2019. Effects of heat treatment on some characteristics of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood. *BioResources*, 14(4): 9531-9543.
- [26] Welzbacher, C. R., Brischke, C., and Otto Rapp, A. 2007. Influence of treatment temperature and duration on selected biological, mechanical, physical and optical properties of thermally modified timber. *Wood Material Science and Engineering*, 2(2): 66-76.
- [27] Chen, Y., Gao, J., Fan, Y., Tshabalala, M. A., and Stark, N. M. 2012. Heat-induced chemical and color changes of extractive-free black locust (*Robinia pseudoacacia*) wood. *BioResources*, 7(2): 2236-2248.
- [28] Výbohá, E., Kučerová, V., Andor, T., Balážová, Ž., and Veřková, V. 2018. The effect of heat treatment on the chemical composition of ash wood. *BioResources*, 13(4): 8394-8408.
- [29] Abe, K., and Yamamoto, H. 2005. Mechanical interaction between cellulose microfibril and matrix substance in wood cell wall determined by X-ray diffraction. *Journal of wood science*, 51(4): 334-338.
- [30] Birkinshaw, C., and Dolan, S. 2009. Mechanism of strength loss in heat treated softwoods. In *Proceedings of the Fourth European Conference on Wood Modification*, Stockholm, Sweden (337-343).
- [31] Sailer, M., Rapp, A. O., and Leithoff, H. 2000. Improved resistance of Scots pine and spruce by application of an oil-heat treatment. *International Research Group Wood Pre. IRG Document No. IRG/WP00-40162*.

The effect of heat treatment on anatomical, physical, color and mechanical properties of birch wood

Abstract

Since the information related to heat treatment of wood by industrial method is mainly related to coniferous wood, this research seeks to investigate the physical and mechanical properties of birch wood after heat treatment in the industrial furnace. For this purpose, birch wood according to the instructions of the Thermowood Association of Finland for the production of Class D Thermowood was used. Water absorption, dry and critical density and 12% Moisture, shrinkage, swelling, and color components ($L^*a^*b^*$), anatomical features and wettability test, mechanical properties of wooden samples including MOE, MOR, impact strength and compression strength parallel to grain were evaluated and compared to the control samples. The results showed that the color of thermos-treated wood has become significantly darker than the control one. In birch wood, the moisture content of heat-treated wood showed a decrease of 117.7% compared with the control sample. The critical density of heat-treated wood showed an increase of 7.3% compared with the control sample. The dry density of the sample after heat treatment showed a decrease of 0.6% compared with the control sample. The density after heat treatment showed an increase of 2.3% compared with the control sample. The shrinkage and swelling of the thermos-treated sample showed a decrease of 100.5% and 115.4%, respectively, compared with the control sample. It was more difficult to prepare the section of the heat-treated wood than the control sample, while destruction of vessels, fibers, and rays was visible. The modulus of elasticity, modulus of rupture, impact strength and compression strength parallel to grain of the heat-treated samples showed a decrease of 3.22, 3.4, 147.97 and 2.95%, respectively, compared with the control sample.

Keywords: Thermowood, Birch, Contact angle, Anatomical properties, Physical properties, Mechanical properties.

A. Samariha

Assistant prof., Department of Wood Industry, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

Corresponding author:
asamariha@tvu.ac.ir

Received: 2023/01/21
Accepted: 2023/02/24