

## تأثیر اصلاح ترکیبی گرمابی-مکانیکی (CHTM) بر ویژگی‌های

### جذب رطوبت و ثبات ابعاد چوب فشرده‌شده صنوبر

- ❖ پیمان فلاح مقدم بهمبری؛ دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران
- ❖ بهبود محبی\*؛ دانشیار، گروه علوم چوب و کاغذ دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران
- ❖ حوری شریف‌نیا دیزبنی؛ دانشجوی دکتری فرآورده‌های چوب، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

#### چکیده

در این پژوهش، اثر دما، زمان ماندگاری و دمای پرس بر ویژگی‌های دانسیته، برگشت ضخامت، جذب رطوبت و ثبات ابعاد چوب فشرده‌شده صنوبر با روش تیمار ترکیبی گرمابی-مکانیکی بررسی شد. ابتدا نمونه‌ها در دماهای ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و در زمان‌های ماندگاری ۰، ۳۰ و ۹۰ دقیقه تیمار گرمابی شدند و سپس به مدت ۲۰ دقیقه در پرس و تحت دماهای ۱۶۰ و ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و با ضریب فشردگی ۶۰ درصد در راستای شعاعی و با اعمال نیروی مکانیکی فشرده شدند. دانسیته، بازگشت فنری، جذب رطوبت و ثبات ابعاد نمونه‌های تیمار شده اندازه‌گیری و با نمونه‌های تیمار نشده مقایسه شدند. نتایج نشان داد که دانسیته نمونه‌های تیمار شده بیش از نمونه‌های تیمار نشده بود. بازگشت فنری با افزایش دمای تیمار گرمابی کاهش یافت. افزایش دمای تیمار نیز میزان جذب رطوبت در نمونه‌ها را کاهش داد. هرچند با افزایش میزان رطوبت نسبی، جذب رطوبت نمونه‌ها بیشتر شد، این افزایش در نمونه‌های تیمار شده بیش از نمونه‌های تیمار شده بود. افزایش زمان ماندگاری تأثیر زیادی بر میزان جذب رطوبت نداشت، اما افزایش دمای پرس نیز سبب کاهش جذب رطوبت در تیمارهای مختلف شد. با افزایش دمای تیمار و دمای پرس واکنش‌دهی شعاعی به مقدار چشمگیری کاهش یافت؛ هرچند این کاهش چندان معنی‌دار نبود. در کل نتایج این بررسی نشان داد که روش ابداعی تیمار ترکیبی گرمابی-مکانیکی بر ویژگی‌های چوب فشرده‌شده اثرهای خوبی دارد و قابل اجراست.

واژگان کلیدی: تیمار ترکیبی گرمابی-مکانیکی، ثبات ابعاد، جذب رطوبت، صنوبر.

## مقدمه

اصلاح مکانیکی چوب از طریق افزایش دانسیته<sup>۱</sup>، فرایندی است که طی آن دانسیته چوب با اعمال فشار روی آن (فشرده‌سازی)، اشباع حفره‌های چوب با ماده سیال یا ترکیب این دو روش افزایش می‌یابد. فشرده‌سازی به کاهش فضای متخلخل چوب منجر شده و خود سبب افزایش دانسیته می‌شود. چوب به دلیل رفتار الاستیک، پس از فشرده شدن به بازگشت به شکل اولیه خود تمایل دارد؛ یعنی وقتی فشار برداشته می‌شود و چوب در معرض رطوبت قرار می‌گیرد، شکل قبلی خود را باز می‌یابد. این پدیده به اثر حافظه<sup>۲</sup> شکل<sup>۳</sup> مشهور است و میزان بازگشت نیز بازایی<sup>۴</sup> شکل<sup>۳</sup> نامیده می‌شود [۱-۷]. برای رفع بازایی شکل و بازگشت فنری<sup>۴</sup> نمونه‌های فشرده‌شده، می‌توان از روش‌های گوناگونی مانند تیمار گرمایی همزمان با فشرده‌سازی، پیش‌تیمار و پس‌تیمار بخاردهی و همچنین روش گرمایی-مکانیکی استفاده کرد [۵].

پژوهشگران زیادی اثر تیمارهای گرمایی بر ساختار شیمیایی و تغییر کریستالیت<sup>۵</sup> چوب را گزارش کرده‌اند [۶-۱۰]. این تغییرات بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چوب تأثیر می‌گذارند.

براساس بررسی‌های پژوهشگران پیشین، مشخص شده است که اصلاح گرمایی، به‌عنوان یکی از روش‌های تیمار گرمایی، سبب کاهش آب‌دوستی و افزایش ثبات ابعاد چوب می‌شود [۱۱، ۱۲] و مقاومت چوب را در برابر عوامل مخرب قارچی زیاد می‌کند.

با تیمار گرمایی بلورینگی سلولز [۶، ۷] و نیز مدول الاستیسیته افزایش می‌یابد [۱۳]. ترکیبات دیواره‌های سلولی در طی تیمارهای گرمایی دچار تغییرات شیمیایی شده و به ترکیبات جدیدی تبدیل می‌شوند که ویژگی آب‌گریزی چوب و مواد لیگنوسلولزی را افزایش می‌دهند.

جذب آب و رطوبت در چوب‌های فشرده‌شده از اساسی‌ترین مشکلاتی است که ویژگی‌های مکانیکی، فیزیکی و دوام زیستی چوب را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اساساً افزایش رطوبت در چوب موجب کاهش ویژگی‌های مکانیکی و همچنین ثبات ابعاد می‌شود [۱۳]. به‌عبارتی، جذب رطوبت از شاخص‌های محدودکننده کاربردهای نهایی مواد چوبی در درازمدت محسوب می‌شود. همین نکته در چوب‌های فشرده نیز مشکل‌آفرین است.

بنابراین کاهش جذب رطوبت سازه‌های چوبی ضروری به‌نظر می‌رسد. کوشش‌های زیادی نیز برای اصلاح و کاهش جذب آب مواد چوبی انجام گرفته است. یکی از روش‌های مؤثر در کاهش جذب رطوبت، اصلاح گرمایی چوب است. گزارش‌ها نشان می‌دهند که اصلاح گرمایی، می‌تواند مقاومت چوب نسبت به جذب آب و رطوبت را افزایش دهد [۶، ۱۳]. بدین سبب، این روش می‌تواند راه خوبی برای حل مشکل مورد اشاره باشد.

تیمار گرمایی-مکانیکی فرایندی است که پیشتر به‌عنوان یکی از روش‌های اصلاح چوب، برای تولید چوب‌های فشرده با ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی بهبودیافته و دوام بیولوژیکی بالا به‌کار رفته است [۵].

در این روش چوب در داخل سیلندر فشرده شده و همراه با فشرده‌سازی بخار آب داغ وارد محفظه فشار

1. Densification
2. Shape memory
3. Set recovery
4. Springback

داده شدند؛ سپس در داخل رآکتور حاوی آب، در دماهای ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و طی زمان‌های ماندگاری ۰، ۳۰ و ۹۰ دقیقه تیمار گرمایی شدند. سپس نمونه‌ها به مدت ۲۰ دقیقه، در پرس و تحت دماهای ۱۶۰ و ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و با ضریب فشردگی ۶۰ درصد در جهت شعاعی (ضخامت) فشرده شدند. چوب مورد نیاز برای هر یک از آزمون‌ها و براساس استاندارد مورد نظر برش داده شده و آزمایش شد.

### آزمون تعیین دانسیته

دانسیته نمونه‌ها براساس استاندارد ASTM-D2395 محاسبه شد [۱۶]. نمونه‌هایی به ابعاد ۲×۲×۲ سانتی‌متر تهیه و به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۱۰۳±۲ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. وزن و ابعاد نمونه‌ها پیش و پس از تیمار اندازه‌گیری شدند و دانسیته خشک نیز با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد:

$$D_o = \frac{M_o}{V_o} \quad (1)$$

$D_o$  = دانسیته خشک ( $g/cm^3$ )،  $M_o$  = جرم خشک نمونه ( $g$ )،  $V_o$  = حجم خشک نمونه ( $cm^3$ )

### آزمون تعیین برگشت ضخامت یا بازگشت

#### فنری

پس از خشک کردن نمونه‌های فشرده‌شده در آون، ضخامت آنها به وسیله کولیس در سه نقطه از طول که از قبل مشخص بودند، اندازه‌گیری شد تا میزان بازگشت فنری ضخامت با رابطه ۲ محاسبه شود.

$$S = \frac{T_2 - T_1}{T_1} \times 100 \quad (2)$$

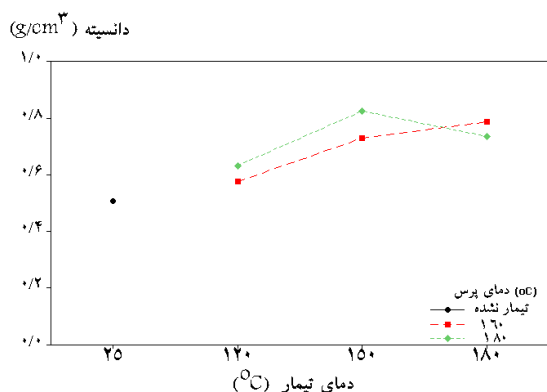
$S$  = بازگشت فنری (%)،  $T_2$  = بعد پس از خشک شدن ( $mm$ )،  $T_1$  = بعد پس از فشردگی ( $mm$ )

می‌شود تا همزمان علاوه بر نرم کردن چوب، سبب تأثیرگذاری گرمای بخار داغ بر تثبیت ابعاد چوب و جلوگیری از بازگشت فنری شود. استفاده از این روش اثر خوبی بر تثبیت ابعاد چوب فشرده دارد. تاکنون نیز گزارشی درباره ترکیب همزمان با دو روش تیمار اصلاحی چوب در فرایند فشرده‌سازی گزارش نشده است. اخیراً گزارشی درباره ابتکار تیمار ترکیبی گرمایی-مکانیکی توسط شریف‌نیا دیزبنی، محبی و همکاران، شریف‌نیا دیزبنی [۱۴، ۱۵] گزارش شده است. در این روش چوب ابتدا تیمار گرمایی می‌شود و سپس فرایند فشرده‌سازی انجام می‌گیرد. با توجه به ابتکاری بودن روش و نبود اطلاعات کافی درباره اثر شاخص‌های تیمار بر ویژگی‌های چوب، این پژوهش در پی بررسی تأثیر دما، زمان ماندگاری تیمار گرمایی و اثر دمای پرس بر ویژگی دانسیته، برگشت ضخامت، جذب رطوبت و ثبات ابعاد چوب فشرده‌شده صنوبر با روش تیمار ترکیبی گرمایی-مکانیکی بوده است تا بتواند شدت اثرگذاری هر یک از این تیمارها را بنمایاند.

### مواد و روش‌ها

در این پژوهش از نمونه‌های ساخته‌شده به روش گرمایی-مکانیکی استفاده شد که شیوه ساخت آنها قبلاً توسط محبی و همکاران [۱۴] گزارش شده است. نمونه‌های چوب مورد نیاز از درختان صنوبر (*Populus deltoids* Clone no. ۷۹/۵۱) با قطر ۶۰ سانتی‌متر از مؤسسه تحقیقات صنوبر صفرابسته تهیه و براساس روش گفته‌شده در گزارش محبی و همکاران [۱۴] برش داده شدند. بلوک‌های چوب صنوبر قبل از تیمار به مدت ۲۴ ساعت در آب قرار

دانسیتته نیز افزایش یافت. اما فشردن نمونه‌های تیمار شده در دمای پرس ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد، در ابتدا اثر فزاینده قابل توجهی بر دانسیته نسبت به نمونه‌های تیمار نشده داشت و سپس کاهش اندکی را نشان داد. هرچند نمونه‌های فشرده شده همگی از دانسیته بالاتری برخوردار بودند.



شکل ۱. اثر متقابل دمای تیمار گرمایی و دمای پرس بر دانسیته خشک

بررسی اثر متقابل زمان ماندگاری در تیمار گرمایی و دمای پرس نیز نشان داد که دانسیته نمونه‌های تیمار شده به روش تیمار ترکیبی گرمایی- مکانیکی بیش از نمونه‌های شاهد بود. دانسیته چوب فشرده شده در زمان‌های ماندگاری صفر و ۹۰ دقیقه دمای پرس تفاوت چندانی با یکدیگر نداشتند (شکل ۲)؛ ولی در زمان ماندگاری ۳۰ دقیقه، با افزایش دمای پرس، دانسیته اندکی افزایش نشان داد.

بررسی اثر متقابل دمای تیمار گرمایی و زمان ماندگاری نیز نشان داد که با افزایش همزمان دمای راکتور و زمان ماندگاری، دانسیته چوب فشرده شده نسبت به نمونه‌های تیمار نشده افزایش زیادی را نشان داد (شکل ۳) و در میان نمونه‌های تیمار شده مشخص شد که دانسیته نمونه‌ها با افزایش زمان ماندگاری تا ۳۰ دقیقه نخست اندکی افزایش می‌یابد و سپس

## آزمون جذب رطوبت و واکنشیدگی

برای تعیین جذب رطوبت و واکنشیدگی ضخامت مواد چوبی مورد بررسی، پنج نمونه به ابعاد ۲۰×۲۰×۲۰ میلی‌متر از هر تیمار بریده شده و به مدت ۲۴ ساعت در دمای  $10.3 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد در آون خشک شدند. نمونه‌ها به مدت پانزده روز در رطوبت‌های نسبی ۴۰، ۸۰ و ۹۵ درصد و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند تا به تعادل رطوبتی برسند. مقدار جذب رطوبت و واکنشیدگی ضخامت در درصدهای رطوبت نسبی مختلف به ترتیب طبق روابط ۳ و ۴ محاسبه شدند.

$$A = [(W_w - W_0)/W_0] \times 100 \quad (3)$$

$A =$  مقدار جذب رطوبت (%)،  $W_w =$  وزن نمونه پس از قرار گرفتن در شرایط مرطوب (g)،  $W_0 =$  وزن خشک نمونه (g)

$$S = [(S_w - S_0)/S_0] \times 100 \quad (4)$$

$S =$  مقدار واکنشیدگی (%)،  $S_w =$  واکنشیدگی پس از قرار گرفتن در شرایط مرطوب (g)،  $S_0 =$  ضخامت خشک نمونه (g)

## نتایج و بحث

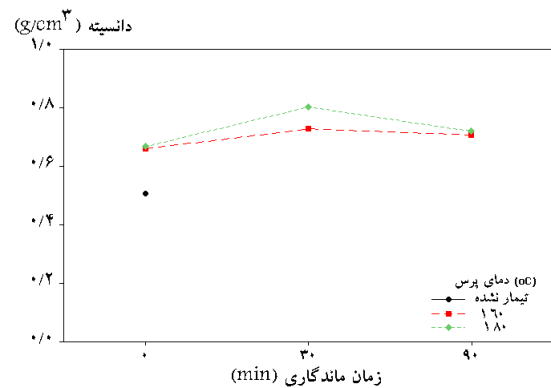
**دانسیته** - نتایج نشان داد که دمای تیمار گرمایی و توأم شدن آن با دمای پرس نقش چشمگیری بر دانسیته نمونه‌های فشرده شده به روش تیمار ترکیبی گرمایی- مکانیکی دارد. به نحوی که همه نمونه‌های فشرده شده دانسیته‌ای بیش از نمونه‌های تیمار نشده داشتند (شکل ۱). در ترکیب دمای تیمار و دمای پرس، مشخص شد که فشردن نمونه‌های تیمار شده در پرس با دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد، سبب افزایش دانسیته شد. به نحوی که با افزایش دمای تیمار،

کنار این پدیده، همراه شدن دمای پرس بر انعطاف‌پذیری بیشتر چوب تیمار شده که از قبل نیز نرم شده بودند کمک می‌کند؛ از این رو در ترکیب دمای تیمار گرمایی و دمای پرس، میزان افزایش دانسیته نیز چشمگیر شده است. گرما سبب نرمی بافت چوب و افزایش انعطاف‌پذیری آن می‌شود. پس می‌توان گفت که ایده تیمار گرمایی پیش از فشردن چوب در زیر پرس کارآمد است.

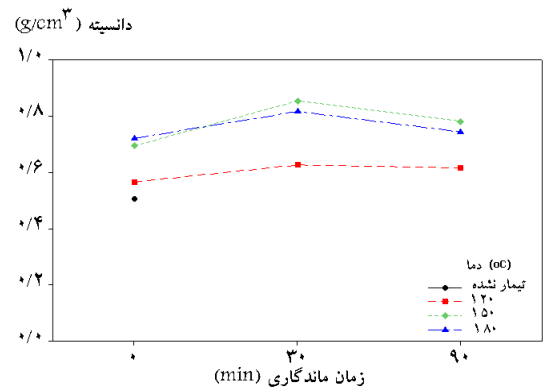
از آنجا که بر اثر افزایش دمای تیمار گرمایی، بسیاری از قند دیواره‌های سلولی دچار تخریب می‌شوند و به پلی‌اوزها و اسید استیک، اسید فرمیک و فورفورال و ترکیبات دیگری تبدیل می‌شوند [۱۲]؛ تشکیل این ترکیبات با افزایش دما بیشتر می‌شود و در صورت اعمال تیمار در زمان‌های طولانی‌تر خروج این مواد تسریع می‌گردد و بر اثر ایجاد ساختاری متخلخل در دیواره سلولی، پدیده چین‌خوردگی روی می‌دهد [۱۷-۱۹]؛ از این رو فرو ریختن دیواره‌های سلولی، افزایش جرم ماده به حجم واحد و در نتیجه بالاتر رفتن دانسیته را به همراه خواهد داشت. با توجه به ادامه اعمال تیمار گرمایی در زمان‌های مختلف و خروج مجدد مواد تخریب‌شده از دیواره سلولی، بروز پدیده چین‌خوردگی میسر است [۱۷-۱۹]. بدین سبب، تیمار گرمایی در دمای شدیدتر میزان تخریب را در دیواره‌های سلولی چوب تشدید می‌کند. با افزایش دما و تخریب بیشتر دیواره‌های سلولی، افت دانسیته نیز توجیه‌پذیر خواهد بود.

در بیان دلیل افزایش دانسیته در اثر افزایش دمای پرس، می‌توان به افزایش انعطاف‌پذیری سلول‌های چوبی و بهتر فشردن آنها در زیر بار پرس اشاره

کاهش کمی نشان می‌دهد. به طور کلی دانسیته نمونه‌های تیمار شده بیشتر از نمونه‌های شاهد بود. افزایش دمای تیمار گرمایی نیز سبب افزایش دانسیته چوب فشرده شد. بر اساس نمودار بیشترین دانسیته در دمای تیمار  $150^{\circ}\text{C}$  و زمان ماندگاری ۳۰ دقیقه به دست آمد (شکل ۳).



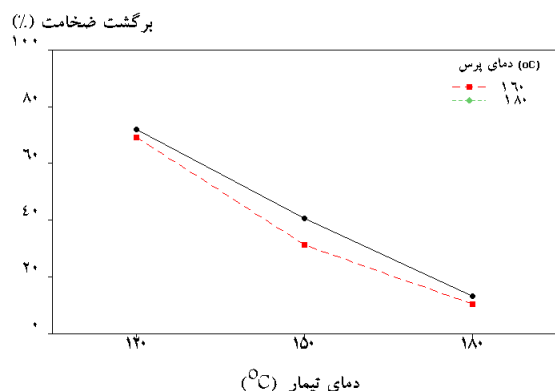
شکل ۲. اثر متقابل زمان ماندگاری تیمار گرمایی و دمای پرس بر دانسیته خشک



شکل ۳. اثر متقابل دمای تیمار گرمایی و زمان ماندگاری بر دانسیته خشک

بر اساس نتایج می‌توان گفت که افزایش دمای تیمار گرمایی سبب نرم شدن دیواره‌های سلولی می‌شود و قابلیت انعطاف‌پذیری آنها را در زیر فشار مکانیکی افزایش می‌دهد. بدین سبب افزایش دانسیته با افزایش دمای تیمار گرمایی توجیه‌پذیر است. در

بررسی همزمان دمای تیمار گرمابی و دمای پرس نشان داد که در هر دو دمای پرس با افزایش دما بازگشت فنری به میزان چشمگیری کاهش یافت؛ ولی تفاوت چندانی بین دماهای پرس ۱۶۰ و ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد وجود نداشت (شکل ۵). پس می‌توان گفت که اثرگذاری تیمار گرمابی بسیار بیشتر از دمای پرس است.

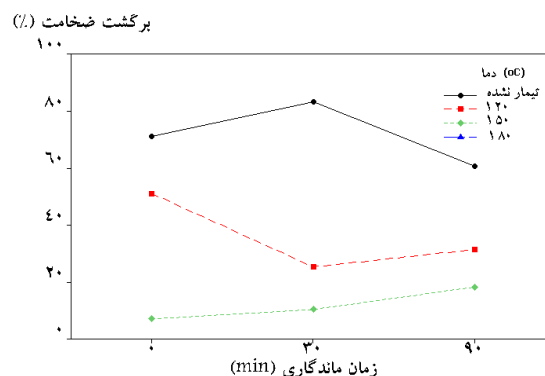


شکل ۵. اثر متقابل دمای تیمار گرمابی و دمای پرس بر برگشت ضخامت

با بررسی اثر همزمان دمای پرس و مدت زمان تیمار گرمابی می‌توان دریافت که افزایش زمان ماندگاری، تأثیر چندانی روی بازگشت فنری نمونه‌های فشرده‌شده در ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد نداشت (شکل ۶)؛ هر چند نمونه‌هایی که به مدت-های ۳۰ و ۹۰ دقیقه تیمار گرمابی شده بودند، در صورت فشرده شدن در دمای پرس ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد اندکی با افت بازگشت فنری مواجه شدند. از بررسی اثر فاکتورهای اعمال‌شده چنین برآمد که تیمار ترکیبی گرمابی-مکانیکی سبب کاهش بازگشت فنری در چوب تیمار شده صنوبر می‌شود و از میان فاکتورهای مزبور، دمای تیمار گرمابی بارزترین نقش را در کاهش بازگشت فنری و حفظ

کرد. در کنار افزایش میزان نرم‌شدگی دیواره‌های سلولی بر اثر افزایش دمای تیمار گرمابی و طولانی‌تر شدن زمان ماندگاری، دمای پرس نیز پس از آنها بر افزایش انعطاف‌پذیری دیواره‌های سلولی کمک می‌کند و افزایش دانسیته نمونه‌های فشرده‌شده را سبب می‌شود.

**برگشت ضخامت یا بازگشت فنری - بررسی اثر متقابل زمان و دمای تیمار گرمابی نشان داد که با افزایش همزمان این دو عامل بازگشت فنری کاهش می‌یابد؛ به‌نحوی که بیشترین بازگشت فنری مربوط به نمونه‌های ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد بود و نمونه‌های تیمار شده در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد کمترین بازگشت فنری را داشتند (شکل ۴). تفاوت بین مقادیر بازگشت فنری نمونه‌های تیمار شده در دمای ۱۵۰ و ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد در زمان ماندگاری صفر زیاد بود؛ ولی در زمان‌های ماندگاری ۳۰ و ۹۰ دقیقه کمتر شد و روند آن‌ها نیز افزایشی بود. بررسی‌های ناوی و گیراردت [۴] نیز نشان داد که افزایش دمای بخار آب در زمان فشردن چوب و زمان تیمار سبب کاهش بازگشت فنری چوب فشرده می‌شود. این روش ابداعی نیز نشان داد که تیمار گرمابی اثر مشابهی دارد.**



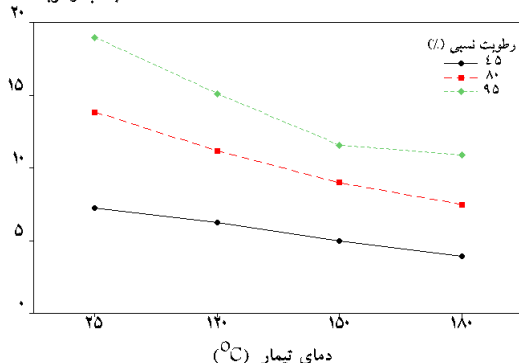
شکل ۴. اثر متقابل دمای تیمار گرمابی و زمان ماندگاری بر برگشت ضخامت

ماده‌ای گرمانرم<sup>۱</sup> است، بر اثر افزایش دمای تیمار نرم‌تر می‌شود و قابلیت انعطاف‌پذیری چوب را بیشتر می‌کند. از این رو از یک سو، بر اثر بروز پیوندهای عرضی و تراکم بسیار لیگنین که بر اثر تیمار گرمایی روی می‌دهد، لیگنین به ماده‌ی منسجمی تبدیل می‌شود و از سوی دیگر بر اثر اعمال فشار (پرس گرم) فرصت بیشتری به انسجام لیگنین و تشکیل پیوندهای جدیدتر داده می‌شود. بر اثر تشکیل پیوندهای عرضی در لیگنین و سلولز و افزایش بلورینگی سلولز، قابلیت بازگشت چوب به حالت قبل از فشار کمتر می‌شود.

#### جذب رطوبت و واکنش‌دهی - نتایج نشان داد که

با افزایش دمای تیمار گرمایی جذب رطوبت چوب فشرده‌شده صنوبر نیز کاهش می‌یابد (شکل ۷) و مدت زمان تیمار اثرگذاری اندکی در کاهش جذب رطوبت دارد و حتی بین زمان‌های ماندگاری تیمار ۳۰ و ۹۰ دقیقه نیز تفاوت چندانی وجود ندارد (شکل ۸). دمای پرس نیز اثر کاهشی بر جذب آب دارد و در اثر افزایش دمای پرس از ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد به ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد تأثیر زیادی در جذب رطوبت مشاهده می‌شود (شکل ۹).

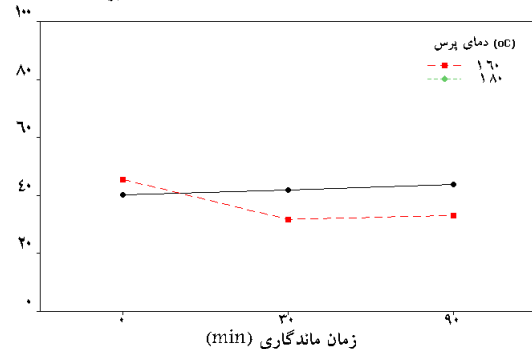
جذب رطوبت (%)



شکل ۷. اثر متقابل دمای تیمار و رطوبت نسبی بر جذب رطوبت

ابعاد چوب فشرده‌شده ایفا می‌کند. پس از آن نقش دمای پرس شایان ملاحظه است. نقش مدت زمان تیمار، چندان برجسته نیست. بر اساس نتایج، با افزایش دمای تیمار گرمایی می‌توان از بازگشت فنی چوب فشرده‌شده کاست و ثبات ابعاد آن را افزایش داد. همچنین می‌توان با افزودن دمای پرس در مدت زمان کمتری به تثبیت ابعاد بالاتری رسید یا اینکه در دمای پایین‌تر پرس، می‌توان با طولانی‌تر شدن مدت زمان تیمار گرمایی به ثبات ابعاد بالاتری نایل شد.

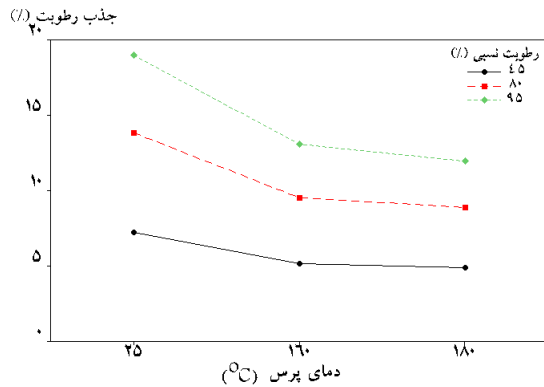
برگشت ضخامت (%)



شکل ۸. اثر متقابل زمان ماندگاری تیمار گرمایی و دمای پرس بر برگشت ضخامت

درباره تأثیر دمای تیمار گرمایی می‌توان گفت که بر اثر تیمار، بسیار همی سلولز دچار تخریب می‌شود [۱۲] و با بالاتر بردن دمای تیمار گرمایی یا افزودن مدت زمان تیمار بر تخریب آنها افزوده می‌شود. بر اثر تخریب همی سلولزها و خروج آنها از فضای درونی میکروفیبریل‌ها (بین سلولز و لیگنین) پدیده آزادسازی تنش در سلولز روی می‌دهد و سلولز فضای کافی برای نوآرایی پیدا می‌کند [۵]. این امر سبب ایجاد پیوندهای عرضی در سلولز می‌شود که بر استحکام و انسجام آن می‌افزاید و به افزایش بلورینگی می‌انجامد. در کنار این پدیده لیگنین که

فشرده شده بیش از نمونه‌های شاهد (فشرده نشده) بود، اما واکنشیدگی مماسی چوب‌های فشرده شده کمتر از نمونه‌های تیمار نشده بود (شکل ۹).



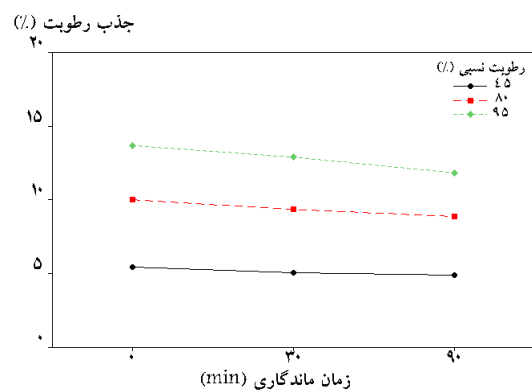
شکل ۹. اثر متقابل دمای پرس و رطوبت نسبی بر جذب رطوبت؛ دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نشان‌دهنده نمونه تیمار نشده است

بیشترین واکنشیدگی در نمونه‌های تیمار شده در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد و کمترین واکنشیدگی نیز در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. به‌طور کلی واکنشیدگی شعاعی در نمونه‌های تیمار شده بیشتر از نمونه‌های تیمار نشده بود، اما واکنشیدگی مماسی کمتر بود. با توجه به دانسیته بیشتر نمونه‌های تیمار شده و بالا بودن جرم ماده در واحد حجم این پدیده توجیه‌پذیر به‌نظر می‌رسد. افزایش واکنشیدگی در جهت شعاعی در دمای تیمار ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد را می‌توان به برگشت فوری بیشتر نمونه‌ها نسبت به تیمار ۱۵۰ و ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد نسبت داد (شکل ۴).

نتایج حاصل از تأثیر همزمان دمای تیمار گرمایی و رطوبت نسبی بر واکنشیدگی مماسی نشان داد که تیمار گرمایی-مکانیکی سبب کاهش واکنشیدگی مماسی شد. افزایش دمای تیمار از ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد به ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد تأثیر زیادی بر کاهش واکنشیدگی نداشت؛ ولی کماکان تأثیر

باید اشاره کرد که افزایش رطوبت نسبی محیط سبب افزایش جذب رطوبت نمونه‌ها شد، اما این افزایش در چوب‌های تیمار نشده بیشتر از چوب‌های تیمار شده بود (شکل‌های ۷ و ۹).

افزایش رطوبت نسبی سبب افزایش درصد جذب رطوبت شد، اما تفاوتی در میزان افزایش جذب رطوبت در زمان‌های مختلف تیمار گرمایی مشاهده نشد (شکل ۸).



شکل ۸. اثر متقابل زمان ماندگاری تیمار گرمایی و رطوبت نسبی بر جذب رطوبت

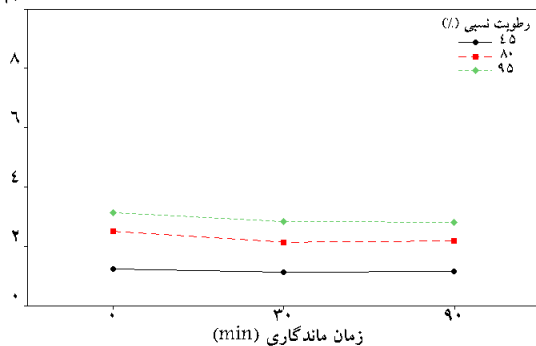
تأثیر همزمان دمای پرس و رطوبت نسبی نشان داد که فشردن چوب تیمار شده در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد سبب کاهش میزان جذب رطوبت چوب شد، ولی افزایش دمای پرس به ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد تأثیر زیادی بر میزان جذب رطوبت نداشت (شکل ۹). در کل افزایش رطوبت نسبی محیط سبب افزایش میزان جذب رطوبت شد، اما این افزایش در نمونه‌های تیمار نشده بیشتر از نمونه‌های تیمار شده بود.

نتایج تأثیر همزمان دمای تیمار گرمایی چوب صنوبر و رطوبت نسبی محیط بر واکنشیدگی چوب فشرده شده در جهت شعاعی نشان داد که افزایش دمای تیمار گرمایی از واکنشیدگی چوب فشرده می‌کاهد (شکل ۱۰)؛ هرچند مقدار آن در نمونه‌های

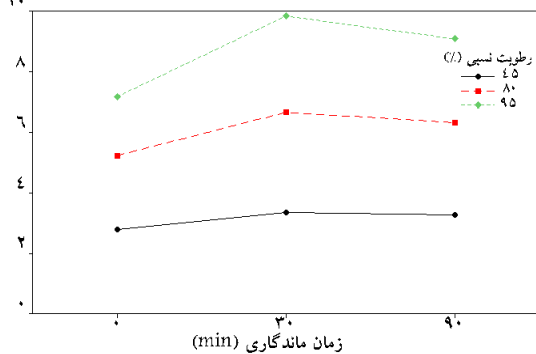


نتایج حاصل از تأثیر مدت زمان ماندگاری در تیمار گرمایی و رطوبت نسبی بر واکنش‌دهی در جهت‌های شعاعی و مماسی چوب فشرده‌شده نشان داد که افزایش زمان ماندگاری اثر چندانی بر میزان واکنش‌دهی ندارد (شکل ۱۱). هر چند افزایش رطوبت نسبی محیط در افزایش واکنش‌دهی اثرگذار بود و این افزایش در واکنش‌دهی شعاعی نمایان‌تر از واکنش‌دهی مماسی بود (شکل ۱۱).

واکنش‌دهی در جهت مماسی (%)



واکنش‌دهی در جهت شعاعی (%)

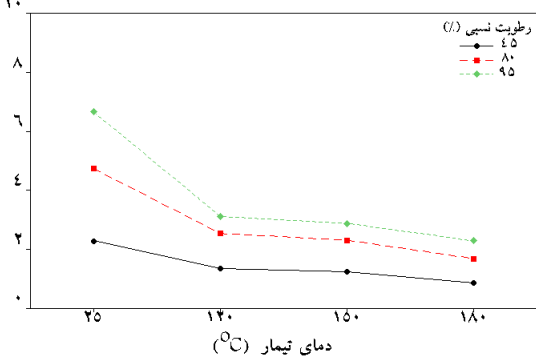


شکل ۱۱. اثر متقابل زمان ماندگاری و رطوبت نسبی بر واکنش‌دهی در جهت شعاعی و مماسی

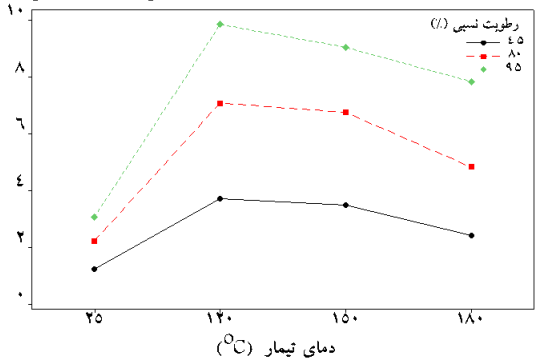
بررسی اثر دمای پرس و رطوبت نسبی محیط بر واکنش‌دهی شعاعی و مماسی نیز نشان‌دهنده عدم تأثیرگذاری نقش دماهای پرس بود (شکل ۱۱). هر چند همانند نتایج پیشین افزایش رطوبت نسبی محیط

کاهندگی دما بر کاهش واکنش‌دهی مماسی مشاهده شد (شکل ۱۰). افزایش رطوبت نسبی سبب افزایش واکنش‌دهی مماسی شد، به طوری که این افزایش در نمونه‌های تیمارنشده بیشتر از نمونه‌های تیمارنشده بود. در اینجا نیز می‌توان دلیل بالا بودن نسبی واکنش‌دهی شعاعی را به پدیده بازگشت فنری نمونه‌ها نسبت داد. پایین‌تر بودن کلی واکنش‌دهی مماسی، به جهت شعاعی وارد آمدن نیروها در هنگام فشردن مربوط است که سبب بیشترین فشردگی در این جهت شده است. از سوی دیگر، گرما نیز عملی اساسی در تیمار شدن چوب و کاهش واکنش‌دهی است.

واکنش‌دهی در جهت مماسی (%)



واکنش‌دهی در جهت شعاعی (%)



شکل ۱۰. اثر متقابل دمای تیمار و رطوبت نسبی بر واکنش‌دهی در جهت شعاعی و مماسی؛ دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نشان‌دهنده نمونه تیمارنشده است

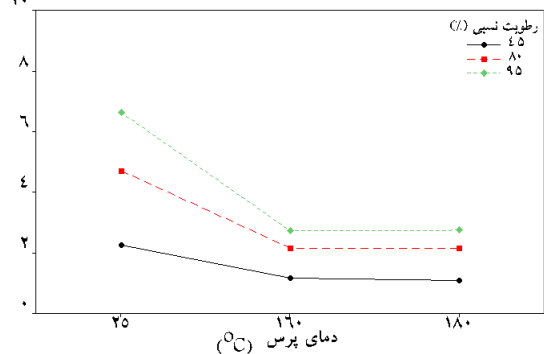
آن گروه‌های هیدروکسیل به‌آسانی در دسترس مولکول‌های آب نیستند، تشکیل پیوند هیدروژنی با مولکول‌های آب پیرامونی کمتر می‌شود، در نهایت جذب آب و همچنین واکنش‌پذیری ناشی از آن نیز افت چشمگیری می‌یابد [۶].

کاهش واکنش‌پذیری به نقش تیمارهای گرمایی در تشکیل پیوندهای عرضی بسپارهای دیواره سلولی و همچنین تغییر ماهیت شیمیایی الیاف باز می‌گردد [۱۸]. در چوب‌های فشرده‌شده، استفاده از آنالیزهای UV رخ دادن فرایندهای تراکمی لیگنین و ایجاد سایر ساختارهای آروماتیکی طی تیمار گرمایی، مانند فورفورال یا متیل فورفورال را تأیید می‌کند. از سویی دیگر، پیوندهای عرضی بیشتر در لیگنین مانعی هستند که از دسترسی به گروه‌های هیدروکسیل آزاد جلوگیری می‌کنند [۲۰]. همچنین با افزایش دمای تیمار گرمایی، فرآورده‌های بیشتری بر اثر تخریب همی سلولز ایجاد می‌شوند که برای شرکت در واکنش‌های پلیمری شدن لیگنین شرکت می‌کنند و از حضور بنیان‌های پلی‌ساکارید آب‌دوست کاسته می‌شود [۴، ۵]. بنابراین باید گفت که با تغییر ساختار شیمیایی و غیرقطبی‌تر شدن ماهیت شیمیایی دیواره‌های سلولی بر اثر تیمار گرمایی، تمایل به جذب آب و رطوبت کمتر می‌شود و در نهایت کاهش واکنش‌پذیری را به‌همراه دارد.

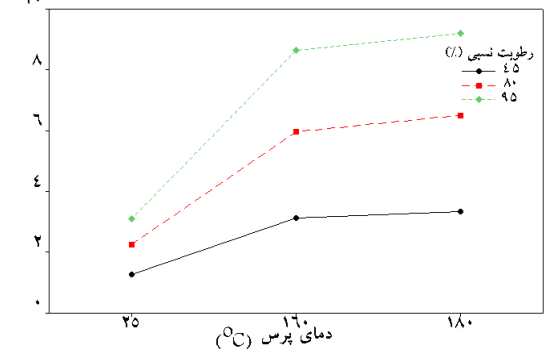
همی سلولزها که اساساً در چوب طبیعت آب‌دوستی دارند، در جریان تیمار گرمایی تخریب و آبکافت شده و به ساختارهای آلدئیدی و فورفورال تبدیل می‌شوند [۱۲]. اثر از بین رفتن همی سلولزها کاهش پایگاه‌های آب‌دوست در دیواره‌های سلولی است. اساساً در تیمارهای گرمایی، در دماهای بالاتر و

سبب افزایش واکنش‌پذیری شعاعی چوب‌های فشرده‌شده شد؛ اما اثرگذاری آن بر واکنش‌پذیری مماسی زیاد نبود (شکل ۱۲). دلیل بالاتر بودن نسبی واکنش‌پذیری شعاعی نسبت به نمونه شاهد، به بازگشت فنری و آزاد شدن بخشی از تنش‌های فشرده‌سازی مربوط است. شعاعی بودن جهت وارد آمدن نیروهای فشرده‌سازی نیز عاملی برای پایین بودن واکنش‌پذیری مماسی است.

واکنش‌پذیری در جهت مماسی (%)



واکنش‌پذیری در جهت شعاعی (%)



شکل ۱۲. اثر متقابل دمای پرس و رطوبت نسبی بر واکنش‌پذیری در جهت شعاعی و مماسی؛ دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نشان‌دهنده نمونه تیمار نشده است

براساس گزارش‌ها در اثر تیمارهای گرمایی، بلورینگی سلولز افزایش [۶-۹] و نواحی آمورف کاهش می‌یابد. با افزایش نسبی سلولز بلوری که در

### نتیجه‌گیری

این بررسی نشان داد که ایده ترکیب تیمار گرمایی چوب پیش از فشردن آن و همراه شدن تیمار با پرس گرم اثر چشمگیری بر کاهش مشکل بازگشت فنی و جذب رطوبت چوب فشرده دارد و از سویی دیگر، سبب افزایش دانسیته چوب می‌شود. این نکته، کارامدی تیمار ترکیبی گرمایی-مکانیکی را نشان می‌دهد.

در حضور آب، وابسپارش و آبکافت ترکیبات بسیاری چوب تسریع می‌شود [۷] و بدین سبب این فرایندها در افزایش ویژگی آب‌گریزی چوب اثرگذارند و سبب می‌شوند که خاصیت آب‌گریزی چوب افزایش یابد. درباره بالاتر بودن واکنشیدگی شعاعی نمونه‌های فشرده‌شده نسبت به نمونه‌های فشرده‌نشده می‌توان گفت که دانسیته مهم‌ترین نقش را در این زمینه ایفا می‌کند. در جهت شعاعی چوب‌های فشرده‌شده مقدار ماده چوبی بیشتری نسبت به نمونه‌های فشرده‌نشده وجود دارد. بنابراین، اندکی بالاتر بودن واکنشیدگی شعاعی در این نمونه‌ها پذیرفتنی است.

## References

- [1]. Dwianto, W., Inoue, M., and Norimoto, M. (1997). Fixation of deformation of wood by heat treatment. *Makuzai Gakkaishi*, 43 (4): 303-309.
- [2]. 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. *Holzforschung*, 52 (2): 211-216.
- [3]. Ito, Y., Tanahashi, M., Shigematsu, M., and Shinoda, Y., (1998b). Compressive-molding of wood by high-pressure steam-treatment: II. Mechanism of permanent fixation. *Holzforschung*, 52 (2): 217-221.
- [4]. Navi, P., and Girardet, F. (2000). Effects of thermo-hydro-mechanical treatment on the structure and properties of wood. *Holzforschung*, 54 (3): 287-293.
- [5]. Navi, P., and Heger, F. (2004). Combined densification and thermo-hydro-mechanical processing of wood. *MRS Bulletin*, 29 (5): 332-336.
- [6]. 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.
- [7]. Garrote, G., Dominguez, H., and Parajó, J.C. (1999). Hydrothermal processing of lignocellulosic materials. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 57 (3): 191-202.
- [8]. Bhuiyan, M.R.T., Hirai, N., and Sobue, N. (2002). Changes of crystallinity in wood cellulose by heat treatment under dried and moist conditions. *Wood Science*, 46: 431-436.
- [9]. Dwianto, W., Morooka, T., and Norimoto, M. (2000). Compressive creep of wood under high temperature steam. *Holzforschung*, 55: 104-108.
- [10]. Kubojima, Y., Ohtani, T., and Yoshikara, H. (2003). Effect of shear deflection on bending properties of compressed wood. *Wood and Fiber Science*, 36(2): 310-215.
- [11]. 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*, 52: 107-110.
- [12]. 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.
- [13]. Welzbacher, C.R., Rapp, A.O., Hallel, P. and Wehsener, J. (2008). Biological and mechanical properties of densified and thermally modified Norway Spruce. In: *The Second European Conference on Wood Modification*. Oct 6-7<sup>th</sup> Göttingen, Germany: 20-27.
- [14]. Mohebbi, B., Sharifnia-Dizboni, H., and Kazemi-Najafi, S. (2009). Combined hydro-thermo-mechanical modification (CHTM) as an innovation in mechanical wood modification. *The Fourth European Conference on Wood Modification*, 27-29<sup>th</sup> April, Stockholm, Sweden: pp. 353-362.
- [15]. Sharifnia-Dizboni, H., and Mohebbi, B. (2008). Enhanced mechanical properties of poplar wood by a combined-hydro-thermo-mechanical (CHTM) modification. *J. Society of Wood Science and Technology*, 1 (1): 57-66.
- [16]. *Standard Test Methods for Specific Gravity of Wood and Wood-Based Materials Annual Book of ASTM Standard*, ASTM D 2395-02, 2002.
- [17]. Boonstra, M.J., Rijdsdijk, J.F., Sander, C., Kegel, E., Tjeerdsma, B., Militz, H., van Acker, J., and

- Stevens, M. (2006). Microstructural and physical aspects of heat treated wood. II. Hardwoods. *Maderas, Ciencia Y Tecnologia*, 8 (3): 209-217
- [18]. Boonstra, M.J., and Blomberg, J. (2007). Semi-isostatic densification of heat-treated Radiate pine. *Wood Science Technology*, 41(7): 607-617.
- [19]. Mirazei, G., Mohebbi, B., and Tassoji, T. (2011). The effect of hydrothermal treatment on bond shear strength of beech wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 70 (5): 705-709.
- [20]. Pizzi, A., and Mittal, K.L. 2003. *Handbook of Adhesive Technology*. 2<sup>nd</sup> Edition, Marcel Dekker, New York.

