

تأثیر فشردگی چوب صنوبر بر ویژگی‌های سطحی و مقاومت چسبندگی

چکیده

در این تحقیق تأثیر فشردگی چوب صنوبر بر ویژگی‌های سطحی و کیفیت اتصالات چوب صنوبر مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور برای اصلاح مکانیکی چوب صنوبر ابتدا از پیش تیمار بخار دهی استفاده شد و سپس عملیات فشردگی با استفاده از پرس گرم آزمایشگاهی صورت پذیرفت. برای ارزیابی کیفیت سطح، زاویه تماس و زبری سطح نمونه‌های فشردگی شده، در دو حالت قبل و پس از پرداخت سطح، مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین برای بررسی تأثیر فرایند به کار گرفته شده بر کیفیت اتصالات، مقاومت برشی خط چسب نمونه‌ها و نیز میزان جدا شدن لایه‌ها در چرخه‌های غوطه‌وری در آب- خشکاندن و نیز جوشاندن- خشکاندن مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که فشردگی چوب صنوبر با استفاده از پیش تیمار بخار دهی، سبب کاهش زبری سطح نمونه‌ها و افزایش زاویه تماس قطره آب سطح نمونه‌های تیمار شده در مقایسه با نمونه‌های شاهد گردید. همچنین نتایج بیانگر اثر مثبت فرایند به کار گرفته شده در کاهش میزان جدا شدن لایه‌ها پس از چرخه‌های غوطه‌وری- خشکاندن و جوشاندن- خشکاندن بودند؛ اما مقاومت برشی خط چسب در نمونه‌های آزمونی با انجام فرایند فشردگی کاهش یافت. بررسی‌های میکروسکوپی نیز نشان دادند که فرایند فشردگی سبب تغییر ساختار فیزیکی سطح نمونه‌ها گردید.

واژگان کلیدی: چوب صنوبر، خط چسب، زبری سطح، زاویه تماس.

رضا حاجی حسینی^{۱*}
سامان قهری^۲

^۱ نویسنده مسئول، استادیار، بخش تحقیقات علوم چوب و فرآورده‌های آن، موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

^۲ استادیار، بخش تحقیقات علوم چوب و فرآورده‌های آن، موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

مسئول مکاتبات:

Reza.hajihassani@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۱

مقدمه

افزایش دانسیته چوب اغلب سبب بهبود خواص مکانیکی چوب می‌شود. فرایند فشردگی چوب یک روش اصلاحی بسیار مؤثر برای افزایش دانسیته چوب می‌باشد. بر این اساس محصولات چوبی فشردگی حاصل از گونه‌های چوبی با دانسیته پایین‌تر می‌توانند جایگزین مناسبی برای فرآورده‌های چوبی با دانسیته و مقاومت بالا باشند. فشردگی چوب خواص چوب سبک و حجیم و نیز خصوصیات سطح را تغییر می‌دهد، لذا برای گونه‌هایی با دانسیته کم؛ مانند صنوبر لرزان و صنوبر هیبرید بسیار

مناسب می‌باشد [۱]. یکی از روش‌های نوین که در تولید مواد چوبی فشردگی شده 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 شناخته شده است [۲، ۳]؛ به طوری که چوب در اثر اصلاح گرم آبی، آب‌گریز [۲، ۴] و نیز مقاوم به عوامل مخرب بیولوژیکی می‌شود [۵، ۶] و از طرف دیگر با به‌کارگیری نیروهای فشاری، ویژگی‌های مکانیکی چوب فشردگی شده افزایش می‌یابد [۲]. حرارت و رطوبت در فرایند فشردگی تغییرات شیمیایی ملایمی را در ساختار چوب ایجاد می‌کند که این تغییرات به‌صورت تغییر رنگ

می‌یابد. رطوبت پذیری لایه‌ها نیز کاهش یافته ولی اختلاف معنی‌داری بین دماهای مختلف مشاهده نگردید. نتایج آنالیز طیف سنجی مادون قرمز و طیف سنجی فوتوالکترون پرتو ایکس^۳ تغییرات شیمیایی سطح لایه‌ها در اثر تیمار حرارتی-بخار- مکانیکی و در دمای بالاتر از ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد را تایید می‌نماید [۱۲]. Sernek و همکاران (۲۰۰۷) در تحقیقات خود نشان دادند که اصلاح حرارتی چوب سبب کاهش وزن چوب تیمار شده می‌گردد ولی تأثیر معنی‌داری بر مقاومت برشی خط چسب پلی‌یورتان و فنل فرمالدئید ندارد. نتایج بیانگر آن بودند که غوطه‌وری نمونه‌ها در آب سبب کاهش ۴۰ تا ۵۰ درصدی مقاومت برشی خط چسب می‌گردد. هم‌چنین جوشاندن نمونه‌ها در آب سبب افت شدید مقاومت برشی خط چسب اوره فرمالدئید می‌شود [۱۳]. Kutnar و همکاران (۲۰۰۷) در یک بررسی، چوب صنوبر را به روش تیمار حرارتی- مکانیکی و در سه سطح ۶۳، ۹۳ و ۱۳۲ درصد فشردگی‌سازی نمودند و از چسب فنل فرمالدئید برای اتصال لایه‌های فشردگی‌شده استفاده کردند [۱۴]. نتایج نشان داد که خصوصیات خط چسب با افزایش میزان فشردگی‌سازی تغییر می‌یابد به طوری که با افزایش ضریب فشردگی، نفوذ چسب کاهش می‌یابد و موقعیت چسب فنل فرمالدئید در ساختار چوب تغییر می‌نماید؛ به عبارتی دیگر افزایش دانسیته سبب حضور بیشتر چسب فنل فرمالدئید در ناحیه اینترفاز^۴ می‌گردد. بیشترین نفوذ چسب نیز در مورد نمونه‌های شاهد به دست آمد. بررسی‌های میکروسکوپی اتصالات ناحیه اینترفاز نشان دادند که موقعیت چسب فنل فرمالدئید با افزایش میزان فشردگی‌سازی به دلیل ساختار مسدود شده نمونه‌ها تغییر می‌یابد و به خاطر مسدود شدن آوندها، چسب به داخل حفره سلولی فیبرها و اشعه وارد می‌شود، اما علی‌رغم کاهش نفوذ چسب در نمونه‌های تیمار شده، مقاومت اتصال همه نمونه‌های تیمار شده بهتر از نمونه‌های شاهد بودند. اگرچه اصلاح چوب معمولاً برای بهبود اثر ضد واکنش‌دهی استفاده می‌شود، اما می‌تواند عملکرد اتصال چسب را نیز تغییر دهد. عموماً اصلاح چوب سبب کاهش چسبندگی چوب به دلیل کاهش انرژی

معنی‌دار در چوب قابل روئیت می‌باشند [۷]. شکل ظاهری چوب فشردگی‌شده به طور معنی‌داری تغییر می‌نماید که بستگی به میزان فشردگی‌سازی آن دارد [۳]. ویژگی‌های سطحی چوب فشردگی‌شده (مانند زبری، رطوبت پذیری، شیمی سطح و ظاهر چوب) نیز به دلیل اثر هم‌زمان رطوبت، حرارت و فشردگی‌سازی می‌تواند تغییر نماید [۸]. اصلاح شدید سطح چوب ممکن است بر روی رطوبت پذیری و چسبندگی آن در فرآیند چسب‌زنی و پوشش دهی نیز تأثیر بگذارد. به عبارتی قرار گرفتن در درجه حرارت بالا می‌تواند انرژی سطحی چوب را کاهش داده و برخی مشکلات چسبندگی را به همراه داشته باشد. رطوبت پذیری یا ارتباط مولکولی نزدیک‌بین یک مایع و ماده جامد می‌تواند به وسیله محاسبه زاویه تماس مشخص گردد که در مورد چوب محاسبات دقیق رطوبت پذیری به دلیل ساختار شیمیایی ناهمسان، ناهم‌واری و زبری سطح و طبیعت آب‌دوست ذاتی آن، در عمل بسیار مشکل است [۹]. ویژگی تر شونده‌گی و زاویه تماس سطح چوب و فرآورده‌های چوبی تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند دانسیته، تخلخل (خلل و فرج)، کشش سطحی و شیمی سطح چوب، دما، ویسکوزیته و کشش سطحی مایع قرار دارند [۱۰]. تیمار فشردگی‌سازی توسط بخار با دمای بالا، ویژگی‌های سطح را تغییر می‌دهد. به طوری که در این فرآیند سلول‌های چوبی دچار فروریختگی ساختاری شده و نفوذپذیری و تخلخل چوب تغییر می‌یابند. اگرچه شیمی سطح چوب، نفوذپذیری و تخلخل آن تأثیر بسزایی بر اتصال چسب دارند و فرآیند فشردگی‌سازی تحت بخار و دما این ویژگی‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد، اما انتخاب و کاربرد یک چسب با ویژگی‌های مناسب می‌تواند چسبندگی قابل قبولی را در این نوع از چوب‌ها به همراه داشته باشد [۱۱]. Diouf و همکاران (۲۰۱۱) اثر تیمار حرارتی-بخار- مکانیکی (THM) بر رنگ، زبری، رطوبت پذیری و ترکیبات شیمیایی لایه‌های گرفته‌شده از صنوبر لرزان و صنوبر هیبرید را در چهار دمای ۱۶۰، ۱۸۰، ۲۰۰ و ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد بررسی نمودند. نتایج بیانگر آن بود که با افزایش دما رنگ لایه‌ها تیره‌تر می‌شود. زبری سطح در دمای ۱۶۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش

² Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR)

³ X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)

⁴ Interphase region

¹ Collapse

تأثیر فرایند بخار گرمایی- مکانیکی بر ویژگی‌های سطحی چوب و کیفیت اتصالات است.

مواد و روش‌ها

در این بررسی نمونه‌های مورد نظر از گونه چوبی صنوبر دلتوئیدس (*Populus deltoides*) و در ابعاد ۵×۵×۵ سانتی‌متر مکعب (مماسی×شعاعی×طول) تهیه شدند.

اصلاح بخار گرمایی- مکانیکی

برای انجام اصلاح بخار گرمایی- مکانیکی چوب صنوبر، ابتدا نمونه‌های آزمونی به روش اصلاح بخار گرمایی تیمار شدند. بدین منظور نمونه‌های تهیه‌شده در دماهای ۱۳۰، ۱۵۰ و ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد و مدت‌زمان‌های ماندگاری ۲۰ و ۴۰ دقیقه تحت تیمار بخار گرمایی قرار گرفتند. پیش از فرآیند فشردن‌سازی و به دلیل رطوبت بالای نمونه‌ها، ابتدا بلوک‌های تیمار شده به مدت یک هفته در هوای آزاد قرار داده شدند تا از رطوبت آنها کاسته شود و در مرحله بعد به مدت ۲۴ ساعت در داخل آون و در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند تا به رطوبت مناسب برای فشردن‌سازی (حدود ۱۵ درصد) برسند. سپس نمونه‌های شاهد و تیمار شده با استفاده از پرس گرم آزمایشگاهی در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۲۰ دقیقه در دو سطح فشردگی ۴۰ و ۶۰ درصد و در راستای شعاعی فشردن شدند که شرایط مختلف تیمار در جدول ۱ آورده شده است. برای فشردگی نیز از فشار پرس ۵۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و برای کنترل میزان فشردگی از شابلون‌های فولادی با ضخامت ۲ و ۳ سانتی‌متر استفاده گردید.

سطحی و منافذ سطحی چوب و در نتیجه آن کاهش ترشوندگی و اتصالات شیمیایی کمتر بین دو سطح می‌گردد [۱۵]. بنابراین تغییر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی چوب اصلاح‌شده ممکن است روی مراحل مختلف فرآیند اتصال تأثیرگذار باشد. به عبارت دیگر، این تغییرات می‌توانند روی چسبندگی، زمان پرس، گیرایی چسب، خصوصیات خط چسب و جداشوندگی لایه‌های چسب خورده تأثیر بگذارند [۱۶]. در سال ۲۰۱۳، Popescu و Popescu در بررسی تأثیر تیمار آب‌گرمایی بر ترکیبات ساختاری چوب درخت لیمو اظهار داشتند که در اثر این تیمار گروه‌های هیدروکسیل (O-H) و کربونیل (C-O) سلولز، همی‌سلولزها و لیگنین تحت تأثیر قرار گرفته و تغییر می‌یابند [۱۷]. در پژوهشی دیگر با هدف توسعه فن‌آوری فشردن‌سازی در مقیاس صنعتی، فشردن‌سازی سطح چوب صنوبر با بهینه‌سازی پارامترهای فشردن‌سازی گرمایی- مکانیکی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که سختی، MOE و مقاومت به کشش میخ نمونه‌های فشردن‌سازی شده صنوبر به ترتیب به مقدار ۱۴۰، ۲۳ و ۱۳۲ درصد افزایش یافت [۱۸]. Bekhta و همکاران (۲۰۰۹) در بررسی ویژگی‌های تخته‌لایه ساخته‌شده از لایه‌های فشردن‌شده اعلام کردند که فشردن‌سازی لایه‌ها بر روی تمامی عملکردهای فرآیندهای فن‌آورانه تولید تخته‌لایه تأثیرگذار می‌باشد به طوری که باعث کاهش زمان، دما و فشار پرس و نیز کاهش انتشار چسب (به دلیل نفوذ کمتر چسب به درون حفرات چوب فشردن‌شده) می‌گردد. به علاوه ویژگی‌های مکانیکی و کیفیت ظاهری چوب فشردن‌شده نیز بهبود می‌یابد [۱۹]. با توجه به اهمیت اثر تغییرات کیفیت سطح چوب بر خواص کاربردی آن (مانند رطوبت پذیری، چسب-زنی، کیفیت اتصالات و غیره)، هدف از این تحقیق ارزیابی

جدول ۱- متغیرهای فرآیند بخار گرمایی- مکانیکی با کدهای مربوطه

شاهد	دمای بخار گرمایی (درجه سانتی‌گراد)																	
	۱۷۰			۱۵۰			۱۳۰			۱۳۰			۱۳۰					
شاهد	۴۰ (F)			۲۰ (E)			۴۰ (D)			۲۰ (C)			۴۰ (B)			۲۰ (A)		
میزان فشردگی (درصد)	۶۰	۴۰	۶۰	۴۰	۶۰	۴۰	۶۰	۴۰	۶۰	۴۰	۶۰	۴۰	۶۰	۴۰	۶۰	۴۰	۶۰	۴۰
کد تیمار	U	P2	P1	F2	F1	E2	E1	D2	D1	C2	C1	B2	B1	A2	A1			

تعیین زاویه تماس قطره آب

اندازه‌گیری میزان آب‌دوستی سطح و تغییرات ناشی از تیمار بخار گرمایی- مکانیکی، با روش تعیین زاویه تماس قطره آب به روش گونیومتری^۱ به وسیله دستگاه Goniometer PGX روی سطح هر نمونه مورد بررسی قرار گرفت. تعیین زاویه تماس قطره آب به روش دینامیک با حجم قطره آب (مقطر) برابر ۳/۵ میکرولیتر و خط سیر با برش‌های ۲/۵ میلی‌متر انجام شد.

تعیین زبری سطح

برای اندازه‌گیری زبری سطح نمونه‌های شاهد و اصلاح‌شده با فرآیند بخار گرمایی- مکانیکی، با توجه به تأثیرگذار بودن رطوبت بر زبری سطح چوب، ابتدا نمونه‌های آزمون به مدت یک ماه تحت شرایط متعادل سازی (دمای 25 ± 2 درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی 65 ± 5 درصد) قرار گرفتند تا به رطوبت تعادل ۱۲-۱۳ درصد برسند. سپس تغییرات زبری سطح نمونه‌ها با استفاده از زبری سنج Huatec و به روش پروفیلومتری و اندازه‌گیری دو پارامتر زبری سطح (R_a : میانگین زبری سطح، R_z : متوسط قله تا دره برای ۵ نقطه) و بر اساس استاندارد ISO 4287 با برش‌های^۲ ۲/۵ میلی‌متری تعیین گردیدند. پروفایل سطحی R_a ، معمولاً به صورت میانگین ارتفاع پیک‌ها و فرورفتگی‌ها نسبت به خط مرجع محاسبه می‌گردد. زبری میانگین ده نقطه‌ای R_z نیز پارامتر

جایگزین دیگری برای پروفایل یا زبری سطح است. در این پارامتر فاصله عمودی میان پنج عدد از بلندترین پیک‌ها و پنج عدد از عمیق‌ترین فرورفتگی‌ها اندازه‌گیری شده و میانگین آنها به دست می‌آید.

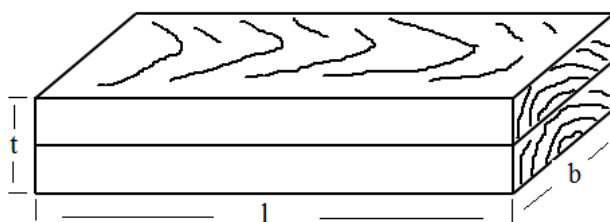
اندازه‌گیری مقاومت برشی خط چسب

بررسی تأثیر فرآیند بخار گرمایی- مکانیکی بر کیفیت اتصال چسب با استفاده از آزمون مقاومت برشی خط چسب مطابق استاندارد ASTM D 905-03 انجام شد [۲۰]. برای اتصال نمونه‌ها در ابعاد $5 \times 5 \times 50$ سانتی‌متر مکعب (مماسی×شعاعی×طول) از چسب دوجزئی پلی- یورتان (بخش چسب با کد ML-518 و بخش هاردنر با کد HA-418) ساخت شرکت مکرر و به میزان ۲۰۰ گرم بر مترمربع استفاده شد (شکل ۱). لایه‌های چسب‌زنی شده با قلم‌مو، تحت پرس سرد هیدرولیک کارگاهی با فشار ۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و به مدت زمان ۸ ساعت قرار داده شدند. با توجه به ویژگی‌های فیزیکی چسب، برای پلیمر شدن کامل آن، به مدت یک ماه در شرایط آزمایشگاهی (دمای 25 ± 2 درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی 65 ± 5 درصد) قرار داده شدند تا ضمن متعادل سازی، گیرایی چسب^۳ نیز کامل گردد. سرعت بارگذاری در این آزمون ۱/۵ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد.

¹ Goniometry

² Cut off length

³ Post curing



شکل ۱- شکل شما تیک از نحوه اتصال لایه‌ها

L = طول نمونه (میلی‌متر)، b = عرض نمونه (میلی‌متر)، t = ضخامت نمونه (میلی‌متر)

بررسی میکروسکوپی

برای بررسی تأثیر تیمار اصلاح ترکیبی بخار گرمایی- مکانیکی بر ساختار فیزیکی چوب‌های تیمار شده از چوب- های شاهد و تیمار شده نمونه‌هایی تهیه شدند و به وسیله استریو میکروسکپ مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج حاصل در قالب طرح کامل تصادفی تحت آزمایش‌های فاکتوریل با سه متغیر و به کمک فن تجزیه واریانس مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. با استفاده از این روش آماری تأثیر مستقل و متقابل هریک از عوامل متغیر بر خواص مورد مطالعه در سطح اعتماد ۹۵ درصد مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و در صورت وجود اختلاف معنی‌دار، میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن گروه‌بندی شدند.

نتایج و بحث

زاویه تماس قطره آب بر روی سطح چوب صنوبر

در جدول ۲، مقایسه زاویه تماس نمونه‌های تیمار شده قبل از عملیات پرداخت نشان می‌دهد که نمونه‌های شاهد با ضرایب فشردگی ۴۰ و ۶۰ درصد (P_1 و P_2) دارای زاویه تماس قطره آب کمتری نسبت به نمونه‌های تیمار شده می‌باشند. در حقیقت در فرآیند بخار گرمایی- مکانیکی، از یک طرف تیمار بخار گرمایی و تشدید شرایط آن سبب کاهش گروه‌های هیدروکسیل و کاهش کشش سطحی می‌شود و از طرف دیگر عمل فشرده‌سازی سبب درهم‌رفتگی بیشتر الیاف و تراکم بافت، کاهش خلل و فرج و زبری و در نتیجه افزایش زاویه تماس قطره آب می‌گردد [۲، ۱۰]. همچنین مقایسه زاویه تماس نمونه‌ها قبل از پرداخت نشان می‌دهد که در فرآیند ترکیبی بخار گرمایی- مکانیکی، افزایش زمان ماندگاری نیز می‌تواند سبب افزایش زاویه تماس قطره آب گردد. دیگر نکته قابل توجه

اندازه‌گیری جدایش‌دهی لایه‌ها

این آزمایش برای ارزیابی پایداری خطوط چسب طی چرخه‌های خشک و تر با الهام گرفتن از محیط خارج از ساختمان انجام شد، لذا در این آزمایش مقدار جدا شدن لایه‌ها در چرخه‌های غوطه‌وری- خشک شدن و جوشاندن- خشک شدن اندازه‌گیری شد. بدین منظور آزمونهایی به ابعاد $5 \times 5 \times 5$ سانتی‌متر مکعب تهیه شد. برای انجام این آزمون در چرخه‌های غوطه‌وری- خشک شدن، آزمونه‌های تهیه‌شده ابتدا در آب مقطر با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند و سپس در آن با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند. برای انجام آزمون تعیین مقدار جدا شدن لایه در چرخه‌های جوشاندن- خشک شدن نیز، آزمونه‌های تهیه‌شده ابتدا به مدت ۴ ساعت در آب جوش قرار داده شدند و سپس به مدت یک ساعت در آب مقطر با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد غوطه‌ور گردیدند. سپس نمونه‌ها با استفاده از آن با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند (هر یک از چرخه‌ها، دو مرتبه تکرار شدند). در پایان چرخه‌های ذکرشده، آزمونه‌های چوبی به صورت بصری مورد بررسی قرار گرفتند و با استفاده از رابطه ۱ مقدار جدایش‌دهی لایه در هر آزمونه محاسبه گردید [۲۱، ۲۲].

$$D = \frac{L_d}{L_b} \times 100 \quad (1)$$

D = مقدار جدایش‌دهی (درصد)

L_d = مجموع طول خطوط چسب جدا شده از یکدیگر (میلی‌متر)

L_b = مجموع طول خطوط چسب در یک بلوک (میلی‌متر)

شده سبب آزاد شدن این تنش‌های نهفته و ایجاد تغییرات ناهمسان در سطح می‌گردد. همچنین مقایسه روند تغییرات زاویه تماس قطره آب نمونه‌های تیمار شده با فرآیند بخار گرمایی - مکانیکی و نمونه‌های شاهد نشان می‌دهند که به‌طور کلی تیمار بخار گرمایی و نیز افزایش دمای تیمار سبب افزایش زمان سیر قطره در نمونه‌های پرداخت‌شده گردید؛ که می‌تواند به دلیل کاهش گروه‌های هیدروکسیل، آب‌گریز شدن نمونه‌ها و کاهش انرژی سطحی باشد.

در جدول ۲ آن است که زمان رسیدن زاویه تماس به صفر یا زمان سیر قطره در نمونه‌های تیمار شده با فرآیند بخار گرمایی بیشتر از نمونه‌های شاهد می‌باشد که بیانگر تأثیر مثبت تیمار بخار گرمایی بر رفتار آب‌گریزی این نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های شاهد می‌باشد؛ به‌علاوه افزایش دمای تیمار سبب افزایش زمان سیر قطره شده است. تأثیر توأم تیمار بخار گرمایی و فشردگی سازی سبب به وجود آمدن تغییرات شیمیایی و نیز تنش‌هایی در ساختار چوب می‌گردد [۱۶]؛ لذا عملیات پرداخت سطح نمونه‌های تیمار

جدول ۲- زاویه تماس در چوب صنوبر تیمار شده با روش اصلاح بخار گرمایی - مکانیکی

کد تیمار	زاویه تماس قبل از پرداخت (درجه)		مدت زمان سیر قطره (ثانیه)	زاویه تماس پس از پرداخت (درجه)		مدت زمان سیر قطره (ثانیه)
	زمان			زمان		
	تعداد	صفر		تعداد	صفر	
A1	۸۶/۵	۲۶/۷	۱۸۰	۸۲	۲۶/۹	۱۷۰
A2	۸۸/۵	۱۵/۸	۲۰۰	۸۰/۹	۱/۲	۲۱۰
B1	۸۷/۷	۲۸/۶	۲۲۰	۸۸/۶	۴۴	۲۴۰
B2	۹۱/۴	۱۷/۹	۱۷۰	۸۵/۹	۶۳/۴	۱۴۰
C1	۸۸/۳	۲۸/۶	۲۶۰	۸۷/۸	۱۵/۲	۲۷۰
C2	۸۹/۴	۲/۷	۱۹۰	۸۸/۹	۵۰/۸	۲۱۰
D1	۸۷/۱	۵۰/۳	۲۷۰	۸۲/۷	۱۱/۷	۱۷۰
D2	۹۲/۷	۶۰	۲۳۰	۸۷/۱	۳/۳	۲۷۰
E1	۹۱/۴	۴۴/۲	۲۷۰	۹۱/۱	۲۸/۴	۲۷۰
E2	۸۴/۵	۴۰/۶	۲۷۰	۸۶/۵	۳۵/۱	۲۷۰
F1	۸۸	۴۷/۴	۲۷۰	۸۰/۴	۳۷/۴	۲۷۰
F2	۸۸/۵	۵۰/۸	۲۷۰	۸۴/۸	۴۱/۶	۲۷۰
P1	۸۶/۳	۲۱/۲	۱۷۰	۷۵/۴	۳۴/۲	۱۸۰
P2	۸۵/۱	۲۵	۱۷۰	۸۴/۶	۱۷/۳	۲۴۰
U	-	-	-	۷۳/۸	۴۲/۵	۱۰۰

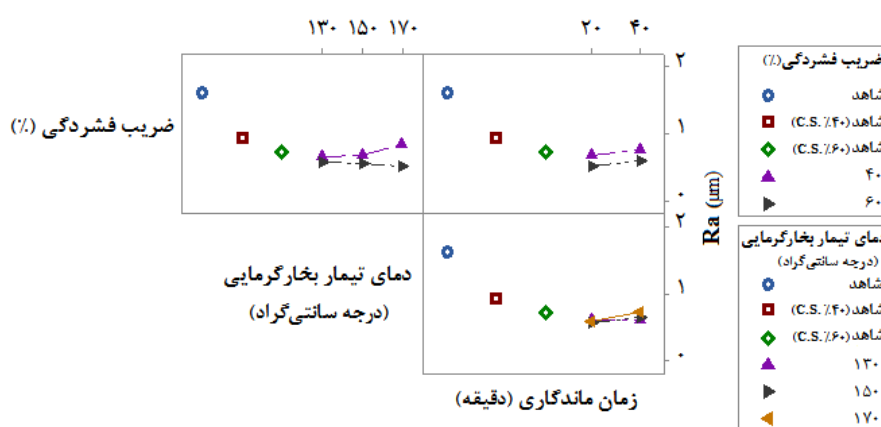
میانگین زبری سطح، R_z : متوسط قله تا دره برای ۵ نقطه) نمونه‌های تیمار شده نشان دادند که تیمار بخار گرمایی - مکانیکی دارای اثر معنی‌داری بر زبری سطح نمونه‌های پرداخت‌نشده پس از تیمار بود و سبب کاهش زبری سطح نمونه‌های تیمار شده در مقایسه با نمونه‌های شاهد گردید؛ به‌طوری‌که بیشترین میزان R_a و R_z مربوط به نمونه‌های شاهد و به ترتیب برابر با ۱/۶۲ و ۴/۵۹ میکرومتر و کمترین مقدار R_a و R_z مربوط به شرایط تیمار دمای بخار گرمایی ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد، زمان ماندگاری ۲۰ دقیقه

زبری سطح چوب صنوبر

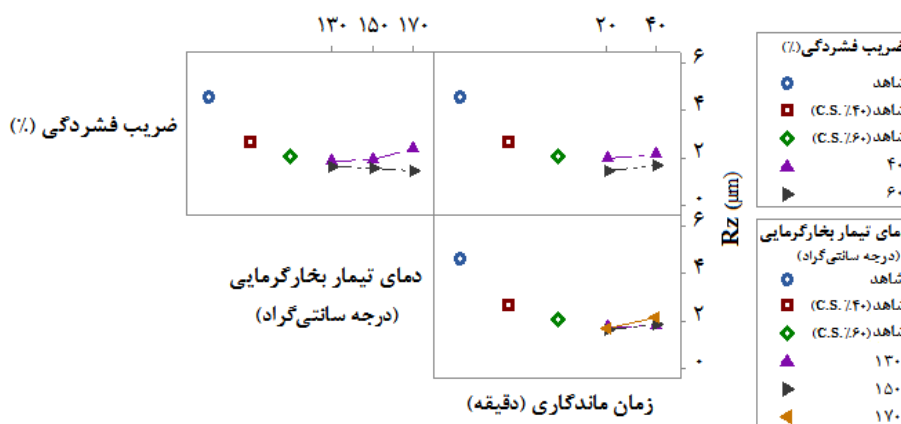
با توجه باینکه ویژگی‌های سطحی بر چسبندگی لایه‌ها و در نهایت خواص فیزیکی و مکانیکی اثرگذار می‌باشند؛ به همین دلیل برای بررسی تأثیر فرآیند بخار گرمایی - مکانیکی بر زبری سطح، نمونه‌ها در دو حالت پرداخت‌نشده و پرداخت‌شده (گندگی) پس از تیمار مورد ارزیابی قرار گرفتند تا اثرگذاری این تیمار بر زبری سطح در هر دو حالت مورد بررسی قرار گیرد. نتایج حاصل از بررسی مقایسه میانگین پارامترهای زبری سطح (R_a):

قرار گرفته‌اند پس از عملیات فشرده‌سازی دارای زبری سطح کمتری نسبت به نمونه‌های شاهد با ضرایب فشردگی مشابه می‌باشند (شکل‌های ۲ و ۳). تغییر ویژگی‌های سطحی چوب از جمله زبری سطح به دلیل نوسان تخریب ترکیبات ساختاری چوب در شرایط مختلف فرآیند بخار گرمایی و در نتیجه تغییرات متفاوت فیزیکی و شیمیایی سطح اتفاق می‌افتد. به‌علاوه تیمار فشرده‌سازی سبب تراکم بافت چوب، افزایش دانسیته و در نتیجه صافی سطح و یا به‌عبارتی دیگر کاهش زبری سطح می‌گردد [۱۲]

و میزان فشردگی ۶۰ درصد و به ترتیب برابر با ۰/۴۱ و ۱/۱۷ میکرومتر بود (شکل‌های ۲ و ۳)؛ اما بین زبری سطح نمونه‌های تیمار شده در دماهای مختلف بخار گرمایی ۱۳۰، ۱۵۰ و ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد و زمان‌های ماندگاری ۲۰ و ۴۰ دقیقه، اختلاف معنی‌داری وجود نداشت و فقط ضریب فشردگی دارای اثر معنی‌دار بر زبری سطح نمونه‌های تیمار شده با این فرآیند بود؛ به‌طوری‌که با افزایش ضریب فشردگی از ۴۰ به ۶۰ درصد هر دو پارامتر زبری سطح (R_a و R_z) کاهش یافت. نکته قابل توجه آن است که نمونه‌هایی که تحت تیمار بخار گرمایی



شکل ۲- اثر پارامترهای تیمار بخار گرمایی- مکانیکی بر پارامتر R_a صنوبر پرداخت‌نشده



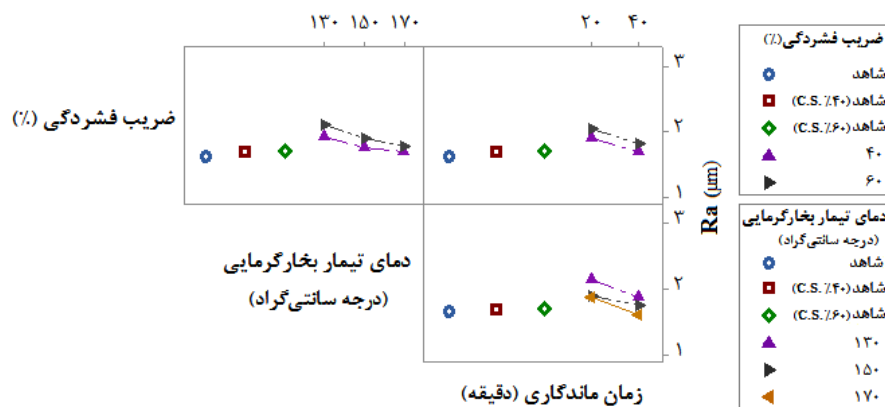
شکل ۳- اثر پارامترهای تیمار بخار گرمایی- مکانیکی بر پارامتر R_z صنوبر پرداخت‌نشده

R_a و R_z کاهش یافت؛ اما به‌طور کلی زبری سطح نمونه‌های تیمار شده با فرآیند بخار گرمایی- مکانیکی پس از پرداخت، بیشتر از نمونه‌های شاهد با ضرایب فشردگی مشابه می‌باشند؛ مضاف بر این‌که هر دو پارامتر زبری سطح R_a و R_z نمونه‌های تیمار شده با فرآیند بخار گرمایی-

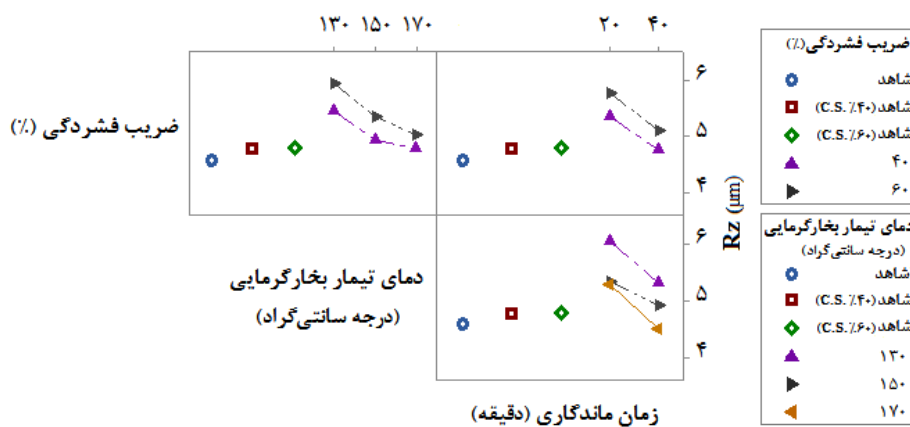
نتایج حاصل از بررسی پارامترهای زبری سطح در نمونه‌های پرداخت‌شده پس از تیمار بخار گرمایی- مکانیکی نشان دادند که فقط اثر مستقل زمان ماندگاری بر زبری سطح معنی‌دار بوده است؛ به‌طوری‌که با افزایش زمان ماندگاری از ۲۰ به ۴۰ دقیقه فاکتورهای زبری سطح

افزایش خلل و فرج شده [۲۳] و از طرف دیگر عملیات پرداخت سبب آزاد شدن تنش‌های نهفته ناشی از اعمال تیمار بخار گرمایی- مکانیکی به‌خصوص فشردگی می- گردد. شکل ۶ نیز تصاویری از ترکهای ریز سطوح نمونه‌های شاهد و تیمار شده را نشان می‌دهد که بیانگر این مطلب می‌باشد.

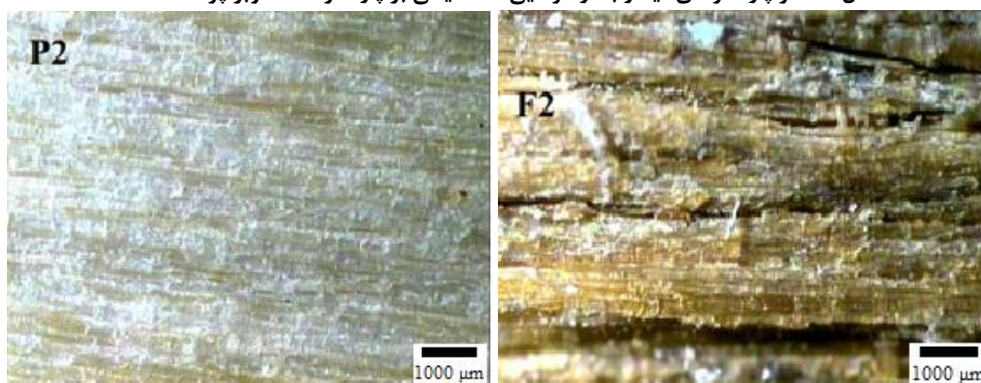
مکانیکی با ضریب فشردگی ۶۰ درصد در سطوح بالاتری از نمونه‌های با ضریب فشردگی ۴۰ درصد قرار دارند (شکل‌های ۴ و ۵). همان‌طور که قبلاً نیز گفته شد تیمار بخار گرمایی- مکانیکی و نیز تشدید شرایط این تیمار از جمله دمای بخار گرمایی، زمان ماندگاری و ضریب فشردگی از یک‌طرف سبب ترد و شکننده شدن ساختار چوب و لیگنین [۲] و نیز توسعه ترک‌های کوچک و



شکل ۴- اثر پارامترهای تیمار بخار گرمایی- مکانیکی بر پارامتر Ra صنوبر پرداخت‌شده



شکل ۵- اثر پارامترهای تیمار بخار گرمایی- مکانیکی بر پارامتر Rz صنوبر پرداخت‌شده



شکل ۶- تأثیر تیمار بخار گرمایی- مکانیکی بر کیفیت سطح مماسی چوب صنوبر پس از پرداخت با بزرگنمایی ۴۰X (P2: شاهد با ۶۰٪ فشردگی، F2: تیمار شده در شرایط ۱۷۰°C، ۴۰' و ۶۰٪ فشردگی)

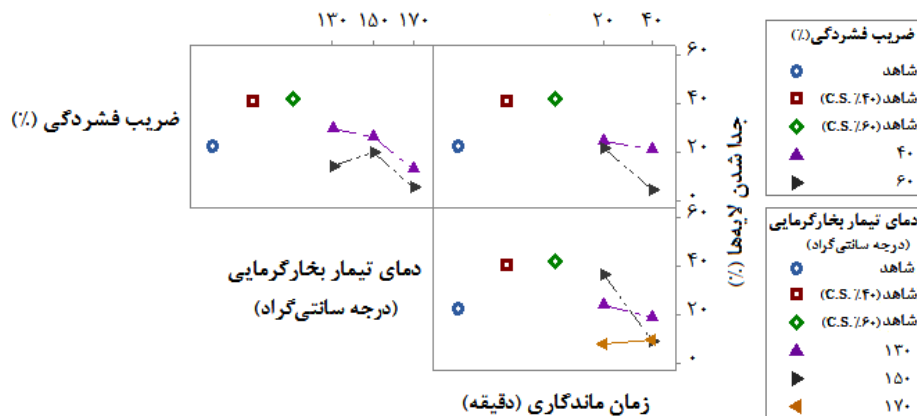
جدا شدن لایه‌ها^۱

جدا شدن لایه‌ها پس از چرخه‌های غوطه‌وری - خشکاندن

شکل ۷ نتایج بررسی تأثیر فرآیند بخار گرمایی - مکانیکی بر جدا شدن لایه‌ها پس از چرخه‌های غوطه‌وری - خشکاندن را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، در چرخه اول فقط اثر مستقل زمان ماندگاری معنی‌دار بوده است و با افزایش زمان ماندگاری میزان جدا شدن لایه‌ها روند نزولی داشته است؛ به طوری که کمترین میزان جدا شدن لایه‌ها مربوط به شرایط تیمار دمایی بخار گرمایی ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، زمان ماندگاری ۴۰ دقیقه و میزان فشردگی ۶۰ درصد و برابر با ۳/۲۱ درصد بود و بیشترین میزان جدا شدن لایه‌ها مربوط به نمونه‌های شاهد با ضریب فشردگی ۶۰ درصد و برابر با ۲۸/۱۴ درصد بود؛ اما در چرخه دوم اثر مستقل هر سه فاکتور دمایی تیمار بخار گرمایی، زمان ماندگاری و ضریب فشردگی معنی‌دار بودند. در نمونه‌های بخار گرمایی - مکانیکی شده با ضریب فشردگی ۶۰ درصد، با افزایش دمایی تیمار بخار گرمایی لایه‌ها از ۱۳۰ به ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد میزان جدا شدن لایه‌ها اندکی افزایش یافته و مجدداً از دمایی تیمار بخار گرمایی ۱۵۰ به ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته است؛ اما در نمونه‌های بخار گرمایی - مکانیکی شده با ضریب فشردگی ۴۰ درصد، با افزایش دمایی تیمار بخار گرمایی میزان جدا شدن لایه‌ها کاهش یافت. از طرفی افزایش زمان ماندگاری نیز باعث کاهش میزان جدا شدن لایه‌ها گردیده است؛ لذا

به طور کلی تیمار بخار گرمایی دارای اثر مثبت بر جلوگیری از جدا شدن لایه‌ها بوده است، به طوری که مقدار جدا شدن لایه‌ها در نمونه‌های تهیه شده از چوب بخار گرمایی شده کمتر از نمونه‌های تهیه شده از چوب شاهد می‌باشد. نکته قابل توجه آن است که در لایه‌های چسب زنی شده از نمونه‌های شاهد با افزایش ضریب فشردگی لایه‌ها، میزان جدا شدن لایه‌ها افزایش یافته است؛ ولی در لایه‌های چسب زنی شده از نمونه‌های تیمار شده با فرآیند بخار گرمایی، با افزایش ضریب فشردگی لایه‌ها میزان جدا شدن لایه‌ها کاهش یافته است. به نظر می‌رسد که انجام عمل فشرده‌سازی با ضریب فشردگی ۶۰ درصد سبب ایجاد ترک‌ها و شکست‌های ریز و افزایش خلل و فرج و در نتیجه نفوذ بهتر چسب و افزایش سطح تماس چسب می‌گردد [۱۶]. به طوری کلی مقدار جدا شدن لایه‌ها در نمونه‌های ساخته شده از چوب تیمار بخار گرمایی شده با ضرایب فشردگی ۴۰ و ۶۰ درصد در سطوحی پایین‌تر از نمونه‌های ساخته شده از چوب شاهد با ضرایب فشردگی مشابه می‌باشد. افزایش دمایی تیمار بخار گرمایی و زمان ماندگاری به دلیل تغییر ساختار شیمیایی پلی‌ساکاریدها سبب کاهش جذب رطوبت و واکشیدگی و در نتیجه کاهش تنش‌های برشی ناشی از پدیده واکشیدگی می‌گردد [۲]؛ لذا جدا شدن لایه‌ها در چرخه‌های غوطه‌وری - خشکاندن در نمونه‌های تیمار شده با فرآیند بخار گرمایی - مکانیکی کاهش می‌یابد.

^۱ Delamination

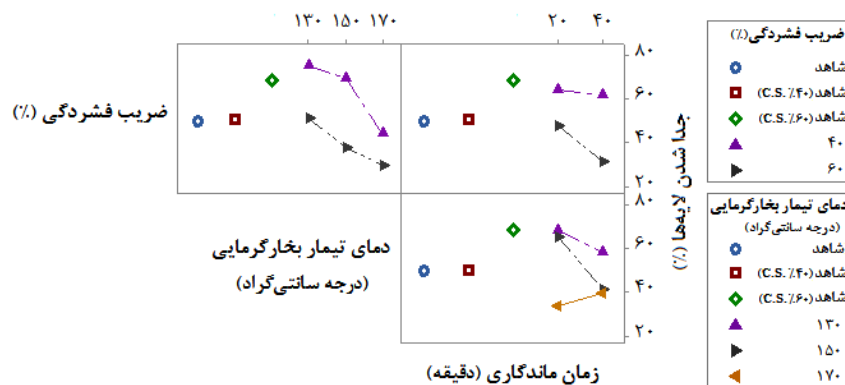


شکل ۷- اثر پارامترهای تیمار بخار گرمایی- مکانیکی بر جدا شدن لایه‌ها پس از دوچرخه غوطه‌وری- خشکاندن

دمای بخار گرمایی ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد، زمان ماندگاری ۲۰ دقیقه و میزان فشردگی ۴۰ درصد و برابر با ۸۵/۷۴ درصد بود. به نظر می‌رسد که تشدید شرایط تیمار سبب تغییرات ساختاری چوب می‌گردد که نفوذ بهتر چسب و افزایش سطح تماس چسب را به همراه داشته و سبب کاهش میزان جدا شدن لایه‌ها می‌گردد [۱۶]. تأثیر ضریب فشردگی بر جدا شدن لایه‌ها نشان داد که در لایه‌های چسب زنی شده از نمونه شاهد، با افزایش ضریب فشردگی لایه‌ها میزان جدا شدن آنها در چرخه‌های جوشاندن- خشکاندن افزایش می‌یابد، اما در لایه‌های چسب زنی شده از نمونه‌های تیمار شده با فرآیند بخار گرمایی با افزایش ضریب فشردگی لایه‌ها از ۴۰ به ۶۰ درصد میزان جدا شدن لایه‌ها کاهش می‌یابد.

جدا شدن لایه‌ها پس از چرخه‌های جوشاندن- خشکاندن

شکل ۸ نتایج بررسی تأثیر فرآیند تیمار بخار گرمایی- مکانیکی بر جدا شدن لایه‌ها پس از چرخه‌های جوشاندن- خشکاندن را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، در هر دوچرخه، اثر مستقل دمای تیمار بخار گرمایی و ضریب فشردگی معنی‌دار می‌باشد و با افزایش این دو فاکتور میزان جدا شدن لایه‌ها کاهش می‌یابد؛ به طوری که کمترین میزان جدا شدن لایه‌ها پس از چرخه دوم جوشاندن- خشکاندن مربوط به شرایط تیمار دمای بخار گرمایی ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، زمان ماندگاری ۴۰ دقیقه و میزان فشردگی ۶۰ درصد و برابر با ۱۰ درصد بود و بیشترین میزان جدا شدن لایه‌ها مربوط به شرایط تیمار

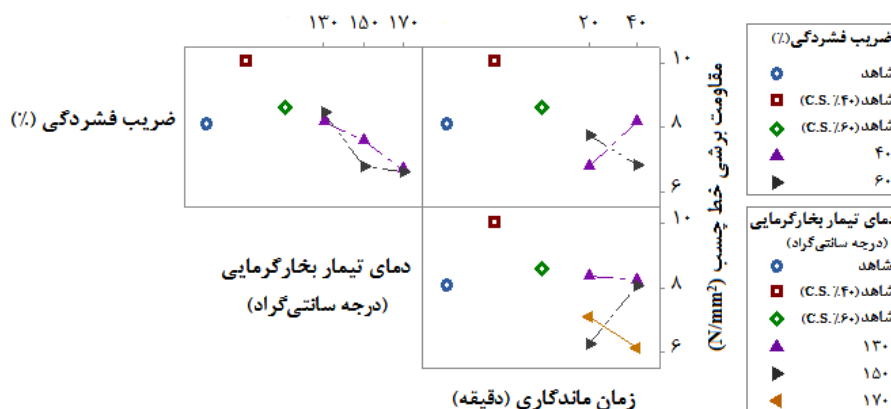


شکل ۸- اثر پارامترهای تیمار بخار گرمایی- مکانیکی بر جدا شدن لایه‌ها پس از دوچرخه جوشاندن- خشکاندن

مقاومت برشی خط چسب

شکل ۹ نتایج تأثیر تیمار بخار گرمایی- مکانیکی بر مقاومت برشی خط چسب لایه‌ها را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به دست آمده فقط اثر مستقل دمای تیمار بخار گرمایی معنی‌دار می‌باشد؛ به طوری که با افزایش دمای تیمار بخار گرمایی میزان مقاومت برشی خط چسب کاهش می‌یابد. بیشترین و کمترین میزان مقاومت برشی خط چسب به ترتیب مربوط به کد تیمار P1 و C1 و برابر با $10/06$ و $5/68$ نیوتن بر میلی‌متر مربع بود. نتایج به دست آمده از نمونه‌های آزمون مقاومت برشی خط چسب نشان دادند که تمامی شکست‌ها در قسمت چوب اتفاق افتاده است و نه در ناحیه چسب؛ که این نکته مؤید آن است که با افزایش دمای تیمار بخار گرمایی به دلیل هیدرولیز پلی‌ساکاریدها، طول زنجیره سلولزی کاهش یافته و مهمتر این‌که لیگنین و ساختار چوب ترد و شکننده می‌شود [۲]، لذا انجام عمل فشرده‌سازی سبب ترک‌ها و شکست‌های کوچک در ساختار فیزیکی چوب شده و در نتیجه مقاومت برشی چوب کاهش می‌یابد که در نهایت منجر به کم شدن مقاومت برشی خط چسب می‌گردد. Ormstad (۲۰۰۷) نیز در تحقیقات خود نشان داد که

تغییرات خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی چوب اصلاح‌شده می‌توانند روی ویژگی‌های متفاوتی از جمله چسبندگی، زمان پرس، گیرایی چسب، خصوصیات خط چسب و جدایشوندگی لایه‌های چسب خورده تأثیر بگذارند [۱۶]. هم‌چنین در نمونه‌های ساخته‌شده از چوب شاهد به‌طور کلی انجام عمل فشرده‌سازی لایه‌ها سبب افزایش مقاومت برشی خط چسب به دلیل بالا رفتن دانسیته گردید، اما با افزایش ضریب فشرده‌سازی لایه‌ها از ۴۰ به ۶۰ درصد میزان این ویژگی مکانیکی کاهش یافت. در این خصوص نیز نتایج آزمون مقاومت برشی خط چسب نشان دادند که بازهم غالب شکست‌ها در بخش چوبی اتفاق افتاده است؛ و این بدان مفهوم است که افزایش ضریب فشرده‌سازی سبب ایجاد شکست‌های کوچک در ساختار فیزیکی چوب و افزایش تنش‌های برشی در اثر وارد شدن نیروی برشی و در نهایت کاهش مقاومت برشی خط چسب می‌گردد. به عبارت دیگر با افزایش ضریب فشرده‌سازی، تغییرات ایجادشده در ساختار چوب محدود به بخش‌های سطحی نبوده و قسمت‌های بیشتری را می‌تواند تحت تأثیر قرار دهد.



شکل ۹- اثر پارامترهای تیمار بخار گرمایی- مکانیکی بر مقاومت برشی خط چسب

نتیجه‌گیری

با توجه به محدودیت کاربرد گونه‌های چوبی سبک، به دلیل خواص فیزیکی و مکانیکی کمتر، در این پژوهش با به‌کارگیری فرآیند بخار گرمایی- مکانیکی سعی در برطرف کردن معایب فیزیکی چوب و نیز ارتقاء ویژگی‌های مکانیکی آن گردید. لذا توسعه و به‌کارگیری فرآیندهای

جدید اصلاح چوب می‌توانند دامنه کاربرد این گونه‌ها را گسترش داده و در سازه‌های چوبی مختلف مورد استفاده قرار گیرند. یکی از اثرات فرآیند بخار گرمایی- مکانیکی بر ویژگی‌های سطح آن است که این فرآیند سبب کاهش زبری سطح (Ra و Rz) نمونه‌های تیمار شده در مقایسه با نمونه‌های شاهد می‌گردد؛ به طوری که با تیمار فشرده‌سازی

داد که در این فرآیند، تیمار فشردگی‌سازی سبب افزایش مقاومت برشی خط چسب نسبت به نمونه‌های شاهد می‌گردد و با افزایش ضریب فشردگی تا ۶۰ درصد مقاومت برشی خط چسب کاهش می‌یابد؛ اما تیمار بخار گرمایی در این فرآیند، سبب کاهش مقاومت برشی خط چسب گردید؛ لذا می‌توان گفت که فرآیند بخار گرمایی- مکانیکی دارای اثر منفی بر مقاومت برشی خط چسب می‌باشد. به‌طور کلی با توجه به نتایج حاصل از این بررسی می‌توان گفت که به‌کارگیری تیمار فشردگی‌سازی همراه با تیمار بخار گرمایی (فرآیند بخار گرمایی- مکانیکی) نه تنها سبب بهبود ویژگی‌های فیزیکی چوب تیمار شده می‌گردد؛ بلکه ضعف‌های مکانیکی ایجاد شده در اثر تیمار بخار گرمایی را نیز برطرف نموده و سبب بهبود ویژگی‌های مکانیکی نیز می‌شود.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از تمامی اساتید و کارکنان دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس و نیز موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور و حمایت‌های مادی و معنوی ایشان در به انجام رسیدن این تحقیق، کمال تشکر و قدردانی را می‌نماید.

و نیز افزایش ضریب فشردگی، هر دو پارامتر زبری سطح (Ra و Rz) کاهش یافتند. بعلاوه در این فرآیند، به‌کارگیری تیمار بخار گرمایی نیز سبب کاهش زبری سطح نمونه‌های فشردگی‌شده گردید. از طرفی فرآیند بخار گرمایی- مکانیکی سبب افزایش زاویه تماس قطره آب در سطح نمونه‌های تیمار شده در مقایسه با نمونه‌های شاهد شد. پس به‌طور کلی تیمار فشردگی‌سازی در ترکیب با تیمار بخار گرمایی سبب کاهش زبری سطح و نیز افزایش زاویه تماس قطره آب سطح نمونه‌های تیمار شده گردید. همچنین فرآیند بخار گرمایی- مکانیکی دارای اثر مثبت بر جلوگیری از جدا شدن لایه‌ها پس از چرخه‌های غوطه‌وری- خشکاندن و جوشاندن- خشکاندن می‌باشد. در حقیقت عملکرد مثبت و اثرگذار تیمار بخار گرمایی بر خواص فیزیکی (کاهش جذب رطوبت و ثبات ابعادی) سبب کاهش جدا شدن لایه‌ها پس از فرآیند بخار گرمایی- مکانیکی گردید. به‌طوری‌که تیمار فشردگی‌سازی و افزایش ضریب فشردگی بدون تیمار بخار گرمایی سبب افزایش میزان جدا شدن لایه‌ها شدند؛ اما با به‌کارگیری تیمار بخار گرمایی حتی با افزایش ضریب فشردگی میزان جدا شدن لایه‌ها پس از چرخه‌های غوطه‌وری- خشکاندن و جوشاندن- خشکاندن کاهش یافت. تأثیر تیمار اصلاح بخار گرمایی- مکانیکی بر مقاومت برشی خط چسب نشان

منابع

- [1] 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.
- [2] Mohebbi, 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, 98: 353-360.
- [3] Kutnar, A., Kamke, F.A., Petri, M. and Sernek, M., 2008. The Influence of Viscoelastic Thermal Compression on the Chemistry and Surface Energetics of Wood. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 329: 82-86.
- [4] 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.
- [5] Khademi, L. and Mohebbi, B., 2011. Bioresistance of Poplar Wood Compressed by Combined Hydro-Thermo-Mechanical Wood Modification (CHTM). *Soft-Rot and Brown-Rot, International Biodeterioration & Biodegradation*, 65: 866-870.
- [6] Hakkou, M., Petrissans, M., Ceradine, P. and Zoulalian, A., 2006. Investigation of the Reasons for Fungal Durability of Heat Treated Beech Wood. *Polymer Degradation and Stability*, 91 (2): 393-397.

- [7] 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.
- [8] Jennings, J.D., Zink-Sharp, A., Frazier, C.E. and Kamke, F.A., 2006. Properties of Compression Densified Wood, Part II, Surface Energy, *J. Adhes. Sci. Technol.*, 20 (4): 335–344.
- [9] Gindl, M., Sinn, G., Reiterer, A. and Tschegg, S., 2001. Wood Surface Dependence of Wettability: A Comparison of Different Wood Surfaces Using an Acid-Base Approach, *Holzforschung*, 55: 433–440.
- [10] Tsoumis, G., 1991. *Science and Technology of Wood. Structure, Properties, Utilization*. Van Nostrand Reinhold, New York. 64(6): 494.
- [11] Kamke, F.A., 2007. Laminated Composites from Densified Wood. In: *Proceedings of the 5th COST E34 International Workshop on Bonding of Modified Wood*, Bled- Slovenia, September, 2007(6): 77-86.
- [12] Dioufa, P.N., Stevanovicb, T., Cloutierb, A., Fangb, C.H., Blanchetc, P., Koubaad, A. and Mariottib, N., 2011. Effects of Thermo-Hygro-Mechanical Densification on the Surface Characteristics of Trembling Aspen and Hybrid Poplar Wood Veneers. *Applied Surface Science*, 257: 3558–3564.
- [13] Šernek, M., Humar, M., Kumer, M. and Pohleven, F., 2007. Bonding of Thermally Modified Spruce with PF and UF Adhesives. In: *Proceedings of the 5th COST E34 International Workshop on Bonding of Modified Wood*, Bled- Slovenia, September, 2007(6): 31-37.
- [14] Kutnar, A., Kamke, F.A. and Sernek, M., 2007. Bonding of Densified Hybrid Poplar with Phenol Formaldehyde Adhesive. In: *Proceedings of the 5th COST E34 International Workshop on Bonding of Modified Wood*, Bled- Slovenia, September, 6: 87-94.
- [15] Hunt, C.G., Brandon, R., Ibach, R.E. and Frihart, R., 2007. What Does Bonding to Modified Wood Tell Us About Adhesion? In: *Proceedings of the 5th COST E34 International Workshop on Bonding of Modified Wood*, Bled- Slovenia, September, 16: 47-56.
- [16] Ormstad, E.B., 2007. Gluing of Treated Wood with Dynea Adhesives. In: *Proceedings of the 5th COST E34 International Workshop on Bonding of Modified Wood*, Bled- Slovenia, September, 6: 11-12.
- [17] Popescu, C.M. and Popescu, M.C., 2013. A near Infrared Spectroscopic Study of the Structural Modifications of Lime (*Tilia cordata* Mill.) Wood During Hydro-Thermal Treatment. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 115: 227–233.
- [18] Lamason, C. and Gong, M., 2007. Optimization of pressing parameters for mechanically surface-densified aspen. *Forest Prod. J.* 57 (10), 64–68.
- [19] Bekhta, P., Hiziroglu, S. and Shepelyuk, O., 2009. Properties of Plywood Manufactured from Compressed Veneer as Building Material. *Materials and Design*, 30: 947–953.
- [20] American Society for Testing of Materials, ASTM D 905-03, 2003. *Standard Test Methods for Strength Properties of Adhesives Bond in Shear by Compression Loading*.
- [21] Yang, T.H., Lin, C.H., Wang, S.Y. and Lin, F.C., 2012. Effects of ACQ Preservative Treatment on the Mechanical Properties of Hardwood Glulam. *European Journal of Wood Products*, 70 (5): 557-564.
- [22] *Standard Test Method for Determining Resistance to Delamination of Adhesive Bonds in Overlay-Wood Core Laminates Exposed to Heat and Water*, ASTM D5824-98, 2003.
- [23] Aydın, İ. and Çolakoğlu, G., 2002. The Effects of Steaming and Veneer Drying Temperature on the Weathering Reactions. In: *Proceedings of the Wood Based Materials-Wood Composites and Chemistry International Symposium*, Vienna, Austria, September, 8(16): 19–20.

Influence of poplar wood densification on surface characteristics and adhesion strength

Abstract

The main purpose of this study was to evaluate the effect of densification process on the surface characteristics and bonding quality of poplar wood. For this purpose, the specimens were treated by hygrothermal treatment and then were densified by hot press. Some properties of treated specimens such as surface contact angle and surface roughness were evaluated before and after planning. Moreover, the shear strength of glue line and also delamination of specimens in soaking-drying and boiling-drying cycles were investigated. The results of the poplar wood densification revealed that the surface roughness of the specimens reduced and surface contact angle increased by hygrothermal pre-treatment. The results also showed the positive effect of combined hygrothermal and compression treatment on the delamination after soaking-drying and boiling-drying cycles. In addition, the shear strength of glue line reduced by applied combined treatments. In addition, microscopic images showed that this process changed the physical structure of the surface.

Keywords: poplar wood, glue line, surface roughness, contact angle.

R. Hajihassani^{1*}
S. Ghahri²

¹ Assistant Prof., Wood and Forest Products Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

² Assistant Prof., Wood and Forest Products Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Corresponding author:
Reza.Hajihassani@gmail.com

Received: 2021/06/26
Accepted: 2022/01/21