

اثر فشرده‌سازی سطحی چوب کاج جنگلی بر اشباع‌پذیری و توزیع میکروسکوپی محلول اشباع کننده در آن

بهنام غلامپور^۱

اصغر طارمیان^{۲*}

رضا اولادی^۲

داوود افهامی سیسی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد بیولوژی و آناتومی چوب، دانشکده منابع طبیعی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

^۲ دانشیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

^۳ استادیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

مسئول مکاتبات:

tarmian@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۱۰

چکیده

در این پژوهش، اثر فشرده‌سازی سطحی بر اشباع‌پذیری چوب کاج جنگلی و توزیع میکروسکوپی محلول اشباع در آن بررسی شد. فشرده‌سازی در دو سطح ۱۰ و ۲۰ درصد و در دو جهت شعاعی و مماسی در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۲۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع در رطوبت تعادل ۱۲ درصد برای مدت ۳ دقیقه انجام شد. به‌منظور بررسی اشباع‌پذیری، نمونه‌ها به روش فشار متناوب همراه با خلاء ابتدایی با استفاده از رنگ رودامین B با غلظت ۰/۵ درصد اشباع شدند و سپس با استفاده از نرم-افزار ImageJ و میکروسکوپ نوری، پارامترهای اشباع‌پذیری اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که اثر فشرده‌سازی بر اشباع‌پذیری متأثر از جهت و مقدار فشرده‌سازی است. در اثر فشرده‌سازی، بر اشباع‌پذیری پره‌های چوبی افزوده شد ولی تراکئیدهای عرضی اشباع نشدند. اشباع‌پذیری چوب پایان بهتر از چوب آغاز بوده و کانال‌های رزینی نیز به‌خوبی اشباع شده بودند.

واژگان کلیدی: فشرده‌سازی سطحی، *Pinus sylvestris*، اشباع‌پذیری، توزیع میکروسکوپی.

مقدمه

فشرده‌گی در جهت عمود بر الیاف در حالت نرم بودن دیواره سلولی؛ (۳) خنک کردن و خشک کردن نمونه تغییر شکل یافته و (۴) تثبیت حالت تغییر شکل یافته^۲ است. فرآیند فشرده‌سازی چوب که اولین بار در سال ۱۹۳۰ در آلمان تحت عنوان تجاری لیگنوستون^۳ معرفی شد، هنوز در سوئد برای حدود ۲۰ گونه‌ی چوبی تقریباً با همان روش اولیه استفاده می‌شود [۳]. در این فرآیند، بخش اعظم فضاهای خالی یا حفره‌های سلولی بافت چوب توسط خود ماده چوبی جایگزین می‌شود. طی این عمل، عناصر

یکی از انواع فرآیندهای اصلاح مکانیکی چوب، فشرده-سازی آن است. در فرآیند فشرده‌سازی، به‌واسطه متراکم کردن بافت چوب و افزایش دانسیته آن همراه با مواد نرم-کننده مانند رزین‌های طبیعی، پلیمرها، موم‌ها و یا بدون آن‌ها، مقاومت به‌سختی و مقاومت به سایش چوب برای برخی کاربردها مانند کفیوش‌های چوبی بهبود می‌یابد [۱،۲]. این فرآیند به‌طور معمول مشتمل بر چهار مرحله (۱) نرم شدن یا پلاستیسیته شدن دیواره سلولی؛ (۲)

² Stabilized deformed state

³ Lignostone

¹ Soften and plasticization

سازنی سطحی، چوب نسبتاً خشک فقط در یک طرف گرم شده و سپس فشرده می‌شود [۸]. هدف اصلی از فشرده‌سازی سطحی، افزایش مقاومت به سایش^۵ و سختی چوب با فشرده‌سازی سطوح چوب ماسیو تا عمق ۵-۱ میلی‌متر یا تعداد کمی از لایه‌های سلولی است [۱]. اشباع‌پذیری چوب کاج جنگلی با محلول‌های حفاظتی به دلیل مکش منفذی^۶ یکی از چالش‌های جدی در صنعت حفاظت چوب به شمار می‌آید [۹]. از گذشته تاکنون، چندین روش برای دستیابی به نفوذ عمیق‌تر و یکنواخت‌تر مایع حفاظتی به درون چوب‌های سخت اشباع مانند نونل، هملاک غربی، دوگلاس‌فر، بلوط و بهبود تیمار پذیری آن‌ها ابداع شده است [۱۰-۱۲]. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های مکانیکی شامل شیازنی^۷، روش‌های زیستی با استفاده از قارچ‌ها و باکتری‌ها (شیازنی زیستی)، فشردن چوب، غوطه‌وری یا خیساندن در آب، بخار دهی و تابش امواج الکترومغناطیس، مانند امواج ماکروویو^۸، پیش‌تیمار چوب با نیتروژن مایع، ازن و یا سیال فوق بحرانی^۹ [۲۰-۱۳] اشاره کرد. سازوکار عمل اغلب این روش‌ها تخریب و هیدرولیز سپر (توروس) در پیچه منافذ و باز شدن در پیچه منافذ دیواره تراکتیدها در سوزنی‌برگان، تخریب غشای منفذ، گسیختگی پره‌های چوبی، چین‌خوردگی (کلاپس) سلولی، ترک‌های میکروسکوپی در دیوار سلول‌ها و تغییر در ریزساختار تخلخلی چوب است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، بیش‌تر پژوهش‌ها در زمینه فشرده‌سازی چوب، بر بهینه‌کردن این فرآیند، اندازه‌گیری ویژگی‌های مکانیکی مانند سختی و مقاومت به سایش و برخی ویژگی‌های فیزیکی مانند جذب رطوبت و بازیابی شکل متمرکز شده است. در پژوهش کنونی، اثرات این نوع فرآیند اصلاح مکانیکی-حرارتی بر اشباع‌پذیری و الگوی توزیع میکروسکوپی مایع اشباع‌کننده در لایه‌های سطحی فشرده‌شده بررسی شد تا درک دقیقی از سازوکار بهبود تیمار پذیری چوب به‌واسطه فشرده‌سازی آن حاصل شود. ضمن این‌که در حفاظت این نوع چوب‌های فشرده‌شده با

سازنده‌ی چوب شامل آوندها و فیبرها در هم فرورفته، تخلخل چوب کمتر شده و وزن مخصوص آن افزایش می‌یابد و از این طریق برخی ویژگی‌های مکانیکی چوب مانند مقاومت به سایش بهبود می‌یابد. عملیات فشرده‌سازی را باید در شرایطی انجام داد که به ساختار سلولی چوب صدمه مکانیکی وارد نشود. به‌عبارت‌دیگر، چوب در اثر اعمال بار بیش‌ازحد نهایی دچار شکست می‌گردد ولی با اعمال تیمارهای نرم‌کننده می‌توان تغییر شکل ویسکوالاستیک چوب را افزایش داد و مقدار زیادی از تغییر شکل (تا ۵۰ درصد) را با اعمال فشار ثابت به دست آورد [۴]. محصولات حاصل از مواد چوبی فشرده جذب آب کمتری داشته و ثبات ابعادی آن‌ها بهبود می‌یابد [۵]. با این‌وجود، هنگامی‌که چوب فشرده‌شده رطوبت و یا گرما می‌بیند تا حدی به شکل اولیه خود بازمی‌گردد که به این پدیده، بازیابی شکل^۱ گفته می‌شود. این نوع بازیابی شکل ناشی از دو عامل است (۱): واکنشیدگی چوب در اثر طبیعت نم‌پذیری چوب و (۲) عدم پایداری ابعاد در اثر خواص ویسکوالاستیک چوب و آزاد شدن تنش‌های داخلی ذخیره‌شده در سلول‌های فشرده‌شده چوب طی مرحله فشرده‌سازی [۶]. آن بخشی از فشردگی که در اثر مرطوب کردن کامل چوب فشرده‌شده غیر بازگشت است، ناشی از تغییر شکل پلاستیک است. کاهش میزان بازیابی شکل با سه مکانیسم قابل انجام است (۱): کاهش آب‌دوستی پلیمرهای دیوار سلولی، (۲): ایجاد پیوندهای عرضی کووالانسی بین ترکیبات چوب و (۳): آزاد کردن انرژی ذخیره‌شده در ماتریس چوب [۶]. اشباع با رزین‌ها نیز روش دیگری برای کاهش بازیابی شکل چوب فشرده‌شده به شمار می‌آید. در اثر بخارزنی به دلیل آزاد شدن تنش-های باقی‌مانده طی فشرده‌سازی، از بازیابی شکل در اثر جذب مجدد رطوبت تا حد زیادی کاسته می‌شود [۶، ۷]. برای فشرده‌سازی چوب در جهت عرضی معمولاً از دو روش می‌توان استفاده کرد: ۱- فشرده‌سازی کل حجم چوب^۲ (فشرده‌سازی یکنواخت^۳) و ۲- فشردن یک‌لایه‌ی سطحی از چوب (فشرده‌سازی سطحی^۴). در روش فشرده-

⁵ Abrasion resistance

⁶ Pit aspiration

⁷ Incising

⁸ Microwaves

⁹ Supercritical fluids (SCF)

¹ Set recovery

² Bulk densification

³ Uniform densification

⁴ Surface densification

مورد استفاده، از بازار چوب‌فروشان کرج تهیه شد. تخته‌هایی با الگوی شعاعی و مماسی از ناحیه درون‌چوب با ابعاد $۴۵ \times ۵ \times ۲$ سانتی‌متر (نمونه شاهد) و $۴۵ \times ۵ \times ۲/۵$ سانتی‌متر (تخته‌های شعاعی و مماسی) و $۴۵ \times ۵ \times ۲/۳$ سانتی‌متر (تخته‌های شعاعی و مماسی) تهیه شدند (جدول ۱) و برای رسیدن به رطوبت تعادل ۱۲ درصد به مدت دو هفته در اتاق کلیما در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۶۵ درصد قرار داده شدند.

مواد حفاظتی به‌ویژه در کاربردهای فضای باز چه به‌صورت اشباع عمیق و چه به‌صورت اشباع سطحی، اثرات فشرده‌سازی بر میزان نفوذپذیری و تیمارپذیری آن‌ها می‌تواند مهم باشد. به‌عنوان مثال گزارش شده است که فشرده‌سازی در جهت شعاعی در مقایسه با جهت مماسی تأثیر بیشتری بر اشباع‌پذیری چوب نراد چینی دارد [۲۴].

مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش از چوب‌درون کاج جنگلی (*Pinus sylvestris*) استفاده شد. الوارهای چوب‌خام کاج

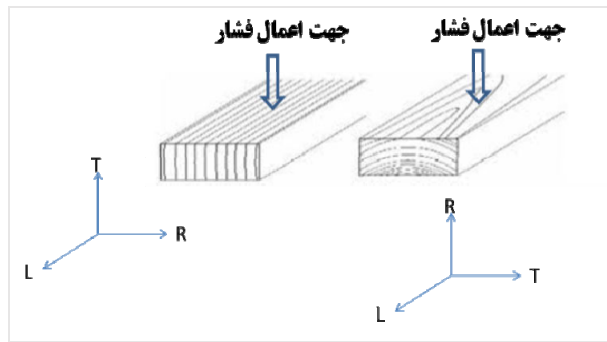
جدول ۱- تیمارهای مورد مطالعه

تعداد تکرار	درصد فشرده‌سازی	الگوی برش تخته
۸	۱۰	شعاعی
۸	۲۰	شعاعی
۸	شاهد	شعاعی
۸	۱۰	مماسی
۸	۲۰	مماسی
۸	شاهد	مماسی

استراحت به‌ویژه برای فشرده‌سازی حجمی چوب خیس با پرس‌های معمولی بدون تجهیزات خروج بخار آب، برای جلوگیری از وقوع گسیختگی‌ها طی مرحله فشار ضرورت بیشتری دارد. پس‌از این مرحله استراحت، فشرده‌سازی با استفاده از یک پرس داغ در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ دقیقه در فشار ۲۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع انجام شد. میزان فشرده‌سازی در دو سطح ۱۰ و ۲۰ درصد با کنترل ضخامت نمونه‌ها قبل و بعد از فشرده‌سازی، انجام شد. ضخامت نهایی تخته‌های فشرده‌شده برابر با ۲۰ میلی‌متر بود. برای کاهش بازیابی شکل در نمونه‌های فشرده‌شده، عملیات پس تیمار با استفاده از دستگاه اتوکلاو و با بخار اشباع در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱/۲ اتمسفر برای مدت ۲۰ دقیقه انجام شد. سپس برای جلوگیری از تبادل رطوبتی، نمونه‌ها در کیسه‌های پلاستیکی قرار داده شدند.

فشرده‌سازی

عملیات فشرده‌سازی در دو جهت شعاعی و مماسی و در سه مرحله شامل مرحله نرم کردن بافت چوبی، فشردن و پس تیمار (بخار دهی) انجام شد. الگوی فشرده‌سازی در شکل ۱ ارائه شده است. برای گرم کردن بافت چوب، از یک پرس گرم در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶ دقیقه بدون اعمال فشار استفاده شد. هدف از این مرحله، اندکی نرم کردن بافت چوب و کاهش تنش‌های حرارتی ناگهانی طی فشرده‌سازی بود. پس از باز شدن دهانه پرس، سه دقیقه زمان استراحت در نظر گرفته شد و سپس دهانه پرس مجدداً بسته شد و عملیات فشرده‌سازی آغاز شد. به‌عبارت‌دیگر، با در نظر گرفتن مدت‌زمان نیاز برای باز و بسته شدن دهانه پرس، فاصله زمانی بین مرحله گرم کردن و مرحله اعمال فشار به مدت پنج دقیقه در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که این مرحله



شکل ۱- شمایی از الگوی برش نمونه‌ها و روش فشرده‌سازی

انجام شد، با این تفاوت که خلاء مقدماتی نیز اعمال شد (شکل ۲).

آزمون‌ها

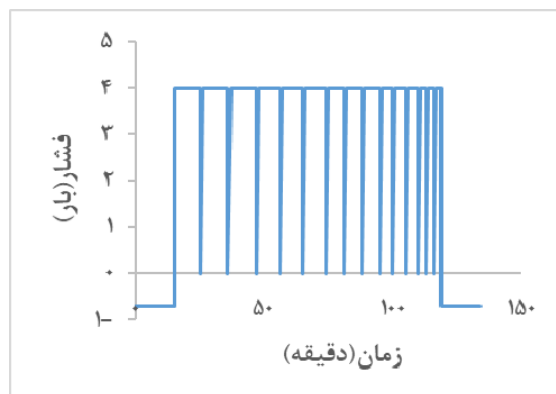
تعیین اشباع‌پذیری و عمق نفوذ در مقیاس

ماکروسکوپی

به‌منظور بررسی اشباع‌پذیری ماکروسکوپی، نمونه‌های اشباع‌شده از بخش میانی برش داده شدند و سطح مقطع عرضی آن‌ها با قدرت تفکیک ۱۲۰۰ dpi اسکن و درصد سطح اشباع نمونه‌ها به کمک نرم‌افزار ImageJ محاسبه شد. همچنین، میانگین حداقل و حداکثر عمق نفوذ در جهت شعاعی (R) و جهت مماسی (T) تخته‌ها اندازه‌گیری شد (شکل ۳). این آزمون با سه تکرار انجام شد.

روش اشباع

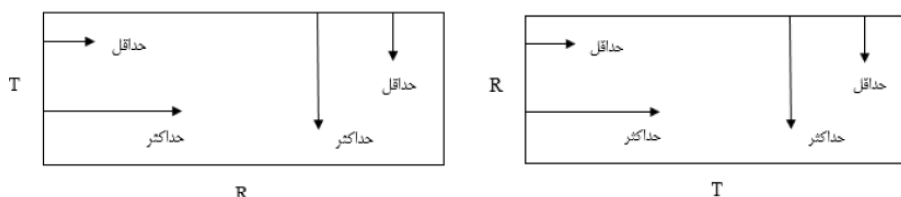
به‌منظور اشباع نمونه‌های آزمونی با سه تکرار برای هر تیمار، بلوک‌های چوبی به ابعاد $2 \times 4/5 \times 15$ سانتی‌متر بریده شد و مقاطع عرضی آن‌ها به‌وسیله دولایه رزین اپوکسی دوجزئی اندود شد. از رنگ رودامین B^۱ با غلظت ۰/۵ درصد (محلول در آب) برای اشباع نمونه‌ها آزمونی استفاده شد. این رنگ به‌صورت پودر بنفش متمایل به قرمز بوده، نقطه ذوب آن ۱۶۵ درجه سانتی‌گراد و دارای جرم مولی ۳۸۰/۸ گرم بر مول بوده و چگالی آن برابر با ۱/۲۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. رنگ رودامین دارای خاصیت فلوروسنس است. فرآیند اشباع با روش فشار متناوب^۲ (APM) با ۱۵ مرتبه اعمال فشار به میزان ۴ بار



شکل ۲- اشباع نمونه‌ها با روش فشار متناوب (APM) همراه با خلاء مقدماتی

^۱ Rhodamine B

^۲ Alternating Pressure method



شکل ۳- شمایی از نحوه اندازه‌گیری حداقل و حداکثر عمق نفوذ مایع اشباع‌کننده در نمونه‌های تخته مماسی (سمت راست)، تخته شعاعی (سمت چپ)

نتایج و بحث

تصاویر میکروسکوپ نوری تهیه‌شده از تخته‌های فشرده‌شده حاکی از فشردگی و چین‌خوردگی سلول‌های سطحی است (شکل ۴). چین‌خوردگی سلولی^۱ ناشی از حجیم‌شدگی الاستیک^۲ و تردشدگی ناشی از لهیدگی^۳ است [۲۱]. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که فشردگی در تراکتیدهای چوب آغاز و نیز پره‌های چوبی بیشتر بود. نتایج پژوهش‌های گذشته نیز حاکی از آن است که سلول‌های چوبی با دیوار نازک‌تر به بروز چین‌خوردگی (کلاپس) سلولی حساس‌تر هستند. Dogu و همکاران (۲۰۱۰) دریافتند که شدت تغییر شکل سلول‌های چوبی طی فشرده‌سازی چوب کاج جنگلی در سرتاسر حلقه سالیانه یکنواخت نیست و در ناحیه چوب آغاز شدت چین‌خوردگی سلولی بیشتر است [۲۲]. Tirak Hizal و همکاران (۲۰۱۲) نیز دریافتند که دیوار سلول‌های آوندی و پارانشیم‌های محوری در چوب اکالیپتوس بیشتر از سلول‌های دیگر طی فشرده‌سازی صدمه می‌بیند [۲۳].

نتایج تصاویر ماکروسکوپی اشباع‌پذیری تخته‌های شعاعی و مماسی شاهد و فشرده‌شده -به ترتیب- در شکل ۵ ارائه شده است. نتایج نشان داد که در تخته‌های مماسی تفاوت معنی‌داری در سطح اعتماد ۹۵ درصد بین اشباع‌پذیری (درصد سطح اشباع‌شده) نمونه‌های شاهد و فشرده‌شده وجود ندارد ولی در تخته‌های شعاعی، فشرده‌سازی به مقدار ۲۰ درصد موجب افزایش درصد اشباع سطح عرضی نمونه‌ها شد (شکل ۶).

بررسی اشباع‌پذیری در مقیاس میکروسکوپی

برای بررسی تغییرات بافت چوبی در بُعد میکروسکوپی پس از فشرده‌سازی (پیش از اشباع)، با استفاده از میکروتوم، از مقطع عرضی نمونه‌ها از سمت سطح فشرده‌شده به داخل بافت چوب، مقاطع میکروسکوپی به ضخامت تقریبی ۵ میکرومتر تهیه شدند. مقاطع میکروسکوپی پس از رنگ‌آمیزی بارنگ سافرانین و شستشو با الکل ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد، به‌وسیله چسب انتلان بر روی لام تثبیت شده و به مدت ۲۴ ساعت در آن با دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. سپس تصاویر میکروسکوپی با بزرگنمایی‌های مختلف ۱۰۰ و ۴۰۰ برابر، با استفاده از میکروسکوپ نوری تهیه شد. لازم به ذکر است که طی مراحل آماده‌سازی مقاطع میکروسکوپی، بخشی از فشردگی سلول‌ها بازیابی می‌شود. همچنین، برای بررسی میزان اشباع‌پذیری نمونه‌ها در مقیاس میکروسکوپی و تعیین میزان اشباع‌پذیری سلول‌های مختلف چوب، نمونه‌های اشباع‌شده با رودامین، از میانه برش خورده و از سطح مقطع عرضی آن‌ها، نمونه‌های میکروسکوپی به ضخامت تقریبی ۵ میکرومتر تهیه و زیر میکروسکوپ نوری Nikon بررسی و عکس‌برداری شدند.

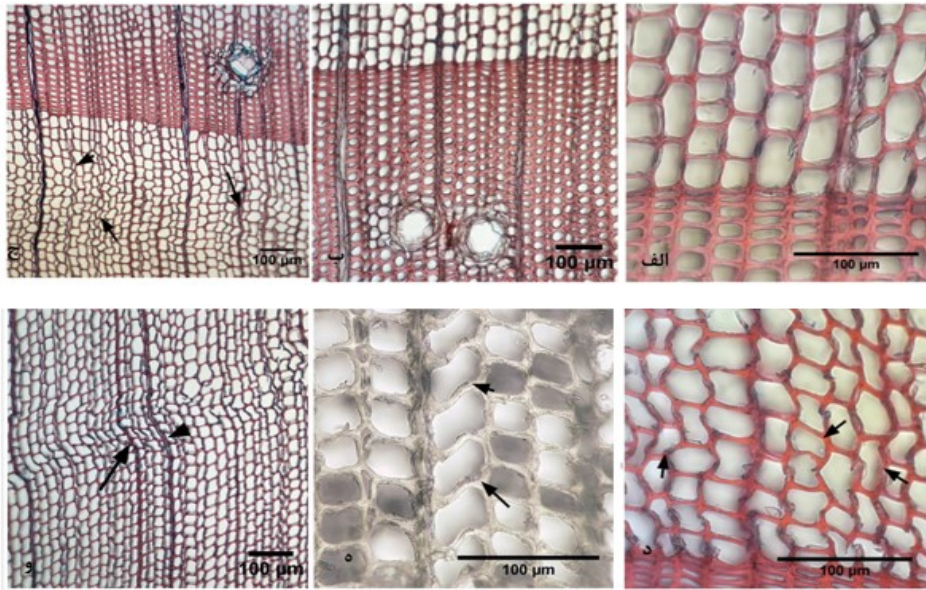
تجزیه و تحلیل آماری

پس از بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها، اثر تیمارها (جهت و میزان فشرده‌سازی) بر ویژگی‌های کمی با استفاده از آزمون تجزیه واریانس دوطرفه مورد بررسی قرار گرفت. گروه‌بندی بین سطوح هر تیمار با استفاده از آزمون دانکن انجام شد.

¹ Cell collapse

² Elastic bulking

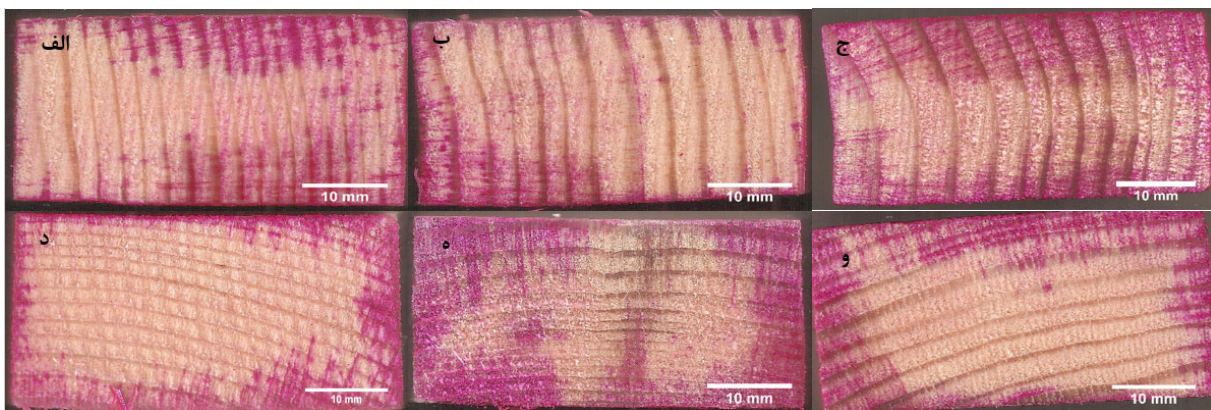
³ Brittle crushing



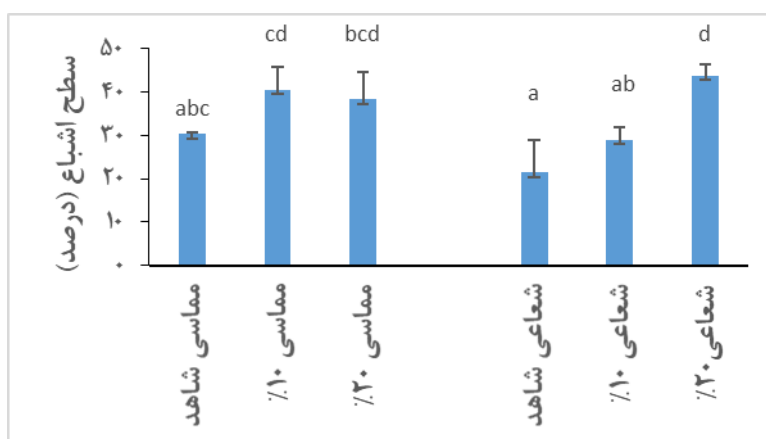
شکل ۴- تصاویر میکروسکوپ نوری از تخته‌های شاهد و فشرده‌شده، (الف) و (ب) نمونه شاهد، (ج) نمونه گرفته‌شده از تخته مماسی با ۲۰ درصد فشردگی؛ (د) و (ه) نمونه گرفته‌شده از تخته شعاعی با ۱۰ درصد فشردگی، (و) نمونه گرفته‌شده از تخته شعاعی با ۲۰ درصد فشردگی؛ فلش‌ها در شکل‌های «ج» تا «ه»، از ریخت‌افتادگی تراکتیدها و در شکل «و»، چین‌خوردگی اشعه چوبی و سلول‌های اطرافش را نشان می‌دهد.

ترک‌های سطحی به‌ویژه در دماها و فشارهای بالا رخ داده، در نتیجه مسیرهای انتقال سیال باز می‌شود [۲۵]. یکی از دلایل بهبود اشباع‌پذیری چوب‌های سوزنی‌برگ در اثر فشردن نیز گسیختگی در منافذ هاله‌دار تراکتیدها گزارش شده است [۲۵].

نتایج پژوهش Zhao و همکاران (۲۰۱۸) با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. این محققین نیز دریافتند که فشردگی در جهت شعاعی در مقایسه با جهت مماسی تأثیر بیشتری بر اشباع‌پذیری چوب نراد چینی دارد [۲۴]. اعتقاد بر این است که در اثر فشردن چوب پهن‌برگ، سلول‌های آوندی و فیبرها دچار چین‌خوردگی شده و



شکل ۵- تصاویر اسکن شده مقطع عرضی نمونه‌های تهیه‌شده از تخته شعاعی (ردیف بالا)، (الف) نمونه شاهد، (ب) نمونه فشردگی ۱۰ درصد، (ج) نمونه فشردگی ۲۰ درصد و تصاویر تخته مماسی (ردیف پایین)؛ (د) نمونه شاهد، (ه) فشردگی ۱۰ درصد، (و) فشردگی ۲۰ درصد



شکل ۶- درصد اشباع نمونه‌های شاهد و فشرده شده

فشرده‌سازی در گونه‌ی نراد چینی بر اشباع‌پذیری آن مؤثر است ولی بر اشباع‌پذیری چوب صنوبر تأثیرگذار نیست [۲۴]. آن‌ها دریافتند که فشرده‌سازی در جهت شعاعی برای دستیابی به حداکثر اشباع‌پذیری بهتر است و سرعت فشرده‌سازی نیز بر مقدار اشباع‌پذیری هر دو گونه چوبی مؤثر است، به طوری که مقادیر بهینه سرعت فشرده‌سازی برابر با ۵ و ۱۰ میلی‌متر در دقیقه گزارش شد.

جدول ۲ نتایج اندازه‌گیری عمق نفوذ مایع اشباع کننده (رودامین) را در نمونه‌های آزمون نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که در هیچ‌یک از تخته‌های مماسی و شعاعی، فشرده‌سازی تأثیری بر حداقل و حداکثر عمق نفوذ در جهت مماسی نداشته است. در مقابل، در تخته‌های شعاعی، فشرده‌سازی به طور معنی‌داری موجب بهبود عمق نفوذ مایع اشباع کننده در جهت شعاعی شد. نتایج پژوهش Zhao و همکاران (۲۰۱۸) نیز نشان داد که جهت

جدول ۲- حداکثر و حداقل عمق نفوذ مایع اشباع کننده در نمونه‌های آزمون در جهت مماسی و شعاعی (مقادیر بر حسب میلی‌متر)

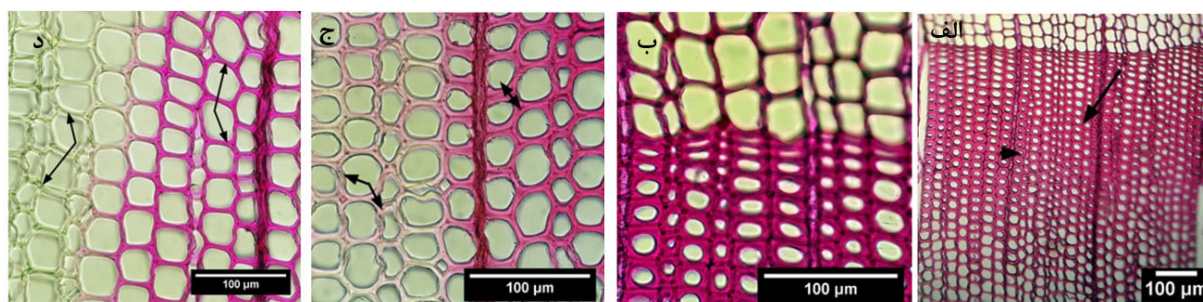
تیما	جهت مماسی		جهت شعاعی	
	حداقل نفوذ	حداکثر نفوذ	حداقل نفوذ	حداکثر نفوذ
تخته شعاعی شاهد	۱/۴۷ ^{a*}	۷/۵ ^a	۵/۸۲ ^a	(۱/۴۶)
تخته شعاعی فشرده شده (۱۰ درصد)	۱/۴۳ ^a	۹/۳۶ ^a	۱۱/۵۸ ^b	(۳/۲۵)
تخته شعاعی فشرده شده (۲۰ درصد)	۲/۶۹ ^a	۹/۴۹ ^a	۱۱/۵۱ ^b	(۰/۰۲)
تخته مماسی شاهد	۱/۲۹ ^a	۷/۷۵ ^a	۵/۰۳ ^a	(۰/۹۲)
تخته مماسی فشرده شده (۱۰ درصد)	۲/۳۳ ^a	۱۰/۵۲ ^a	۸/۹۳ ^{ab}	(۳/۳۷)
تخته مماسی فشرده شده (۲۰ درصد)	۱/۵۰ ^a	۸/۸۹ ^a	۷/۷۵ ^{ab}	(۱/۳۲)

مقطع عرضی مدور و دیوار سلولی ضخیم و با فضاهای بین سلولی مؤید این نوع چوب واکنشی در سوزنی‌برگان است. برخلاف نتایج پژوهش‌های گذشته مبنی بر نفوذپذیری کمتر چوب فشاری نوئل نروژی در مقایسه با چوب

در شکل ۷ تصاویر مربوط به اشباع‌پذیری میکروسکوپی تخته‌های شاهد مماسی ارائه شده است. نتایج مطالعات میکروسکوپی نشان داد که در نمونه‌های مورد مطالعه، بافت چوب فشاری وجود دارد. وجود سلول‌های تراکئیدی با

محل میدان تلاقی باشد. در چوب‌های سوزنی‌برگ خانواده کاج‌ها، بسته شدن دریاچه منافذ هاله‌دار تراکئیدها با توروس طی خشک شدن عامل اصلی کاهش اشباع‌پذیری سلول‌ها در هر دو جهت طولی و عرضی محسوب می‌شود. اگرچه در چوب‌های سوزنی‌برگ، پره‌های چوبی در انتقال سیال نقش مهمی بازی می‌کنند ولی در پهن‌برگان کم‌اهمیت هستند [۲۷]. منافذ هاله‌دار مهم‌ترین ساختار آناتومی در چوب‌های سوزنی‌برگان هستند که نفوذپذیری آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۲۸]. این منافذ اغلب در دیواره‌های شعاعی تراکئیدها قرار دارند و می‌توانند بزرگ‌تر از منافذ در دیواره‌های مماسی باشند. بیشتر از ۹۰ درصد از مقاومت کلی به عبور جریان سیال مربوط به منافذ دیوار تراکئیدها است و بخش کوچکی از جریان سیال نیز در کانال رزینی رخ می‌دهد [۲۹].

معمولی آن [۲۶]، نتایج پژوهش حاضر نشان داد که بافت چوب فشاری موجود در چوب کاج جنگلی به‌خوبی اشباع شده است (شکل ۷-الف). همچنین، نتایج مؤید اشباع کامل تراکئیدهای چوب آغاز و چوب‌پایان است (شکل ۷-الف). در شکل‌های ۷-ج و د الگوی اشباع‌پذیری تراکئیدهای اطراف پره چوبی قابل‌مشاهده است. بر این اساس، تراکئیدهای مجاور پره‌های چوبی به‌خوبی اشباع‌شده و تراکئیدهایی که در فاصله دورتری نسبت به پره چوبی قرار گرفته‌اند، اشباع‌نشده‌اند. به عبارتی، نفوذ از طریق پره‌های چوبی و از آن مسیر به تراکئیدهای مجاور، اصلی‌ترین مسیر نفوذ و اشباع در این نمونه‌ها بود. به‌طورکلی نتایج نشان داد که در نمونه‌های شاهد بافاصله گرفتن از سطح نمونه، میزان اشباع‌پذیری پره‌های چوبی کاهش‌یافته است. این مسئله می‌تواند ناشی از بروز پدیده مکش منفذی و بسته شدن دریاچه منافذ دیوار سلولی در



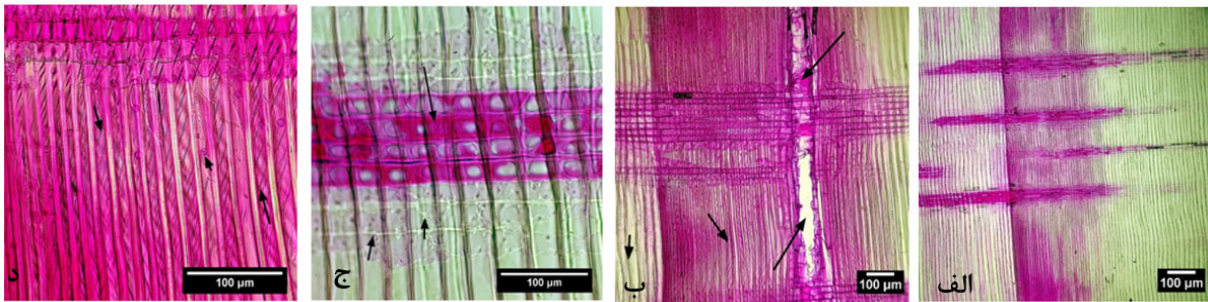
شکل ۷- اشباع‌پذیری میکروسکوپی تخته مماسی بدون فشرده‌سازی (شاهد). فلش‌ها به تراکئیدهای طولی اشاره دارند.

نداشته است و چوب‌پایان به‌خوبی اشباع‌شده است (شکل ۸-د). اعتقاد بر این است که در چوب‌های سوزنی‌برگ خشک‌شده خانواده کاج‌ها، اشباع‌پذیری چوب‌پایان، به علت مکش منفذی^۱ کمتر، بهتر از چوب آغاز است [۲۸]. در اثر خشک‌کردن چوب‌های سوزنی‌برگ مانند کاج جنگلی تقریباً دریاچه همه منافذ هاله‌دار موجود در دیوار تراکئیدها به علت گرادیان فشار مویبندی طی خروج آب آزاد با توروس بسته‌شده و اشباع‌پذیری آن را مختل می‌کند [۲۹]. نتایج پژوهش‌های انجام‌شده با استفاده از میکروسکوپ روبشی هم‌کانون لیزری^۲ حاکی از آن بود که در چوب فشرده‌شده، مایع اشباع‌کننده در ابتدا بین دو ناحیه چین‌خورده و سالم وارد می‌شود [۳۰].

شکل ۸ توزیع میکروسکوپی محلول اشباع را در تخته مماسی فشرده‌شده به میزان ۱۰ درصد نشان می‌دهد. الگوی اشباع بخش چوب‌پایان، پره چوبی و کانال‌رزینی در شکل‌های ۸-الف و ۸-ب قابل‌مشاهده است. نتایج نشان داد که اگرچه پره‌های چوبی به‌خوبی اشباع‌شده‌اند اما در تراکئیدهای عرضی اشباع رخ نداده است (شکل ۸-ج). به‌عبارت‌دیگر تراکئیدهای عرضی در مقایسه با پره‌های چوبی اشباع‌پذیری کمی دارند. Emaminasab و همکاران (۲۰۱۶) نیز دریافتند که پره‌های چوبی در چوب‌کششی و معمولی صنوبر به‌خوبی اشباع می‌شوند و عامل کنترل در میزان اشباع‌پذیری این نوع چوب‌ها، ابعاد و فراوانی منافذ بین دیوار آوندی است و نه ویژگی‌های پره‌های چوبی آن مانند طول و یا فراوانی آن‌ها [۲۷]. نتایج همچنین نشان داد که فشرده‌سازی اثر منفی بر اشباع‌پذیری چوب‌پایان

¹ Pit aspiration

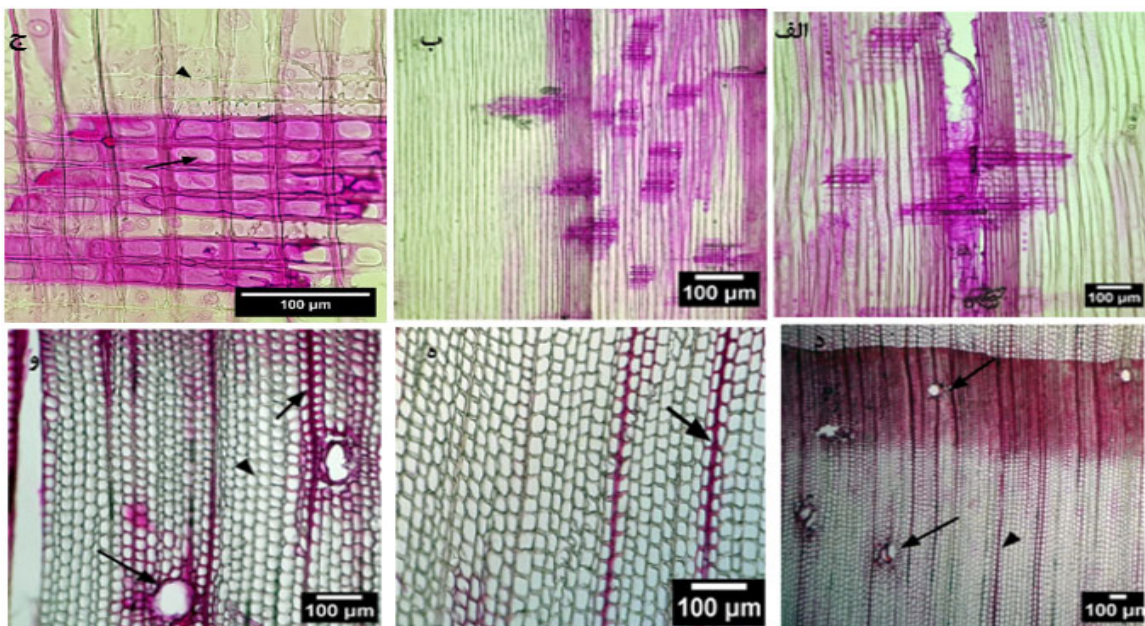
² Confocal laser scanning microscope



شکل ۸- اشباع پذیری میکروسکوپی تخته مماسی با فشردگی ۲۰ درصد. فلش‌های بلند و کوتاه در شکل «ب» به ترتیب به کانال رزینی و تراکئیدهای طولی اشاره دارند؛ در شکل «ج» فلش بلند و فلش‌های کوتاه نشانگر -به ترتیب- به پارانشیم‌ها و تراکئیدهای عرضی اشاره دارند؛ وجود ترک‌های حلزونی در شکل د (فلش‌ها) مشخص است.

تراکئیدهای عرضی در مقطع شعاعی است. تصویر ۹-د نیز نشان می‌دهد که فشردگی اثر منفی بر روند اشباع کانال‌های رزینی نداشت (فلش)، همچنین پارگی پرهی چوبی در اثر فشردگی اتفاق افتاده است (سرفلش). Matsumura و همکاران (۱۹۹۸) نیز دریافتند که بین تعداد کانال‌های رزینی چوب لاریکس ژاپنی و میزان نفوذپذیری آن همبستگی مثبت وجود دارد [۳۱]. تصویر ۹-ه نشان می‌دهد تنها اشعه‌های چوبی و تراکئیدهای مجاور آن‌ها (فلش) اشباع شده‌اند. تصویر ۹-و نشان می‌دهد سلول‌های اطراف کانال رزینی (فلش بلند) و اشعه چوبی (فلش کوتاه) اشباع شده‌اند در حالی که تراکئیدهای دورتر نسبت به اشعه‌ی چوبی (سر فلش) اشباع نشده‌اند.

در شکل ۹ اشباع‌پذیری میکروسکوپی تخته شعاعی با میزان فشردگی ۲۰ درصد نمایش داده شده است. همان‌گونه که از شکل پیداست پره‌های چوبی و تراکئیدهای طولی در محل میدان تلاقی^۱ به خوبی اشباع شدند (شکل ۹- الف و ب). به بیان دیگر می‌توان نتیجه گرفت که ابعاد و فراوانی منافذ نیمه هاله‌ای در میدان تلاقی در چوب کاج جنگلی عامل محدودکننده در اشباع‌پذیری این‌گونه محسوب نمی‌شود، درحالی‌که Tarmian و Perre (۲۰۰۹) گزارش کردند که در چوب نوئل نروژ، ویژگی‌های جفت منافذ دیوار سلولی در میدان تلاقی نقش مهمی را در کنترل جریان سیال ایفا می‌کند [۲۶]. شکل ۹- ج حاکی از اشباع پارانشیم‌های عرضی و عدم اشباع



شکل ۹- اشباع‌پذیری میکروسکوپی تخته شعاعی با فشردگی ۲۰ درصد

^۱ Cross-field area

نتیجه‌گیری

تأثیری بر اشباع‌پذیری تراکئیدهای عرضی نداشت. کانال‌های رزینی نیز چه در نمونه‌های معمولی و چه در نمونه‌های فشرده‌شده به‌خوبی اشباع شدند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش، به نظر می‌رسد که پیش‌گرم کردن چوب با رطوبت ۱۲ درصد در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد برای نرم کردن بافت چوب قبل از فشرده‌سازی کافی نبوده است. اگرچه توسعه ترک‌های میکروسکوپی در بافت چوب در اثر فشرده‌سازی در بهبود اشباع‌پذیری آن یک مزیت به شمار می‌آید ولی وقوع ترک‌های ماکروسکوپی در کاهش قابل‌توجه مقاومت‌های مکانیکی چوب فشرده‌شده یک نقطه‌ضعف مهم محسوب می‌شود؛ بنابراین، پیشنهاد می‌شود برای جلوگیری از شکست بیش‌ازحد ساختار چوب در حین پرس و گسترش ترک‌های سطحی ماکروسکوپی و ترک‌های داخلی، پیش‌تیمار بخار دهی برای آماده‌سازی، نرم کردن و گرم کردن بافت چوب قبل از مرحله پرس اعمال شود. همچنین، می‌توان پیش از گرم کردن بافت چوب، رطوبت بر روی سطح چوب اسپری کرده و از دمای بالاتر از ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد در مرحله پیش‌گرم کردن استفاده کرد. با توجه به این‌که مقدار اشباع‌پذیری چوب بسته به نوع ماده حفاظتی و ویژگی‌های آن می‌تواند متفاوت باشد، بنابراین پیشنهاد می‌شود که اثرات فشرده‌سازی سطحی و حجمی چوب بر عمق نفوذ مواد حفاظتی مختلف با ترکیبات شیمیایی متفاوت مورد بررسی قرار گیرد و توزیع میکروسکوپی هر یک از عناصر شیمیایی موجود در مواد حفاظتی تجاری مانند مس در بافت چوب فشرده‌شده تعیین شود.

مطالعات میکروسکوپ نوری نشان داد که در اثر فشرده کردن چوب کاج جنگلی، چین‌خوردگی سلولی به‌وضوح در سلول‌های تراکئیدی چوب آغاز با دیوار نازک و پره‌های چوبی رخ می‌دهد. فشرده‌سازی بر بهبود اشباع‌پذیری تخته‌های مماسی چندان تأثیرگذار نبود ولی در تخته‌های شعاعی به‌ویژه با درصد فشرده‌گی بالا مقدار سطح اشباع بهبود یافت. همچنین، نتایج نشان داد که مقدار عمق نفوذ مایع اشباع‌کننده در جهت مماسی تخته‌ها در اثر فشرده‌گی تغییر نمی‌کند ولی در جهت شعاعی مقدار عمق نفوذ در تخته‌های شعاعی فشرده‌شده بهبود یافت. در مجموع می‌توان نتیجه‌گیری کرد که بهبود اشباع‌پذیری چوب کاج جنگلی در تخته‌های شعاعی با موفقیت بیشتری در مقایسه با تخته‌های مماسی همراه است و عمق نفوذ مایع اشباع‌کننده در تخته‌های فشرده متاثر از جهات ارتوتروپیک چوب بوده و در جهت شعاعی در مقایسه با جهت مماسی بیشتر است. یکی از دلایل بهبود اشباع‌پذیری سلول‌های چوبی در اثر فشرده‌گی، می‌تواند ناشی از توسعه ترک‌های میکروسکوپی در دیوار سلول‌ها و نیز در محل منافذ دیوار سلول‌های چین‌خورده باشد. مطالعات اشباع‌پذیری میکروسکوپی نشان داد پره‌های چوبی به‌خوبی اشباع‌شده‌اند اما در تراکئیدهای عرضی اشباع رخ نداده است و در مقایسه با پره‌های چوبی اشباع‌پذیری کم‌تری داشتند. در مجموع، اشباع‌پذیری سلول‌های چوب پایان به‌تر از سلول‌های چوب آغاز بود و در اثر فشرده‌سازی بر اشباع‌پذیری پره‌های چوبی نیز افزوده شد ولی

منابع

- [1] Sandberg, D., Haller, and P., Navi, P. 2013. Thermo-Hydro and thermo-hydro-mechanical wood processing: an opportunity for future environmentally friendly wood products, *Wood Material and Science & Engineering*, 8(1): 64-88.
- [2] Shams, M.D., and Yano, H. 2009. A new method for obtaining high strength pf resin impregnated wood composites at low pressing pressure. *Journal of Tropical Forest Science*. 21(2):175-180.
- [3] Mehmandoost, M., and Khazaecian, A. 2014. The effect of chemical treatment and compression percent on mechanical properties of paulownia compressed wood. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 5(2): 69-80.
- [4] Madhoushi, M., Grey, M., Tabarsa, T., and Rafighi, A. 2012. Nail and screw withdrawal strength, moe and mor in densified poplar wood. *Journal of Wood & Forest Science and Technology*, 18(4): 45-58.

- [5] Gabrielli, C., and Kamke, F. A. 2008. Treatment of chemically modified wood with vtc process to improve dimensional stability. *Forest Products Journal*, 58; 82-86.
- [6] Sadatnezhad, SH., Khazaeian, A., Sandberg, D., and Tabarsa, T. 2017. Continuous surface densification of wood: a new concept for large-scale industrial processing. *Bioresources*, 12 (2): 3132-3122
- [7] Laine, K., Rautkari, L., Hughes, M., Kutnar, A. 2103. Reducing the set-recovery of surface densified solid Scots pine wood by hydrothermal post-treatment. *European Journal of Wood and Wood Products*, 71 (1): 17-23
- [8] Petric, M. 2013. Surface modification of wood: a critical review. *Reviews of Adhesion and Adhesives*, 1(2): 216-247.
- [9] Usta, I. 2005. A review of the configuration of bordered pits to stimulate the fluid flow. *Ciencia y tecnología*, 7(2): 121-132.
- [10] Morris, P.L., Byrne, A., Mackay, J.F.G., and Mcfarling, S.M. 1997. The effect of steaming prior to pressure treatment on the penetration of borates into western hemlock. *Forest Products Journal*, 47(3): 62-65.
- [11] Lehringer, C., Richter, K., Schwarze, F, W. M. R., and Militz, H. 2009. A review on promising approaches for liquid permeability improvement in softwoods. *Wood and Fiber Science*, 41(4): 373:385.
- [12] Hansmann, C., Gindl, W., Wimmer, R., and Teischinger, A. 2009. Permeability of wood: A review. *Wood Research*, 47(4):1-16.
- [13] Lehringer, C. 2011. Permeability improvement of norway spruce wood with the white rot fungus *physisporinus vitreus*. Georg-August-University, Gottingen (PhD thesis).
- [14] Emaminasab, M., Tarmian, A., and Pourtahmasi, K, 2015. Permeability of poplar normal wood and tension wood bioincised by *physisporinus vitreus* and *xylaria longipes*. *International Biodeterioration & Biodegradation* 105 .178-184.
- [15] Emaminasab, M. , Tarmian, A. , Oladi, R., Pourtahmasi, K., and Avramidis, S. 2016. Fluid permeability in poplar tension and normal wood in relation to ray and vessel properties. *Wood Science and Technology*, 51:261-272.
- [16] Dashti, H. Tarmian, A., Faezipour, M., Hedjazi, S., and Shahverdi, M. 2013. Mass transfer through microwave-treated fir wood (*abies alba l.*): a gymnosperm species with torus margo pit membrane. *Drying Technology*, (31); 359:364.
- [17] Dashti, H., Tarmian, A., Faezipour, M., Hedjazi, S., Shahverdi, M. 2012. Effect of pre-steaming on mass transfer properties of fir wood (*Abies alba L.*); A gymnosperm species with torus margo pit membrane. *Bioresources*, 7(2): 1907-1918.
- [18] Sayar, M., and Tarmian, A. 2013. Modification of water vapor diffusion in poplar wood (*populus nigra l.*) by steaming at high temperatures. *Turkish Journal of Biology*, 37: 511-515.
- [19] Ramezanpour, M., Tarmian, A., and Taghiyari, H.R. 2015. Improving impregnation properties of fir wood to acid copper chromate (ACC) with microwave pre-treatment. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, 8: 89-94.
- [20] Xu, H., Taghiyari, H.R., Clauson, M., Milota, M.R., and Morrel, J.J. 2018. Effect of supercritical carbondioxide treatment on gas permeability of *Palulownia fortunei* heartwood and sapwood. *Wood and Fiber Science*, 51(1): 1-5.
- [21] Kutnar, A., Kamke, F.A., and Sernek, M. 2009. Density profile and morphology of viscoelastic thermal compressed wood. *Wood Science and Technology*, 43(1):57-68.

- [22] Dogu, D., Tirak, K., Candan, Z., and Unsal, O. 2010. Anatomical investigation of thermally compressed wood panels. *Bioresources*, 5(4): 2640-2663.
- [23] Tirak Hizal, K., Dogu, D., Candan, Z., and Unsal, O. 2012. Anatomical investigation of thermally compressed eucalyptus wood panels. *Proceedings of the 55th International Convention of Society of Wood Science and Technology*, Beijing, CHINA Paper PS-6 .1 -7.
- [24] Zhao, Y., Wang, Z., Iida, I., and Guo, J . 2018. Studies on pre-treatment by compression for wood impregnation i: effects of compression ratio, compression direction, compression speed and compression-unloading place on the liquid impregnation of wood: *Journal of Wood Science*, 64: 551-556.
- [25] Bekhta, P, Mamon'ova, M., Sedliac'ik, j , and Nova'k, I. 2016. Anatomical study of short-term thermo-mechanically densified alder wood veneer with low moisture content. *European Journal of Wood Products*, 74:643-652.
- [26] Tarmian, A., and Perre, P. (2009). Air permeability in longitudinal and radial directions of compression wood of *Picea abies* L. and tension wood of *Fagus sylvatica* L. *Holzforschung*, 63 (3): 352-356.
- [27] Emaminasab, M., Tarmian, A., Oladi, R., Pourtahmasi, K., and Avramidis, S. 2016. Fluid permeability in poplar tension and normal wood in relation to ray and vessel properties. *Wood Science and Technology*, 51:261-272.
- [28] Hamsmann, C., Gindi, W., and Wimmer, R. 2002. Permeability of wood: a review. *Wood Research*, 47(4):1-16.
- [29] Flynn, K. A. 1995. A review of the permeability, fluid flow, and anatomy of spruce (*Picea* spp.) *Wood and Fiber Science*, 7(3): 278:284.
- [30] Abe, H., Funada R., Kuroda, N., Furusawa O., Shibagaki, M., and Fujii, T. 2001. Confocal laser scanning microscopy of water uptake during the recovery of compressed and drying-set wood. *IAWA*, 22(1):63-72.
- [31] Matsumura, J. E., Booker, R. A., Donaldson, L.G. and Ridoutt, B. 1998. Impregnation of radiata pine wood by vacuum treatment: identification of flow paths using fluorescent dye and confocal microscopy. *IAWA Journal*, 19 (1): 25-33.

Effect of Surface Densification on Treatability of Scots pine Wood and Micro-Distribution of Impregnating Liquid

Abstract

In the present research, the effect of surface densification on the treatability of Scots pine wood and micro-distribution of a saturation solution in the wood was studied. Densification was carried out at two compression ratios of 10 and 20% along the radial and tangential directions of wood with 12% EMC (equilibrium moisture content) at a pressure of 20 kg cm⁻² and the temperature of 160 °C for 3 min. In order to determine the treatability, the wood specimens were impregnated with 0.5% Rhodamine B dye using alternating pressure method (APM) with an initial vacuum. Then, the treatability parameters were determined using ImageJ software and light microscopic studies. Results showed that the effect of densification on the treatability varies depending on the compression ratio and direction. The treatability of ray parenchyma cells increased by densification, whereas ray tracheids were not impregnated. The treatability of latewood was better compared with the earlywood, and the resin canals were also well treated.

Keywords: surface densification, *pinus sylvestris*, treatability, micro-distribution.

B. Gholampoor¹

A. Tarmian^{2*}

R. Oladi²

D. Efhami Sisi³

¹ MSc., Department of Wood and Paper Science & Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

² Associate Professor, Department of Wood and Paper Science & Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

³ Assistant Professor, Department of Wood and Paper Science & Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

Corresponding author:

tarmian@ut.ac.ir

Received: 2019/05/06

Accepted: 2019/08/01