

Polymerization
Quarterly, 2024
Volume 14, Number 3
Pages 25-34
ISSN: 2252-0449

A Review of the Manufacturing and Development of Transparent Wood

Soghra Yadollahi^{1,2*} and Davood Rasouli¹

1. Department of Wood Engineering and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
2. Department of Wood Engineering and Technology, Azadshahr Branch, Islamic Azad University, Azadshahr, Iran

Received: 2 July 2023, Accepted: 9 January 2024

Abstract

Transparent wood is environmentally friendly and biocompatible that have attracted great attention owing to its transparency, stability, and multi-functionality. As an emerging material, transparent wood has many advantages such as renewable, low cost, suitable optical properties, outstanding mechanical performance, and low thermal conductivity. Lignin removal or modification, followed by impregnation with polymer with similar refractive index to the wood substrate is the most important factor in making of transparent wood. In this article, first, the structural characteristics of wood and its chemical composition, and then the effect of removing lignin, wood species, and types of resin on the characteristics of transparent wood are reviewed. Finally, its optical, mechanical and thermal are presented.

Key Words

transparent wood,
delignification,
lignin modification,
transmittance,
haze

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: s.yadollahi1353@gmail.com

مروری بر ساخت و توسعه چوب شفاف

صغری یداللهی^{۱*}، داوود رسولی^۲

۱- گرگان، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گروه تکنولوژی و مهندسی چوب

۲- آزادشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد آزادشهر، گروه تکنولوژی و مهندسی چوب

دریافت: ۱۴۰۲/۴/۱۱، پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۹

چوب شفاف با محیط زیست، زیست سازگار است که به دلیل شفافیت، پایداری و چندمنظوره بودن مورد توجه قرار گرفته است. چوب شفاف به عنوان ماده‌ای نوظهور با ویژگی‌هایی مانند تجدیدپذیری، قیمت کم، خواص نوری مناسب، عملکرد مکانیکی خوب و رسانندگی گرمایی ضعیف، مزیت‌های فراوانی دارد. حذف یا اصلاح لیگنین و به دنبال آن اشباع با پلیمری که ضریب شکست نور مشابه با چوب دارد، مهم‌ترین عامل در ساخت چوب شفاف است. در این مقاله، ابتدا ویژگی‌های ساختاری چوب و ترکیبات شیمیایی آن و سپس تأثیر حذف لیگنین، گونه‌های چوبی و انواع رزین بر ویژگی‌های چوب شفاف مرور می‌شود. در نهایت به مطالعات انجام شده درباره خواص چوب شفاف، از جمله ویژگی‌های نوری، خواص مکانیکی و عملکرد گرمایی پرداخته می‌شود.

چکیده



صغری یداللهی



داوود رسولی

واژگان کلیدی

چوب شفاف،
لیگنین زدایی،
اصلاح لیگنین،
عبور نور،
تیرگی

توسعه پایدار در انرژی و محیط زیست همواره موضوع مهمی در جامعه مدرن بوده است. استفاده از مواد زیستی به عنوان جایگزینی برای مواد برپایه نفت در طیف وسیعی از محصولات و کاربردها، توجه پژوهشگران را جلب کرده است. چوب به عنوان ماده زیستی مهم، به لحاظ خواص مکانیکی، مستحکم بوده و قابلیت استفاده بالقوه در کاربردهای مختلف از قبیل صنعت مبلمان و ساختمان را دارد [۱]. این ماده با ساختار پیچیده از سه ماده اصلی سلولوز، همی سلولوز و لیگنین تشکیل شده است. چوب به دلیل داشتن ساختار ناهمگن، متخلخل و ترکیبات شیمیایی متفاوت، به راحتی اصلاح پذیر است که عمدتاً با هدف بهبود پایداری ابعادی، استحکام مکانیکی، مقاومت در برابر آتش و پایداری گرمایی انجام می شود [۲].

در دهه های گذشته، پژوهش های بسیاری در زمینه طراحی محصولات جدید برپایه چوب یا چوب اصلاح شده برای برآورده کردن نیازهای جدید مصرف کنندگان انجام گرفته و محصولاتی با رسانندگی گرمایی کم، آب گریزی زیاد، شفافیت و قابلیت ایجاد ویژگی های مغناطیسی تولید شده است [۳]. یکی از این محصولات، چوب شفاف است که از طریق لیگنین زدایی یا اصلاح لیگنین در چوب و سپس اشباع آن با پلیمر مناسب به دست می آید. Fink برای اولین بار در سال ۱۹۹۲ چوب شفاف را برای آسان سازی مطالعات شکل شناختی چوب معرفی کرد [۴]. در پی آن، مطالعات بیشتری درباره ساختار چوب شفاف انجام گرفت. با توجه به عملکرد مکانیکی مناسب آن، مطالعات بسیاری درباره این محصول با هدف به کارگیری در ساخت دستگاه های الکترونیکی، فوتونی و پنجره های هوشمند انجام شد [۵]. در این مطالعه، نحوه ساخت و چالش های مربوط به چوب شفاف، به ویژه نوع رزین و گونه های چوبی و همچنین ویژگی های نوری، گرمایی و مکانیکی آن بحث می شود.

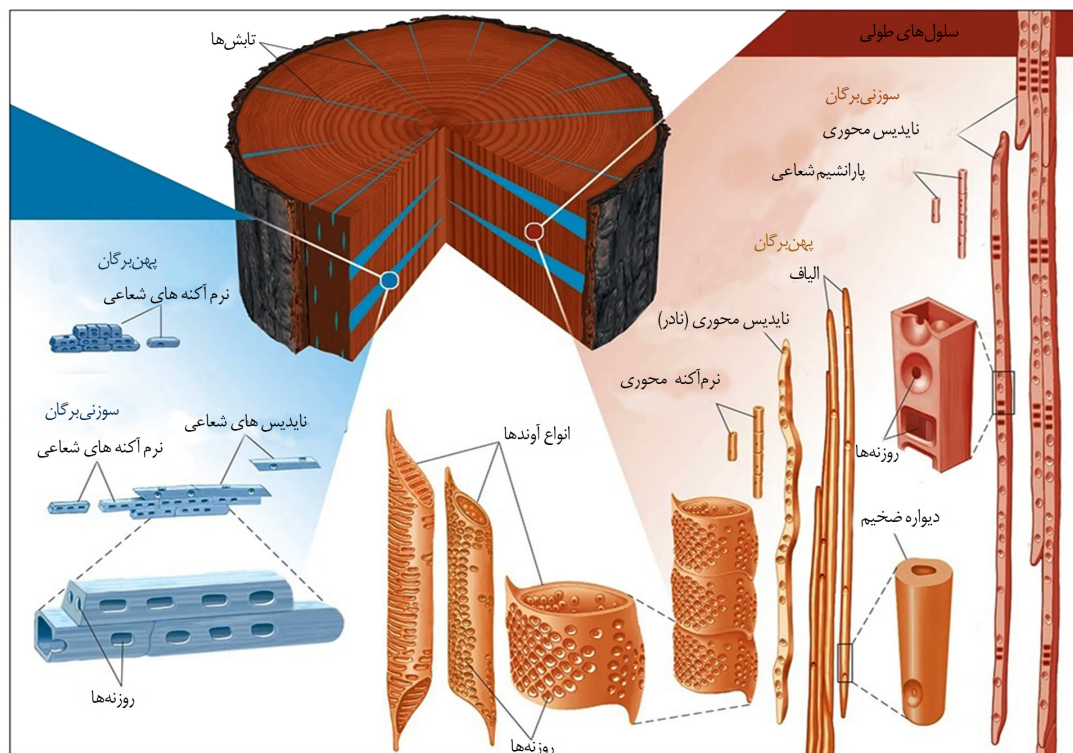
ویژگی های شیمیایی و آناتومی چوب

چوب از سلول های توخالی مختلف با شکل و اندازه های متفاوت تشکیل شده است. ساختار پیچیده و ناهمسان گرد چوب، این ماده طبیعی را به لحاظ کاربردی در جایگاه ویژه ای قرار می دهد. ساختار پیچیده آن را می توان از مقیاس ماکرو تا نانو مشاهده کرد. به عنوان مثال، می توان به وجود حلقه های رویش سالانه، تابش های چوبی، سلول ها، دیواره های سلولی و لایه های تشکیل دهنده آن و در نهایت ترکیبات مولکولی آن ها در مقیاس های مختلف اشاره کرد. درختان چوبی به دو گروه پهن برگان و سوزنی برگان تقسیم می شوند. پهن برگان، مانند گونه های بلوط، راش و افرا، برگ های

درشت و پهن دارند و در فصل پاییز یا زمستان خزان می کنند. در حالی که اکثر سوزنی برگان مانند انواع کاج ها، خزان کننده نبوده و غالباً دارای برگ های سوزنی شکل هستند. ساختار سلول های چوبی در سوزنی برگان و پهن برگان با هم متفاوت است و حتی این تفاوت ها در اندازه، شکل و نسبت دیواره به حفره سلولی نیز مشاهده می شود. همان طور که در شکل ۱ مشاهده می شود، سوزنی برگان عمدتاً از نایدیس ها (tracheids) تشکیل شده اند. اما تنوع سلولی پهن برگان به دلیل تکامل بیشتر آن ها پیچیده تر بوده و شامل الیاف، آوند و نرم آکنه (parenchyma) است [۶].

دیواره های سلولی چوب براساس توزیع سلولوز، همی سلولوز و لیگنین و جهتی که میکرولیفچه ها در آن قرار گرفته اند، به لایه میانی، دیواره اولیه و دیواره ثانویه تقسیم می شوند. دیوار ثانویه از لایه های S1، S2 و S3 تشکیل شده است. نانولیفچه های سلولوزی در دیواره های سلولی، جهت گیری موازی با زاویه مشخص (۱۰° تا ۹۰°) نسبت به محور طولی سلول دارند که کوچک ترین زاویه مربوط به لایه S2 (۱۰° تا ۳۰°) است. ترکیبات شیمیایی دیواره های سلولی چوبی در لایه های مختلف نیز متفاوت است، به طوری که بیشترین تراکم (غلظت) لیگنین در لایه میانی مشاهده می شود [۲]. دیواره های سلولی چوب از زیست پلیمر سلولوز، همی سلولوز و لیگنین تشکیل شده است. سلولوز از واحدهای تکرارشونده D-گلوکوز تشکیل شده است که از طریق پیوند اتری به هم متصل شده اند و بسته به گونه چوبی حدود ۴۰٪ تا ۵۰٪ وزنی چوب را تشکیل می دهند. سلولوز از طریق پیوند هیدروژنی درون زنجیری و بین زنجیری، زنجیرهای خطی محکمی را ایجاد می کند. زنجیرها بیشتر به شکل لیفچه های کنار هم با قطر تقریباً ۵-۳ nm بوده و اطراف آن ها را همی سلولوز و لیگنین می پوشاند. فاصله بین لیفچه های سلولوز در ابعاد نانو است و در نتیجه پس از حذف جزئی یا کامل ماده زمینه که شامل همی سلولوز و لیگنین است، نانو حفره ها در جهت نانولیفچه های سلولوز ظاهر شده و اصلاح چوب آسان می شود [۷]. همی سلولوز هم مانند سلولوز پلی ساکارید است اما شاخه های زیادی دارد. همی سلولوزها از پنتوزها و هگزوزهای مختلف تشکیل می شوند و حدود ۲۰٪ وزنی تا ۴۰٪ وزنی چوب را تشکیل می دهند. همی سلولوزها کاملاً در ارتباط با سلولوز بوده و پیونددهنده سلولوز با لیگنین هستند. لیگنین فراوان ترین پلیمر آروماتیک آلی تجدیدپذیر بوده که از ترکیبات فنولی تشکیل شده است و موجب سفتی دیواره های سلولی می شود. ساختار آناتومی و شیمیایی چوب در شکل ۲ نشان داده شده است [۸].

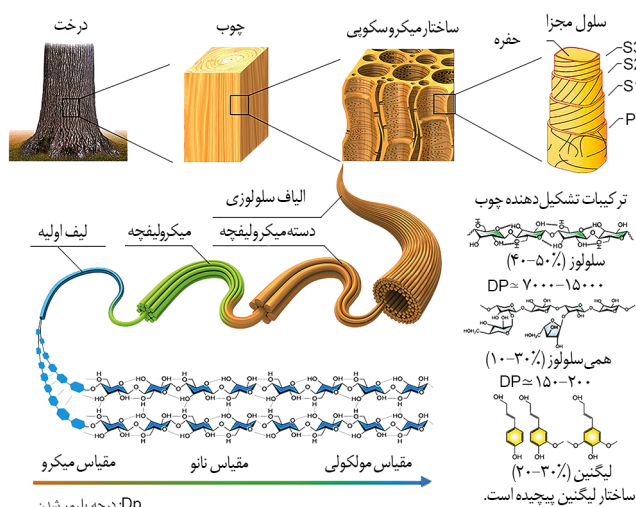
میزان تخلخل چوب بسته به گونه چوبی در محدوده ۲۰٪ تا ۹۰٪



شکل ۱- انواع سلول‌های چوب سوزنی‌برگان و پهن‌برگان [۶].

سیناپیل الکل تشکیل شده که نسبت آن‌ها در گونه‌های مختلف چوبی متفاوت است. رایج‌ترین پیوند در ساختار لیگنین، پیوندهای اتری β -آریل اتر (β -O-4) است. این پیوند در سوزنی‌برگان و پهن‌برگان به‌ترتیب حدود ۵۰٪ و ۶۰٪ از کل پیوندها را به‌خود اختصاص داده است که به‌آسانی می‌توان آن‌ها را جدا کرد. بنابراین، حذف لیگنین چوب با جداسازی این پیوند اتری انجام می‌گیرد [۲]. برای تهیه چوب شفاف عمدتاً از گونه‌های چوبی صنوبر (Poplar)، بالسا (Balsa)، نمدار (Basswood) و توس (Birch) استفاده می‌شود که جزء پهن‌برگان پراکنده‌آوند به‌حساب می‌آیند. در این دسته از پهن‌برگان، مرز مشخصی بین چوب آغاز و پایان وجود ندارد و به‌دلیل ساختار متخلخل یکنواخت‌تر، فرایند لیگنین‌زدایی آن‌ها آسان‌تر است. همچنین در گونه‌های چوبی سبک‌تر با تخلخل بیشتر، لیگنین را می‌توان راحت‌تر حذف کرده و در نتیجه خواص نوری مناسب‌تری را در محصول تولیدی مشاهده کرد [۹]. به‌عنوان مثال، بالسا دارای چگالی خیلی کم بوده که پس از تبدیل به چوب شفاف، قابلیت عبور نور زیادی داشته است. بدین دلیل، بالسا رایج‌ترین گونه‌ای است که برای ساخت چوب شفاف استفاده می‌شود [۹]. گونه‌های چوبی سبک مانند پالونیا و کاج به‌سبب وجود مواد استخراجی فراوان به‌ندرت برای تهیه چوب شفاف استفاده می‌شوند [۱۰].

متغیر است. اندازه‌های متفاوت منافذ در چوب باعث اشباع شدن بهتر با مواد شیمیایی و در نتیجه اصلاح بهتر آن می‌شود. از آنجا که لیگنین، اصلی‌ترین عامل جذب نور در چوب (۸۰٪ تا ۹۵٪) است، بنابراین برای شفاف کردن آن باید این ماده را خارج کرد. لیگنین دارای ساختار پیچیده بوده و شامل گروه‌های عاملی متنوع از جمله ساختارهای آروماتیک و گروه‌های متوکسی و هیدروکسیل است. پلیمر لیگنین از سه مونومر p-کوماریل الکل، کونیفریل الکل و



شکل ۲- نمایش ساختار آناتومی و شیمیایی چوب [۸].

چوب شفاف

چوب طبیعی در زیر نور مرئی در اثر پراکندگی و بازتاب نور در سطح مشترک دیواره‌های سلولی و حفره‌های سلولی و همچنین جذب زیاد نور به وسیله بافت چوب، شفاف نیست. رنگسازهای مرتبط با لیگنین و برخی مواد استخراجی تقریباً ۸۰٪ تا ۹۰٪ نور را در چوب جذب می‌کنند. واحدهای لیگنین دارای رنگسازهای پیچیده (مانند پیوندهای دوگانه کربن-کربن که با حلقه‌های آروماتیک ترکیب شده‌اند) بوده که مسئول ایجاد رنگ قهوه‌ای چوب و نیز عامل اصلی جذب نور در چوب هستند [۲]. از آنجاکه ضریب شکست نور در سلولوز ۱/۵۳ و ضریب شکست هوا تفاوت دارد، بنابراین رنگ چوب لیگنین‌زدایی‌شده، به دلیل عدم تطابق ضریب شکست سلولوز و هوا، مایل به سفید (شفاف نیست) است. برای کاهش پراکندگی نور، باید آن را با پلیمرهایی اشباع کرد که ضریب شکست آن‌ها به ضریب شکست چوب نزدیک‌تر است. پلی‌متیل متاکریلات و رزین اپوکسی به سبب عملکرد خوب مکانیکی و نوری، بیشترین کاربرد را در تولید چوب شفاف دارند [۷]. پژوهشگران با وجود توجه به مطابقت ضریب شکست انواع رزین با چوب لیگنین‌زدایی‌شده، به عملکرد رزین، تجزیه‌پذیری، استحکام مکانیکی و مسائل زیست‌محیطی نیز توجه دارند. بنابراین، انتخاب و اصلاح رزین راه مهمی برای بهبود و اصلاح عملکرد چوب شفاف است.

برای ساخت مواد چوبی شفاف مطابق شکل ۳، توجه به دو مرحله ضروری است:

- ۱- حذف یا اصلاح لیگنین که مهم‌ترین عامل جذب نور است.
- ۲- هماهنگ کردن ضریب شکست اجزای چوب رنگ‌بری‌شده و



شکل ۳- نمایش راهبردهای اشباع با پلیمر و فشرده‌سازی در ساخت چوب شفاف (TW) و فیلم چوب شفاف (TWF) [۱۱].

هوای موجود در حفره‌های سلولی.

برای هماهنگ کردن ضریب شکست می‌توان به دو روش عمل کرد:
الف- آغشته‌سازی چوب رنگ‌بری‌شده با پلیمرهای دارای ضریب شکست مناسب؛
ب- فشرده‌سازی چوب رنگ‌بری‌شده و تبدیل آن به فیلم‌های نازک شفاف [۱۱].

لیگنین‌زدایی یا اصلاح لیگنین

به‌طور کلی، آماده‌سازی چوب با حذف لیگنین از چوب (لیگنین‌زدایی) یا حذف رنگسازها در لیگنین (اصلاح لیگنین) با فرایندهای مختلف شیمیایی آغاز می‌شود. دستیابی به نانو ساختار دیواره‌های سلولی از طریق کنترل دقیق عمل‌آوری‌های شیمیایی و شرایط فراوری از قبیل زمان عمل‌آوری، غلظت محلول‌های شیمیایی، مقدار اسیدینگی و دما امکان‌پذیر است. عمل‌آوری اسیدی با سدیم کلریت (NaClO_2) معمولاً برای لیگنین‌زدایی استفاده می‌شود. چوب به‌طور ملایم با استفاده از محلول آبی ۱٪ تا ۵٪ NaClO_2 در بافر استات با اسیدینگی ۴/۶ به مدت ۶ h تا ۱۸ h، بسته به اندازه و جهت برش نمونه عمل‌آوری می‌شود. این مسئله موجب حذف لیگنین و ایجاد منافذ در مقیاس نانو و میکرو در دیواره سلولی با حفظ شکل و ساختار اصلی چوب می‌شود [۱۲]. NaClO_2 در محلول بافر استات، کلریدریک اسید ناپایدار تولید می‌کند که می‌تواند به کلر و کلر دی‌اکسید تجزیه شده و باعث واکنش با لیگنین از طریق اکسایش ساختار فنولی یا حلقه‌گشایی فنوکسیل رادیکال شود [۲]. از این روش برای لیگنین‌زدایی بالسا استفاده و مشاهده شد، مقدار لیگنین در آن از ۲۴/۹٪ وزنی به ۲/۹٪ وزنی کاهش یافته است [۱۳].

روش دیگر لیگنین‌زدایی، استفاده از سولفیت سدیم قلیایی ($\text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{NaOH}$) است. در شرایط پخت قلیایی، یون‌های سولفیت، بی‌سولفیت و هیدروکسید با کمپلکس‌های کربوهیدرات لیگنین واکنش می‌دهد و موجب شکستن پیوندهای اتری می‌شود. در ادامه، فرایند رنگ‌بری با هیدروژن پراکسید (H_2O_2) می‌تواند موجب کاهش لیگنین به کمتر از ۳٪ وزنی نیز شود. در فرایند دیگر، محلول پراستیک اسید یا استیک اسید گلاسیال- H_2O_2 می‌تواند به‌طور انتخابی لیگنین را حذف کند [۱۴]. یون‌های هیدروکسونیوم که از پیوندهای پراکسی تولید می‌شوند، می‌توانند به موقعیت‌های غنی از الکترون در لیگنین (زنجر جانبی آلیفاتیک و حلقه بنزن) حمله کنند و موجب جداسازی لیگنین و حل شدن آن در آب شوند [۲]. درواقع لیگنین به‌هنگام اصلاح از چوب خارج نمی‌شود،

بلکه ساختار آن تغییر می‌یابد. با توجه به اینکه نقش لیگنین در چوب مانند چسبی است که هولو سلولوزها (مجموع سلولوز و همی سلولوز) را به هم متصل می‌کند، با خروج لیگنین از لایه میانی، ساختار چوب تضعیف می‌شود [۱۵]. افزون بر این طی فرایندهای لیگنین زدایی، برخی مواد شیمیایی سمی (مانند کلر، متیل مرکاپتان، هیدروژن سولفید و دی متیل سولفید) تولید می‌شود. این مواد در مقیاس بزرگ باعث ایجاد مشکلات زیست محیطی می‌شوند. به همین خاطر، اصلاح ساختار لیگنین مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است.

در گزارش Li و همکاران، راهبرد حفظ لیگنین با استفاده از محلول سفیدکننده $\text{Na}_2\text{SO}_3/\text{NaOH}/\text{H}_2\text{O}_2$ با حفظ ۸۰٪ لیگنین، باعث ویژگی‌های مکانیکی مطلوب‌تری شد. Zhu و همکاران، روش اصلاح لیگنین با استفاده از قلم‌مو را برای آغشته‌سازی چوب به H_2O_2 به همراه نور کاتالیز پیشنهاد دادند. مزیت این روش، مصرف انرژی و مواد شیمیایی کمتر آن در مقایسه با غوطه‌وری چوب در محلول سفیدکننده ذکر شده است [۷]. از آنجاکه در این روش نیازی به عملیات غوطه‌وری نیست، استفاده از نمونه‌های چوبی بسیار بزرگ‌تر ($110 \times 1 \times 400 \text{ mm}^3$) امکان‌پذیر است.

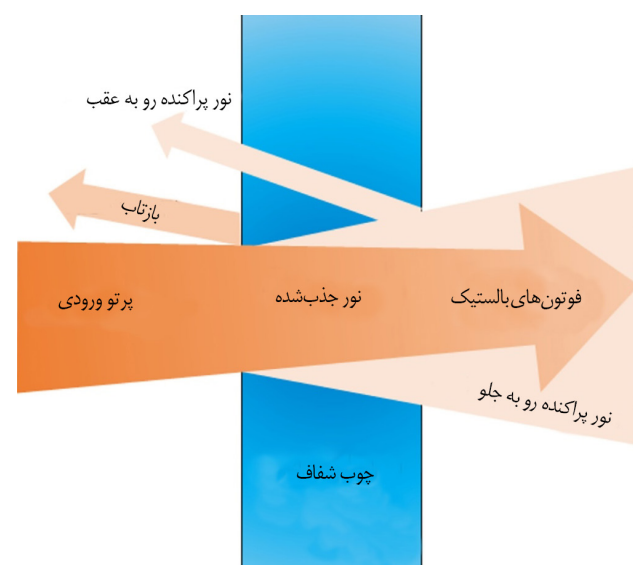
اشباع با پلیمر یا فشرده‌سازی

دومین گام در ساخت چوب شفاف، حذف پراکندگی نور است که می‌تواند از طریق دو رویکرد اصلی به دست آید:

الف- روش اشباع با پلیمر؛

ب- روش متراکم‌سازی.

در ساخت چوب شفاف به روش اشباع با پلیمر، چوب لیگنین زدایی شده به وسیله پلیمرهایی با ضریب شکست (n) نزدیک به ضریب شکست دیواره سلولی، اشباع می‌شود. افزون بر PMMA و رزین اپوکسی از سایر پلیمرهای با ضریب شکست همسان از جمله پلی‌وینیل الکل ($n \approx 1/53$)، پلی‌وینیل پیرولیدون ($n \approx 1/53$)، پلی‌ایمید ($n \approx 1/45$)، گرماسخت تیول-ان ($n \approx 1/56$)، ویتیرمرها (vitrimers)، پلی‌لیمونن آکریلات ($n \approx 1/52$) و ملامین فرمالدهید ($n \approx 1/50$) برای اشباع چوب لیگنین زدایی شده استفاده شده است. در برخی موارد، انقباض پلیمرها طی فرایند پلیمرشدن یا پخت موجب ایجاد ترک یا نقص در امتداد سطح مشترک پلیمر و دیواره سلولی می‌شود که همین مسئله اثر نامطلوبی بر عملکردهای نوری و مکانیکی چوب شفاف تولیدی داشته است. این مشکل را می‌توان با انتخاب گرماسخت تیول-ان با ضریب انقباض کمتر به عنوان پلیمر پرکننده بهبود بخشید [۱۶].



شکل ۴- مسیر حرکت پرتوهای نور در چوب شفاف [۷].

سلولی در اثر کماتش حاصل از نیروی موینگی می شود که در نتیجه تبخیر آب و ایجاد فشار منفی به وجود می آید. زمانی که دو سمت لومن در ارتباط با هم قرار می گیرند، پیوندهای هیدروژنی قوی میان گروه های هیدروکسیل فراوان در لیفچه های سلولوز شکل می گیرند و تراکم زیادی حاصل می شود. بنابراین، چوب لیگنین زدایی شده اکسید شده با تمپو با خشک شدن در محیطی بدون فشار مکانیکی یا گرما با تشکیل پیوندهای هیدروژنی قوی و فراوان و فروپاشی کامل دیواره های سلولی به فیلم شفاف خودمترکم تبدیل می شود که ویژگی های مکانیکی و نوری مناسبی نیز دارد [۲۰].

ویژگی های چوب شفاف

ویژگی های نوری

دو کمیت بسیار مهم در ویژگی های نوری چوب شفاف، درصد عبور نور و درصد مه هستند. پیش از بحث درباره این خواص نوری، باید مسیر حرکت پرتوهای نور در چوب شفاف (شکل ۴) را دانست. عبور پرتو نور از میان چوب شفاف می تواند تحت بازتاب (R)، پراکندگی (به عقب و جلو، BS و FS) و جذب (A) قرار گیرد. پارامترهای مربوط به چوب شفاف مانند عدم تطابق ضریب شکست چوب و پلیمر، وجود فضاهای خالی، ساختار ناهمگن چوب و میزان حذف لیگنین بر رفتار پرتو نور درون چوب شفاف اثرگذار است. به طور کلی، میزان عبور نور (T)، مقدار کل نور منتقل شده از طریق نمونه (نور پراکنده و مستقیم) است که میزان آن با فرمول زیر بیان می شود [۹]:

$$T = B + FS = I - A - R - BS \quad (1)$$

که در آن، T کل مقدار نور عبوری از نمونه، B تعداد فوتون های بالستیک عبوری از نمونه، I مقدار پرتو ورودی، A و R کل مقدار نور جذبی و بازتابی و BS مقدار نور پراکنده شده به سمت عقب به وسیله نمونه است. تیرگی، مقدار نسبی نور پراکنده رو به جلو (FS) را توصیف می کند که نشانگر وضوح تصویر مشاهده شده از چوب شفاف است و می توان آن را با فرمول زیر به دست آورد:

$$Haze = FS/T \quad (2)$$

گروه های رنگساز لیگنین در اثر جذب پرتوهای نوری، اثر مهمی بر میزان عبور نور در چوب شفاف دارند. به طوری که میزان عبور نور با کاهش مقدار لیگنین افزایش می یابد [۲۱]. افزون بر این، شدت

عبور نور در چوب شفاف تحت تأثیر انواع رزین [۷]، گونه چوبی [۲۲]، نسبت حجمی سلولوز [۲۳]، جهت الیاف سلولوزی [۱۷] و ضخامت نمونه [۱۰] است. در هنگام عبور نور از چوب، ساختار پیچیده آن باعث پراکندگی ناهمگن و شدید نور می شود [۱۷]. ضخامت چوب شفاف نیز بر میزان عبور نور اثر مهمی دارد، زیرا اشباع کامل منافذ با پلیمر در نمونه های با ضخامت زیاد مشکل تر است. از آنجا که پراکندگی نور درون منافذ و در سطح مشترک منافذ-پلیمر رخ می دهد، هرچه تغییرات ضریب شکست در این مناطق بیشتر باشد، باعث پراکندگی بیشتر می شود و در نتیجه میزان عبور نور کاهش می یابد [۲۴]. به عنوان مثال، میزان عبور نور در چوب های شفاف ساخته شده با گونه های بالسا، کاج، توس و زبان گنجشک بررسی شد. نتایج نشان داد، بیشترین میزان عبور نور به ترتیب بالسا < کاج < توس < زبان گنجشک انجام شد [۲۳].

همان گونه که مشاهده می شود، میزان عبور نور با چگالی چوب رابطه معکوس دارد. به طوری که هر قدر چگالی چوب بیشتر باشد، میزان حجمی سلولوز بیشتر می شود و در نتیجه ضریب شکست کل افزایش و میزان عبور نور کاهش می یابد. در چوب شفاف به دلیل پراکندگی نور داخلی ناشی از عدم تطابق ضریب شکست سلولوز و پلیمر زمینه، درصد تیرگی زیاد است. شکاف های حاصل از شکست پیوندهای چوب-پلیمر در داخل کامپوزیت ها نیز به افزایش درصد تیرگی منجر می شود [۱۰]. اما پیوندهای قوی هیدروژنی پلیمر طبیعی کیتوسان با سلولوز موجب کاهش درصد تیرگی شده و مقدار آن در چوب شفاف حاصل از چوب لیگنین زدایی شده و اشباع شده با کیتوسان، ۴۰٪-۳۰٪ گزارش شده است [۲۵]. به طور کلی، ماده ای با تیرگی زیاد، میزان عبور نور کمتری دارد. اما در چوب شفاف، حالت منحصربه فردی از میزان عبور نور و تیرگی زیاد مشاهده می شود [۹]. وضوح تصویر در نمونه های چوب شفاف نسبتاً نازک، هنگامی که فاصله بین اجسام و چوب شفاف کم باشد، با شیشه قابل مقایسه است. اما وضوح اجسام با افزایش فاصله از چوب شفاف کاهش می یابد و تصاویر تارتر دیده می شوند (شبه عملکرد شیشه مات) [۲۱]. این بدان معناست که چوب شفاف قابلیت بالقوه زیادی برای استفاده به عنوان لایه پخش کننده نور در سلول های خورشیدی و سامانه های روشنایی در ساختمان ها دارد [۹]. در جدول ۱، خلاصه ای از پیشینه پژوهش های اخیر درباره ویژگی های نوری و خواص مکانیکی چوب شفاف، گونه های چوبی، عمل آوری شیمیایی و انواع پلیمرهای استفاده شده در چوب شفاف ارائه شده است.

جدول ۱- ویژگی‌های نوری و خواص مکانیکی انواع گونه‌های چوب شفاف در شرایط مختلف عمل‌آوری شیمیایی.

گونه چوبی	عمل‌آوری شیمیایی	ضخامت (mm)	پلیمر	عبور نور (%)	تیرگی (%)	مدول کشسانی (GPa)	استحکام کششی (MPa)	مراجع
بالسا	لیگنین زدایی شده رنگ‌بری شده	۱/۱ ۱/۲	رزین ملامین	۶۲ ۶۸	۹۲ ۹۰	- -	- -	۲۲
توس	رنگ‌بری شده	۱/۲	رزین ملامین	۷۴	۶۶	۱۱/۱	۶۰	۲۲
نوئل	لیگنین زدایی شده و فشرده شده	۲/۵	-	-	-	۴۰	۲۷۰	۱۸
بالسا	لیگنین زدایی شده	-	اپوکسی	-	-	۳/۵	۸۸/۵	۲۶
بالسا	لیگنین زدایی شده-یک لایه لیگنین زدایی شده-دو لایه موازی لیگنین زدایی شده-دو لایه عمود	۲	اپوکسی	۷۷ ۷۶ ۷۰	-	-	۶۹/۱۳ ۶۵/۵۳ ۵۴/۵۹	۲۷
نمدار	لیگنین زدایی شده-یک لایه لیگنین زدایی شده-دو لایه موازی لیگنین زدایی شده-دو لایه عمود	۲	اپوکسی	۶۴ ۵۹ ۵۵	-	-	۷۵/۱۲ ۷۰/۲۳ ۶۳/۰۵	۲۷
نمدار-کاج	لیگنین زدایی شده، اصلاح شده با استواسات و فشرده شده	۰/۲	-	۸۳	۸۰	۴۵	۴۲۲	۱۹
بالسا	لیگنین زدایی شده یک لایه پنج لایه با زوایای ۰-۹۰-۰-۹۰-۰ پنج لایه با زوایای ۰-۴۵-۹۰-۴۵-۰	۰/۶-۰/۸	پلی متیل متاکریلات	۹۰-۹۵ ۸۳ ۷۵	۵۰-۶۰	۱/۴۰ ۳/۹۰ ۴/۳۰	۶۸ ۸۲ ۴۳	۲۸
بالسا	لیگنین زدایی شده	۱/۲	پلی متیل متاکریلات	۸۵	۷۱	۲/۰۵	-	۲۳
فر	لیگنین زدایی شده	-	کیتوسان نانوالیاف سلولوز	حدود ۸۰ کمتر از ۸۰	۳۰-۴۰ ۵۰-۶۰	۱۰/۸۱ ۱۵/۳۳	۱۷۱/۸۵ ۲۵۸/۸۴	۲۵
بالسا	رنگ‌بری شده (ماتی کم) لیگنین زدایی شده (ماتی زیاد)	۱/۲	تیول-ان	۹۰ ۸۵	۳۶ ۶۳	۳/۴ ۳/۲	۵۹ ۵۳/۷	۲۴
بالسا	لیگنین زدایی شده و استیل دار شده لیگنین زدایی شده و استیل دار نشده	۱/۵	پلی متیل متاکریلات	۹۲ ۸۳	۵۰ ۷۰	۴	-	۱۰
بالسا	لیگنین زدایی شده و اصلاح شده با سوکسینیک اسید	۱/۲	لیمونن آکریلات	۹۰	۳۰	۱۷	-	۱۶

خواص مکانیکی

به دلیل ساختار متخلخل و لایه‌ای چوب لیگنین زدایی شده به همراه استحکام و سفتی آن، چوب شفاف ساخته شده با اپوکسی دارای خواص مکانیکی عالی بوده و باعث بهبود چقرمگی شکست اپوکسی می‌شود [۲۶]. چوب شفاف به دلیل حفظ ساختار چوب، عموماً دارای خواص مکانیکی بهتری در مقایسه با پلیمرهاست. از نظر خواص، این فراورده شباهت زیادی به کامپوزیت‌های چوب-پلیمر دارد [۲۷]. باید توجه داشت، ساختار ناهمگن چوب به خواص مکانیکی ناهمگن در کامپوزیت‌های نهایی منجر می‌شود. از آنجا که میکرولیفچه‌های سلولوزی غالباً در جهت طولی و هم‌راستا با سلول‌های

چوبی قرار دارند، در نتیجه این فراورده دارای استحکام کششی در جهت طولی است. به عنوان مثال، استحکام کششی کامپوزیت‌های چوب شفاف نمدار-اپوکسی در جهت طولی ($E=2/37$ GPa و $\sigma=45/38$ MPa) تقریباً دو برابر جهت عمود بر جهت الیاف است ($E=1/22$ GPa و $\sigma=23/38$ MPa) [۱۳]. برای کاهش ناهمگنی، چوب شفاف چندلایه با ترکیب روکش‌های چوبی شفاف در یک جهت یا به طور متناوب مانند تخته سه لایه تهیه شده است.

ساختار چندلایه، نه تنها خواص مکانیکی چوب شفاف را بهبود می‌بخشد، بلکه تهیه چوب شفاف در مقیاس بزرگ‌تر را نیز آسان می‌کند [۲۷، ۲۸]. تفاوت بین گونه‌های چوب یکی از عوامل مهم

اثرگذار بر خواص مکانیکی چوب شفاف است. به عنوان مثال، نمونه‌های چوب شفاف ساخته شده از گونه‌های بالسا، صنوبر و راش تفاوت‌های آشکاری را در استحکام کششی نشان داده‌اند [۲۹] که وجود سلولوز بیشتر در گونه‌های با چگالی زیادتر می‌تواند دلیل آن باشد [۲۳]. همچنین، نوع پلیمر و افزودنی آن نیز اثر درخور توجهی بر خواص محصول نهایی دارد. به عنوان مثال در چوب شفاف انعطاف‌پذیر تولید شده با PVA و پروپیلن گلیکول مشاهده شد، با افزایش مقدار پروپیلن گلیکول، مقاومت‌ها کاهش می‌یابد. یکی از مزیت‌های چوب شفاف نسبت به شیشه شکل‌پذیری، چقرمگی و استحکام ضربه‌ای بیشتر و عدم شکست آنی در برابر ضربه است [۹]. استحکام ضربه‌ای زیاد را می‌توان به ماهیت ذاتی پلیمرها، ساختار پیچیده چوب و تعامل چوب و پلیمر نسبت داد [۳۰].

ویژگی‌های گرمایی

مقاومت گرمایی، ویژگی گرمایی (فیزیکی) بوده که نشانگر مقاومت هر ماده در برابر انتقال گرما در اثر تفاوت دماست. بیش از ۴۰٪ از کل انرژی مصرفی در ساختمان‌های مسکونی و تجاری برای حفظ دمای داخلی استفاده می‌شود [۳۰]. شیشه دارای رسانندگی گرمایی زیادی ($1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) است که باعث افزایش خروج گرما می‌شود و بر بازده انرژی ساختمان اثر منفی می‌گذارد. این در حالی است، رسانندگی گرمایی چوب شفاف ($0.15-0.19 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) در مقایسه با شیشه کمتر است. جالب اینجاست، رسانندگی گرمایی چوب شفاف از رسانندگی گرمایی پلیمری که با آن اشباع شده نیز کمتر است [۳۰]. منظور از پایداری گرمایی بیشترین دمایی است که در آن، خواص مکانیکی محصول حفظ می‌شود. چوب و پلیمر هر دو جزء مواد اشتعال‌پذیرند، بنابراین پایداری گرمایی چوب شفاف برای کاربردهای آن اهمیت بسزایی دارد.

به طور کلی، پایداری گرمایی چوب شفاف بیش از چوب طبیعی است، زیرا پلیمرهای استفاده شده در چوب شفاف پایداری بیشتری نسبت به الیاف سلولوزی دارند [۳۰]. پلیمرها که دارای اثر عایق گرمایی خوبی هستند، سلول‌های چوبی را می‌پوشانند و تخریب چوب را کاهش می‌دهند. افزون بر این، انواع پلیمر نقش کلیدی در پایداری گرمایی چوب شفاف دارند. به عنوان مثال، پایداری گرمایی اتیلن گلیکول بیش از PMMA است. افزودن مواد معدنی نیز می‌تواند موجب افزایش پایداری گرمایی چوب شفاف شود [۳۱]. برای مثال، برخی از پرکننده‌ها مانند سزیم تنگستن برنز (CsxWO_3) می‌توانند مقاومت گرمایی چوب شفاف را به دلیل افزایش جذب انرژی گرمایی افزایش دهند [۸].

نتیجه‌گیری

خواص چوب شفاف عمدتاً تحت تأثیر گونه چوبی، پلیمر، نحوه و شدت لیگنین‌زدایی و کیفیت چسبندگی چوب و پلیمر است. چوب شفاف به دلیل خواص مکانیکی عالی، عبور نور زیاد و تجدیدپذیری، بسیار مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. این فراورده قابلیت بالقوه زیادی برای استفاده در ساختارهای شفاف، پنجره‌های هوشمند، قطعات الکترونیکی ساطع‌کننده نور و مواد ذخیره‌کننده انرژی دارد. ساختار ناهمگن، رسانندگی گرمایی کم و آسانی اصلاح چوب شفاف، آن را به عنوان جایگزین مناسبی برای شیشه مطرح کرده است. ساخت چوب شفاف چندلایه، تهیه آن را در اندازه‌های بزرگ آسان می‌کند. با این حال برای تجاری شدن این فراورده، مطالعات زیادی باید در زمینه تعامل نور و چوب، تعادل خواص نوری و مکانیکی، افزایش سختی و غیره انجام شود.

مراجع

- Parsapajhough D., *Wood Technology (Persian)*, Tehran University, Tehran, 11th ed., 36-72, 2015.
- Mirshokraei S.A., *Wood Chemistry Fundamentals and Applications (Persian)*, Aeizh, Tehran, 3th ed., 37-66, 2010.
- Ding L., Han X., Chen L., and Jiang S., Preparation, and Properties of Hydrophobic and Transparent Wood, *J. Bioresource. Bioproduct.*, 7, 295-305, 2022.
- Fink S., Transparent Wood—A New Approach in the Functional Study of Wood Structure, *Holzforschung*, 46, 2009.
- Wang L., Liu Y., Zhan X., Luo D., and Sun X., Photochromic Transparent Wood for Photo-Switchable Smart Window Applications, *J. Mater. Chem. C*, 7, 8649-8654, 2019.
- Wilson K. and White D.J., *The Anatomy of Wood: Its Diversity and Variability*, Stobart and Son, London, 86-93, 1986.
- Zhang J., Koubaa A., Tao Y., Li P., and Xing D., The Emerging Development of Transparent Wood: Materials, Characteristics, and Applications, *Curr. Forest. Rep.*, 8, 333-345, 2022.
- Chen C. and Hu L., Nanoscale Ion Regulation in Wood-Based

- Structures and their Device Applications, *Adv. Mater.*, **33**, 2002890, 2021.
9. Li Y., Vasileva E., Sychugov I., Popov S., and Berglund L., Optically Transparent Wood: Recent Progress, Opportunities, and Challenges, *Adv. Opt. Mater.*, **6**, 1800059, 2018.
10. Li Y., Yang X., Fu Q., Rojas R., Yan M., and Berglund L., Towards Centimeter Thick Transparent Wood Through Interface Manipulation, *J. Mater. Chem. A*, **6**, 1094-1101, 2018.
11. Zhu S., Biswas S.K., Qiu Z., Yue Y., Fu Q., Jiang F. et al., Transparent Wood-Based Functional Materials via a Top-Down Approach, *Prog. Mater. Sci.*, **132**, 101025, 2023.
12. Wang J., Liu J., Li J., and Zhu J.Y., Characterization of Microstructure, Chemical, and Physical Properties of Delignified and Densified Poplar Wood, *Materials*, **14**, 5709, 2021.
13. Okahisa Y., Yoshida A., Miyaguchi S., and Yano H., Optically Transparent Wood-Cellulose Nanocomposite as a Base Substrate for Flexible Organic Light-Emitting Diode Displays, *Compos. Sci. Tech.*, **69**, 1958-1961, 2009.
14. Bisht P., Pandey K.K., and Barshilia H.C., Photostable Transparent Wood Composite Functionalized With an UV-Absorber, *Polym. Degrad. Stabil.*, **189**, 109600, 2021.
15. Liu L., Zhu G., Chen Y., Liu Z., Donaldson L., Zhan X. et al., Switchable Photochromic Transparent Wood as Smart Packaging Materials, *Indust. Crop. Prod.*, **184**, 115050, 2022.
16. Zhu M., Song J., Li T., Gong A., Wang Y., Dai J. et al., Highly Anisotropic, Highly Transparent Wood Composites, *Adv. Mater.*, **28**, 5181-5187, 2016.
17. Montanari C., Ogawa Y., Olsén P., and Berglund L.A., High Performance, Fully Bio-Based, and Optically Transparent Wood Biocomposites, *Adv. Sci.*, **8**, 2100559, 2021.
18. Frey M., Widner D., Segmehl J.S., Casdorff K., Keplinger T., and Burgert I., Delignified and Densified Cellulose Bulk Materials with Excellent Tensile Properties for Sustainable Engineering, *ACS Appl. Mater. Interface.*, **10**, 5030-5037, 2018.
19. Wang M., Liu H., Feng X., Wang X., Shen K., Qi H. et al., State-of-the-Art Luminescent Materials Based on Wood Veneer with Superior Strength, Transparency, and Water Resistance, *Chem. Eng. J.*, **454**, 140225, 2023.
20. Li K., Wang S., Chen H., Yang X., Berglund L.A., and Zhou Q., Self-densification of Highly Mesoporous Wood Structure into a Strong and Transparent Film, *Adv. Mater.*, **32**, 2003653, 2020.
21. Wu J., Wu Y., Yang F., Tang C., Huang Q., and Zhang J., Impact of Delignification on Morphological, Optical and Mechanical Properties of Transparent Wood, *Compos. Part A: Appl. Sci. Manufact.*, **117**, 324-331, 2019.
22. Samanta P., Samanta A., Montanari C., Li Y., Maddalena L., Carosio F. et al., Fire-Retardant and Transparent Wood Biocomposite Based on Commercial Thermoset, *Compos. Part A: Appl. Sci. Manufact.*, **156**, 106863, 2022.
23. Li Y., Fu Q., Yu S., Yan M., and Berglund L., Optically Transparent Wood from a Nanoporous Cellulosic Template: Combining Functional and Structural Performance, *Biomacromolecules*, **17**, 1358-1364, 2016.
24. Höglund M., Johansson M., Sychugov I., and Berglund L.A., Transparent Wood Biocomposites by Fast UV-Curing for Reduced Light-Scattering Through Wood/Thiol-Ene Interface Design, *ACS Appl. Mater. Interface.*, **12**, 46914-46922, 2020.
25. Muthoka R.M., Panicker P.S., Agumba D.O., Pham H.D., and Kim J., All-Biobased Transparent-Wood: A New Approach and Its Environmental-Friendly Packaging Application, *Carbohydr. Polym.*, **264**, 118012, 2021.
26. Chen Q., Jiang Z., Pei X., Liu Y., Du R., and Zhao G., Bio-Inspired, Epoxy-Based Lamellar Composites with Superior Fracture Toughness by Delignified Wood Scaffold, *Compos. Sci. Tech.*, **207**, 108739, 2021.
27. Qin J., Li X., Shao Y., Shi K., Zhao X., Feng T. et al., Optimization of Delignification Process for Efficient Preparation of Transparent Wood with High Strength, and High Transmittance, *Vacuum*, **158**, 158-165, 2018.
28. Fu Q., Yan M., Jungstedt E., Yang X., Li Y., and Berglund L.A., Transparent Plywood as a Load-Bearing and Luminescent Biocomposite, *Compos. Sci. Tech.*, **164**, 296-303, 2018.
29. Gan W., Gao L., Xiao S., Zhang W., Zhan X., and Li J., Transparent Magnetic Wood Composites Based on Immobilizing Fe₃O₄ Nanoparticles into a Delignified Wood Template, *J. Mater. Sci.*, **52**, 3321-3329, 2017.
30. Li T., Zhu M., Yang Z., Song J., Dai J., Yao Y. et al., Wood Composite as an Energy Efficient Building Material: Guided Sunlight Transmittance and Effective Thermal Insulation, *Adv. Energy Mater.*, **6**, 1601122, 2016.
31. Li M., Pang Y., Li N., Shan J., and Liu Y., Interfacial Compatibilization of Silane Coupling Agent Modified Epoxy Resin for Transparent Basswood, *China Wood-Based Panels*, **8**, 22-5, 2018.