



Investigation of the effect of wood species on the optical properties of transparent wood composites with polyvinyl alcohol and epoxy polymers

Hamideh Abdolzadeh^{1*}, Alireza Kangarlou², Seyed Mahmoud Mir Tari³

1- Corresponding author, Assistant Professor, Shahid Rajaee Teacher Training University, Civil Engineering Faculty, Wood science & Technology Department, Tehran, Iran Email: h_abdolzadeh@sru.ac.ir

2- Msc student, Shahid Rajaee Teacher Training University, Civil Engineering Faculty, Wood science & Technology Department, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, Shahid Rajaee Teacher Training University, Civil Engineering Faculty, Wood science & Technology Department, Tehran, Iran

Received: August 2025

Accepted: October 2025

Abstract

Problem definition and objectives: Wood has long been used as a construction material. In recent years, various wood-based products, with an emphasis on their aesthetic properties, have attracted significant attention from researchers. Transparent wood composite, commonly referred to as transparent wood in the industry, is one such product. Transparent wood is an emerging optical material that combines properties such as haze and high light transmission with construction applications. Transparent wood composites are produced by delignification of wood or deactivating the chromophores in lignin and infiltrating it with a polymer that has a refractive index equal to or similar to that of cellulose. This product integrates mechanical performance with optical capabilities, making it a promising candidate for applications such as smart buildings, optical devices, and photonics. This study investigates the preparation methods and optical performance of transparent wood and discusses its potential applications.

Methodology: In this study, two wood species, beech and maple, were used to produce transparent wood composites after delignification. Delignification of wood veneers was carried out using sodium chlorite (NaClO_2) at a pH of 4.6. The delignified samples were impregnated with epoxy resin (E) and polyvinyl alcohol (PVA) under vacuum conditions. Polymerization of PVA resin was conducted at 40°C in an oven, while epoxy resin was polymerized at ambient temperature. The transparent wood composites were tested for optical properties according to the ASTM 1003-21 standard. Wood veneers, delignified veneers, and transparent polymers made from pure epoxy and PVA resins were used as control samples for comparison. In this study, light transmission values were examined as the determining factor for the transparency and haze of transparent wood composites. Three replicates were measured for each sample, and the average values were compared.

Results: Optical tests conducted on control samples showed that wood veneers did not transmit light and lacked haze. The delignified samples of both species, despite noticeable color changes, also lacked optical transparency. Consequently, no reportable values were obtained due to the lack of complete transparency in these samples. The results indicated that, unlike solid wood and its delignified veneers, the produced transparent wood composite exhibited suitable optical

transparency and transmitted light. Optical tests revealed that transparent wood composites not only transmitted light but also had higher haze compared to transparent polymers. The light transmission in transparent wood made from beech species with epoxy resin and polyvinyl alcohol decreased by 43.17% and 7.85%, respectively. The haze of transparent wood from the beech species was more suitable and increased by up to 671%. The light transmission values showed no significant difference between the two species. Samples made with epoxy resin exhibited higher transparency compared to PVA resin. Images from scanning electron microscopy confirmed the filling of cavities and changes in cell walls after delignification.

Conclusion: The results demonstrated the feasibility of producing transparent wood composites. The beech species exhibited better light transmission and haze. Transparent wood composites possess suitable opacity characteristics, making them ideal for use in partition spaces or windows, enabling the utilization of sunlight while providing conditions for maintaining privacy. The results from both species were satisfactory, with the composite made from epoxy resin exhibiting superior properties.

Keywords: Transparent wood, optical properties, delignification, Haze and transmission.

بررسی اثر نوع گونه چوبی بر خواص نوری کامپوزیت چوبی شفاف با ماتریس پلیمری

پلی‌وینیل الکل و اپوکسی

حمیده عبدالزاده^{۱*}، علیرضا کنگرلو^۲، سید محمود میری تازی^۳

۱- نویسنده مسئول، استادیار گروه صنایع چوب، دانشکده عمران، دانشگاه تربیت‌دبیر شهیدرجایی، تهران، ایران. رایانامه: h_abdolzadeh@srui.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه صنایع چوب، دانشکده عمران، دانشگاه تربیت‌دبیر شهیدرجایی، تهران، ایران

۳- استادیار گروه صنایع چوب، دانشکده عمران، دانشگاه تربیت‌دبیر شهیدرجایی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: مهر ۱۴۰۴

تاریخ دریافت: مرداد ۱۴۰۴

چکیده

بیان مساله و اهداف: چوب از دیرباز به عنوان مصالح ساختمانی به کار می‌رود. در سال‌های اخیر، محصولات چوبی مختلف با تأکید بر خواص زیبایی‌شناختی آن، توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. کامپوزیت چوبی شفاف که در صنعت با عنوان چوب شفاف شناخته می‌شود یکی از این محصولات است. چوب شفاف ماده نوری نوظهوری است که خواصی مانند کدری و عبور نور بالا را با کاربردهای ساختمانی ترکیب می‌کند. کامپوزیت‌های چوبی شفاف، با لیگنین‌زدایی یا غیرفعال‌سازی رنگسازهای لیگنین چوب و نفوذ دادن پلیمری با ضریب شکست برابر یا مشابه سلولز درون چوب تولید می‌شوند. این محصول، عملکرد مکانیکی را با قابلیت‌های نوری ترکیب می‌کند و کاندیدای جدید برای مصارفی نظیر ساختمان‌های هوشمند، ابزارهای نوری و فوتونیک است. این تحقیق، روش‌های آماده‌سازی چوب شفاف و عملکرد نوری را بررسی می‌کند و کاربردهای بالقوه آن را مورد بحث قرار می‌دهد.

مواد و روشها: در تحقیق حاضر دو گونه راش و افرا پس از لیگنین‌زدایی برای ساخت کامپوزیت چوبی شفاف استفاده شدند. لیگنین‌زدایی روکش‌های چوبی با کمک کلریت سدیم (NaClO_2) در pH ۴/۶ انجام شد. نمونه‌های لیگنین‌زدایی شده تحت شرایط خلا با رزین‌های اپوکسی (E) و پلی‌وینیل الکل (PVA) اشباع شدند. پلیمریزاسیون رزین PVA در دمای 40°C درون آون و رزین اپوکسی در دمای محیط انجام شد. کامپوزیت چوبی شفاف برای بررسی خواص نوری بر اساس استاندارد ASTM ۱۰۰۳-۲۱ مورد بررسی و آزمون قرار گرفتند. روکش‌های چوبی، روکش‌های لیگنین‌زدایی شده و پلیمرهای شفاف از رزین‌های اپوکسی و پلی‌وینیل الکل برای مقایسه به عنوان نمونه‌های شاهد در نظر گرفته شدند. در این تحقیق مقادیر عبور نور به عنوان فاکتور تعیین‌کننده شفافیت و کدری کامپوزیت‌های چوبی شفاف مورد بررسی قرار گرفتند. سه تکرار برای هر نمونه اندازه‌گیری شده و میانگین مقادیر به دست آمده با هم مقایسه شدند.

نتایج: آزمون‌های نوری انجام شده بر روی نمونه‌های شاهد نشان داد روکش‌های چوبی نور را از خود عبور نداده و فاقد خاصیت کدری نوری هستند. آزمون‌های لیگنین‌زدایی شده‌ی هر دو گونه نیز با وجود تغییر رنگ بارز فاقد ویژگی‌های شفافیت نوری بودند. از این رو به دلیل عدم شفافیت کامل از آزمون‌های مذکور هیچ مقدار قابل گزارشی به دست نیامد. نتایج نشان داد بر خلاف چوب ماسیو و روکش‌های لیگنین‌زدایی شده‌ی آن، کامپوزیت شفاف تولید شده دارای شفافیت نوری مناسب بوده و نور را از خود عبور می‌دهند. آزمون‌های نوری نشان داد کامپوزیت چوبی شفاف علاوه بر عبور نور دارای کدری بالاتری نسبت به پلیمرهای شفاف بودند. عبور نور در چوب شفاف حاصل از گونه راش با رزین اپوکسی و پلی‌وینیل الکل به ترتیب ۱۷/۴۳٪ و ۷/۸۵٪ کاهش یافت. کدری چوب شفاف حاصل از گونه چوبی راش مناسب‌تر بود و تا ۶۷۱٪ افزایش یافت. مقادیر عبور نور در دو گونه تفاوت چشمگیری نداشت. آزمون‌های ساخته شده با رزین اپوکسی

شفافیت بیشتری نسبت به رزین PVA داشتند. تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی پر شدن حفرات و تغییرات دیواره سلولی را پس از لیگنین زدایی تایید کرد.

نتیجه گیری: نتایج نشان داد امکان تولید کامپوزیت چوبی شفاف فراهم است. کدوری بالاتر این فرآورده امکان استفاده از آن در فضاهای قابل تفکیک یا در پنجره‌ها، ضمن فراهم ساختن امکان استفاده از نور خورشید شرایط مناسب برای حفظ حریم خصوصی را هم ایجاد می‌کند. نتایج به دست آمده از هر دو گونه مناسب است و کامپوزیت ساخته شده از رزین اپوکسی ویژگی‌های بهتری نشان داد.

واژه های کلیدی: چوب شفاف، ویژگی‌های نوری، لیگنین زدایی، کدوری و عبور نور

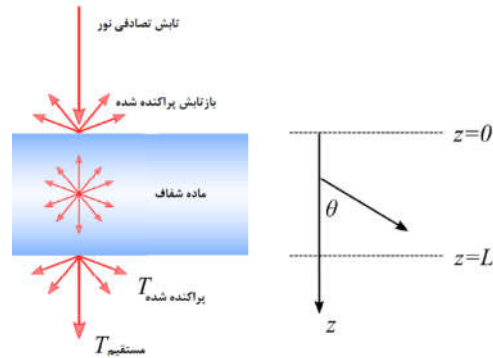
مقدمه

قسمت زیادی از مصرف انرژی در جهان مربوط به بخش ساختمان است. با وجود افزایش مصرف انرژی یکی از چالش‌های اصلی جوامع پیشرفته، کنترل مصرف و جلوگیری از هدر رفت آن است. بنابراین بخش مهمی از توسعه اقتصادی به کاهش مصرف در ساختمان‌ها وابسته است. یکی از راهکارهای کاهش مصرف انرژی استفاده از منبع انرژی خورشیدی است که به دلیل رایگان، پایان‌ناپذیر و پاک بودن از جذابیت ویژه‌ای برخوردار است. در حال حاضر شیشه‌های دوجداره جایگاه ویژه‌ای در این راستا ایفا می‌کنند و برای ارتقای امنیت یا کاهش صدای‌های مزاحم فضای بیرونی ساختمان نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. در ساختمان‌های عایق انرژی تلاش می‌شود به‌طور کامل از نور طبیعی برای اهداف روشنایی و گرمایشی استفاده شود، که ضمن کاهش مصرف انرژی، آلودگی را نیز کاهش دهد [۱ و ۲]. شیشه‌های متداول صرف نظر از انتقال، در توانایی مدیریت کردن نور عملکرد ضعیفی دارند که نتیجه آن پراکنش غیریکنواخت نور و تابش خیره‌کننده آن می‌باشد که آزاردهنده است. همچنین خطر شکستن و نگرانی‌های ایمنی نیز باید مدنظر قرار داده شود.

چوب از جمله مصالح ساختمانی است که با توجه به مصارف دکوراتیو و به دلیل زیبایی، بیشتر در فضاهای داخلی ساختمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین به ویژگی‌های منحصر به فرد آن در راستای حفظ منابع انرژی نظیر عایق حرارتی و صوتی کمتر توجه شده است. در بحث انرژی مصالحی که هم عایق باشند و هم نور را از

خود عبور دهند بسیار با ارزش هستند. چوب با وجود زیبایی منحصر به فرد، جاذب نور است و نور را از خود عبور نمی‌دهد. ساختار متخلخل چوب ماسیو باعث پراکندگی قابل توجه نور مرئی می‌شود در نتیجه شفافیت نوری چوب تقریباً برابر صفر است. مواد پیشرفته‌ای که کامپوزیت چوبی شفاف نامیده می‌شود از چوب ماسیو به‌دست می‌آید، تا حد زیادی این مشکل را حل کرده است و خصوصیات مکانیکی و نوری عالی خود را حفظ می‌کند [۳-۶]. با لیگنین زدایی یا غیرفعال‌سازی رنگسازهای لیگنین چوب و نفوذ دادن پلیمری درون چوب که دارای ضریب شکستی برابر یا مشابه سلولز ($n \approx 1.5$) باشد، کامپوزیت‌های چوبی شفاف را می‌توان ساخت [۵-۷]. کامپوزیت چوبی شفاف می‌تواند جایگزین فوق العاده‌ای برای شیشه باشد [۶]. محققان اخیراً تحقیقاتی در رابطه با توسعه چوب شفاف با قابلیت تنظیم انتقال نور برای کاربرد در پنجره‌های هوشمند پرداخته‌اند. با استفاده از نانوذرات به محرک‌های خارجی (مانند دما و نور) پاسخ داده می‌شود و محققان به ماده‌ای دست یافته‌اند که می‌تواند به طور پویا شفافیت خود را تغییر دهد و در نتیجه به صرفه‌جویی انرژی در ساختمان‌ها کمک کند [۸ و ۹].

فرآیند پراکندگی نور در ماده شفاف در شکل ۱ نشان داده شده است. نور تابیده شده، با اجزای ماده شفاف برهمکنش می‌کند و به دلیل پراکندگی چندگانه، جهت انتشار خود را تغییر می‌دهد. این پراکندگی منجر به انتقال یا بازتاب پراکنده نور می‌شود. از سوی دیگر، قسمتی از نور بدون برهمکنش با ماده به‌طور مستقیم انتقال می‌یابد [۱۰].



شکل ۱: انتقال و پراکندگی نور در ماده شفاف. همانطور که در سمت راست نشان داده شده است در صفحه موازی، شدت نور در داخل لایه به فاصله از z و زاویه قطبی θ بستگی دارد [۸].

کاربردی آن نیز قابل رقابت باشد. نزدیک به یک دهه است که کشورهای مختلف توجه ویژه‌ای به این محصول داشته اند و جزو حوزه‌های تحقیقاتی خاص محسوب می‌شود. با توجه به اینکه در کشور ما تاکنون تحقیقاتی انجام نشده است و انجام هرگونه تحقیقات مرتبط با چوب شفاف نیازمند بررسی و احراز مقادیر شفافیت و کدری فرآورده حاصل است، در این تحقیق به عنوان پیشگام معرفی چوب شفاف در ایران و به منظور بررسی چالش‌های ساخت آن، ویژگی‌های نوری محصول با مواد اولیه متفاوت با هم مقایسه شده است. هدف از این تحقیق بررسی امکان تولید چوب شفاف از گونه‌های بومی ایران با دو ماتریس‌های پلیمری مختلف است.

مواد و روشها

برای ساخت کامپوزیت‌های چوب شفاف روکش‌هایی به ضخامت‌های ۱ mm و ۱/۲ mm از گونه‌های چوبی راش و افرا تهیه شد. لیگنین‌زدایی آزمونه‌ها با کمک کلریت سدیم با غلظت ۴٪ در بافر با pH ۴/۶ در دمای 80°C تا سفید شدن آزمونه‌ها طی ۶ ساعت انجام شد (شکل ۲ الف). پس از اتمام فرایند لیگنین‌زدایی آزمونه‌ها با آب مقطر داغ با دمای 90°C سه مرتبه شستشو داده شده و به مدت ۲۴ ساعت در درون آب مقطر نگهداری شد. پس از ۲۴ ساعت فرایند جایگزینی حلال طی مراحل بعدی و به ترتیب با کمک ترکیب آب مقطر-الکل اتانول (با نسبت ۵۰٪-۵۰٪)، اتانول (۱۰۰٪)، اتانول-استون (با نسبت ۵۰٪-۵۰٪) و استون خالص (۱۰۰٪) به منظور جایگزینی استون با آب انجام شد. پس از لیگنین‌زدایی

از نظر چن و همکاران دلیل اصلی کدری در کامپوزیت چوبی شفاف عدم تطابق ضریب شکست بین دیواره سلولی و پلیمر است. ایشان توزیع پلیمر در مقیاس نانو را در دیواره سلولی تایید کردند [۱۱ و ۱۲]. بر خلاف محیط جاذب غیرپراکنده کننده، وابسته بودن عبور نور به ضخامت در کامپوزیت چوبی شفاف پیچیده است، زیرا اتلاف نور به افزایش طول مسیر فوتون از پراکنده کننده وابسته است. چن و همکارانش دریافتند که استفاده از معادله انتشار فوتون نشان می‌دهد که ضریب انتشار علاوه بر ضریب جذب عامل کلیدی در عبور نور کلی است [۱۳]. وو و همکاران (۲۰۱۹) ویژگی‌هایی شامل رنگ سطح، عبور نور و کدری چوب ماسیو و کامپوزیت چوبی شفاف حاصل را برای درک بهتر تاثیر درجات لیگنین‌زدایی مورد بررسی قرار دادند [۱۴]. فاستر و همکاران (۲۰۲۱) از دو پیش تیمار لیگنین‌زدایی شامل اکسیداسیون و اصلاح لیگنین و سه اصلاح سطحی برای ساخت کامپوزیت‌های چوبی شفاف استفاده کردند. درک اثرات اصلاح شیمیایی بر ویژگی‌های اساسی آنها باعث می‌شود که کامپوزیت‌هایی با طول عمر بالاتر برای کاربردهای مناسب مختلف طراحی شوند [۱۵]. با توجه به لزوم ذخیره انرژی و جلوگیری از اتلاف از طریق پنجره‌ها، ساخت و بررسی ویژگی‌های نوری کامپوزیت چوبی شفاف ضروری است. ایده تولید کامپوزیت چوبی شفاف با هوشمندسازی مصرف انرژی فضاهای مسکونی و تجاری برای حفظ منابع انرژی و استفاده از نور طبیعی و تعمیم مزیت‌های شیشه به این محصول شکل گرفته است تا با تهیه و تولید مصالح ساختمانی در کنار خواص نوری مناسب، ویژگی‌های

هاردنر با نسبت ۱:۲ پس از مخلوط و هم زدن کامل ساخته شدند. اپوکسی‌ها برای پخت به هاردنر نیاز دارند. هاردنر معمولاً یک آمین است که به همراه اپوکسی در یک واکنش افزایشی شرکت کرده و شبکه‌ای شدن اتفاق می‌افتد. از آنجا که مولکول‌های آمین با دو مولکول اپوکسی وارد واکنش می‌شوند، رعایت نسبت اختلاط صحیح بین رزین و هاردنر ضروری است. رزین اپوکسی مانند رزین PVA تحت شرایط خلا به آزمونه‌های لیگنین‌زدایی شده تزریق شد. سپس به مدت ۷۲ ساعت در دمای اتاق قرار گرفت تا کاملاً خشک شود.

آزمونه‌ها، با تزریق رزین‌های اپوکسی (E) و پلی‌وینیل‌الکل (PVA)، کامپوزیت‌های چوبی شفاف ساخته شد. رزین PVA با حل کردن پودر پلی‌وینیل‌الکل شرکت مرک در آب مقطر با غلظت ۸٪ در دمای بین ۸۰ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد با هم‌زدن مداوم تهیه شد. این رزین محلول در آب به مقدار ۱۵ برابر ضخامت آزمونه‌ها درون ظروف ریخته شده و آزمونه‌های لیگنین‌زدایی شده درون ظرف غوطه‌ور شد و رزین در شرایط خلا تزریق شد. آزمونه‌های غوطه‌ور در رزین به مدت ۷۲ ساعت درون آون با دمای ۴۰ تا ۴۵ درجه سانتی‌گراد تا تکمیل فرایند پلیمریزاسیون و خشک شدن کامل قرار گرفت. کامپوزیت‌های حاوی رزین اپوکسی با تزریق رزین دو جزئی شامل رزین و



(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۲. مراحل آماده سازی آزمونه‌های چوب شفاف شامل لیگنین‌زدایی روکش‌های چوبی (الف)، فرایند تزریق و حباب‌گیری رزین اپوکسی در شرایط خلا (ب) و رزین PVA

علایم اختصاری آنها در جدول ۱ آورده شده است. شکل ۲ آزمونه‌ها پس از فرایند لیگنین‌زدایی (الف)، فرایند حباب‌گیری پس از تزریق رزین (ب و ج) و فرایند پلیمریزاسیون آزمونه‌ها را نشان می‌دهد.

خواص نوری، آزمونه‌های ساخته شده بر اساس استاندارد ASTM D ۱۰۰۳-۲۱ تعیین شد [۱۶]. در این تحقیق از آزمونه چوب با ابعاد مشابه، آزمونه‌های لیگنین‌زدایی شده و پلیمر شفاف خالص برای مقایسه بهتر نتایج به عنوان آزمونه شاهد استفاده شد. تیمارهای و

جدول ۱- علایم اختصاری تیمارها

علایم اختصاری	چوب شفاف	علایم اختصاری	آزمونه‌های شاهد
BETW	چوب راش با رزین اپوکسی	BOW	روکش چوب راش
METW	چوب افرا با رزین اپوکسی	MOW	روکش چوب افرا
BPTW	چوب راش با رزین PVA	DLB	چوب راش لیگنین‌زدایی شده
MPTW	چوب افرا با رزین PVA	DLM	چوب افرا لیگنین‌زدایی شده
		E	ماتریس پلیمری از رزین اپوکسی
		P	ماتریس پلیمری از رزین PVA

الکتریکی پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران انجام شد. مقدار کدری بر اساس معادله زیر محاسبه شد.

تعیین میزان عبور نور و کدری آزمونه‌ها توسط دستگاه کدورت‌سنج^۱ آزمایشگاه خواص فیزیکی و

^۱ Hazemeter

عدم ثبت مقدار برای روکش‌های چوبی و روکش‌های لیگنین‌زدایی شده نشان دهنده عدم شفافیت آنهاست. ستون اول و دوم شکل ۳ (DL و OW) عدم شفافیت آزمونه‌های چوبی را قبل و پس از لیگنین‌زدایی نشان می‌دهد. بررسی علل عدم شفافیت چوب نشان داد به دلیل پراکندگی نور در سطوح مشترک بین دیواره سلولی و هوا در حفره و فضای بین سلولی الیاف چوبی، مسیر انتقال نور تغییر می‌کند. علاوه بر این، نور تابیده شده به دلیل ماهیت پلیمرهای زیستی سازنده چوب در دیواره سلولی، توسط چوب جذب می‌شود [۱۹]. شکل ۳، تصاویر آزمونه‌های شفاف (TW) و وضوح حروف نوشته شده روی کاغذ را نشان می‌دهد. درصد عبور نور ثبت شده مربوط به آزمونه‌های شفاف پلیمر خالص و آزمونه‌های چوب شفاف در شکل ۴ آورده شده است. ثبت مقادیر مختلف عبور نور، تاییدی بر انجام موفقیت‌آمیز فرایند شفاف‌سازی آزمونه‌ها است. نتایج نشان داد آزمونه‌های چوب راش درصد بیشتری از نور را از خود عبور دادند و از نظر خواص نوری مشابهت بیشتری با آزمونه‌های شاهد مربوط به پلیمرهای خالص با عبور نور بیش از ۹۰٪ داشتند.

نتایج حاصل از تصویر برداری میکروسکوپ الکترونی پر شدن حفرات را طی فرایند ساخت چوب شفاف نشان می‌دهد (شکل ۶ و ۷). آزمونه‌ها پس از لیگنین‌زدایی نیز فاقد توانایی عبور نور بودند. لیگنین به دلیل ساختار فنولی، رنگ قهوه‌ای دارد [۲۰] پس از لیگنین‌زدایی و کاهش شدید لیگنین در ساختار چوب، با وجود حفظ انسجام روکش‌های چوبی، رنگ آزمونه‌های به دلیل حضور سلولز، سفید می‌شود. شکل ۳ عدم شفافیت آزمونه‌های شاهد را در حالت بصری نشان می‌دهد. جهت‌گیری سلولز در BOW و MOW پس از لیگنین‌زدایی در DLB و DLM نیز حفظ می‌شود که نتایج به دست آمده از میکروسکوپ الکترونی آن‌را تایید می‌کند (شکل ۶-ب و ۷-ب). به دلیل افزایش حجم منافذ ناشی از حذف لیگنین، کنتراست چگالی الکترونی بیشتر شده و عبور نور در DLW افزایش می‌یابد. این مشاهده با مطالعات قبلی لیگنین‌زدایی چوب مطابقت دارد [۲۱ و ۲۲]. چوب لیگنین‌زدایی شده (DLW) به دلیل پراکندگی نور در سطح مشترک بین دیواره سلولی و هوای موجود در حفره سلولی و بین نانوفیبرهای سلولزی و هوای موجود در دیواره سلولی، هنوز شفاف نیست [۲۲].

$$\text{کری} = \left(\frac{T_1}{T_2} - \frac{T_3}{T_4} \right) \times 100 [\%]$$

T_۱ پرتو نور ورودی، T_۲ پرتو نور عبوری، T_۳ پرتو نور پراکنده شده سیستم و T_۴ پرتو نور پراکنده شده سیستم در درون نمونه را نشان می‌دهد. مقدار عبور بر اساس معادله زیر محاسبه می‌شود.

$$\text{عبور} = \frac{T_2}{T_1} \times 100 [\%]$$

که T_۱ نور تصادفی و T_۲ نوری است که توسط نمونه منتقل می‌شود.

از آنجا که مقادیر لیگنین باقی‌مانده بر روی خواص نوری و مقاومت کامپوزیت موثر است، تعیین مقادیر لیگنین باقی‌مانده در روکش‌های لیگنین‌زدایی شده ضروری است. به دلیل مقادیر اندک لیگنین باقی مانده امکان تعیین آن از طریق استاندارد TAPPI T 222 om-02 (لیگنین کلان) فراهم نبود [۱۷]، بنابراین از طریق تعیین عدد کاپا بر اساس استاندارد TAPPI T 236 om-13 محاسبه شد [۱۸]. مقدار لیگنین باقی‌مانده در آزمونه‌های DLB و DLM به ترتیب ۱/۷۸٪ و ۳/۱۳٪ به دست آمد.

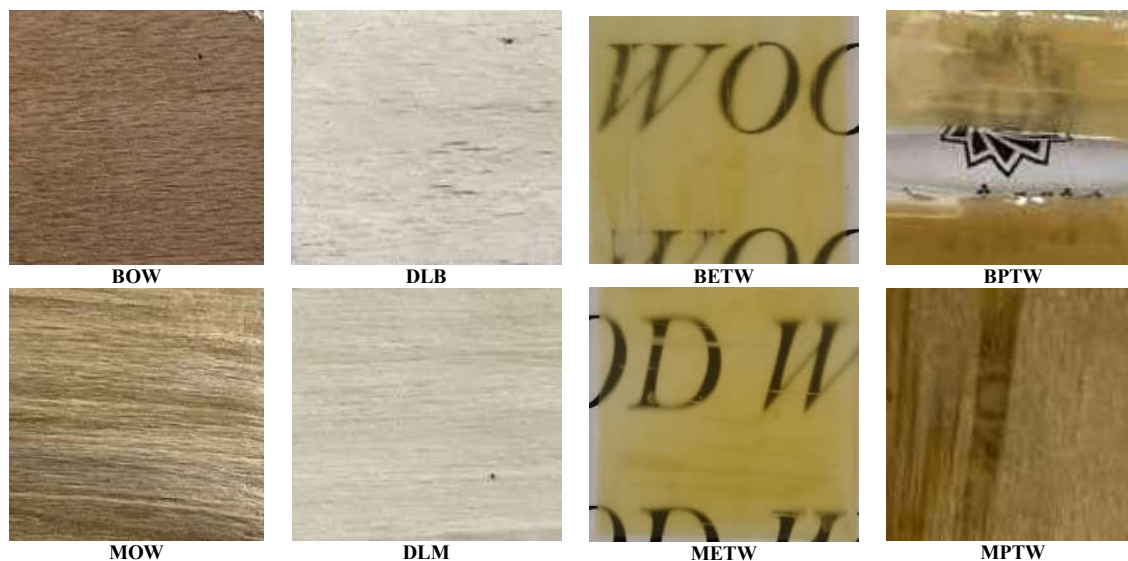
همانطور که در جدول ۱ مشخص شده است آزمونه‌های شاهد شامل روکش‌های چوبی از چوب‌های راش و افرا، روکش‌های لیگنین‌زدایی شده از هر دو گونه و پلیمرهای شفاف از رزین‌های اپوکسی و PVA بود. مقادیر میانگین تغییرات عبور نور و کدری با هم مقایسه شدند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) توسط دستگاه SEM VEGA3 شرکت مهماکس تهیه شد. تصویربرداری از مقاطع عرضی و شعاعی آزمونه‌های مختلف انجام شد.

نتایج و بحث

خواص نوری کامپوزیت‌های شفاف

بررسی عبور نور در آزمونه‌های شاهد شامل روکش‌های چوبی، روکش‌های لیگنین‌زدایی شده و پلیمرهای خالص از رزین‌های اپوکسی و PVA انجام شد.

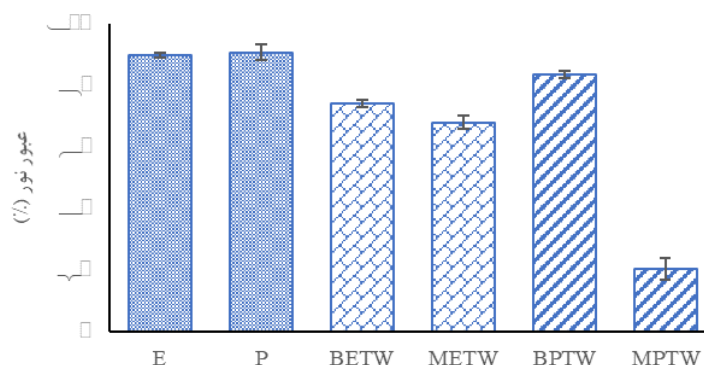
² Scanning Electron Microscope



شکل ۳- تصویر نوری چوب قبل از لیگنین زدایی (ستون ۱)، پس از لیگنین زدایی (ستون ۲)، آزمونهای شفاف با رزین اپوکسی (ستون ۳) و آزمونهای شفاف با رزین PVA (ستون ۴)

حدود $1/48$ [۲۴] در دیواره سلولی پلیمریزه شد تا سطح مشترک نوری را تنظیم کرده و پراکندگی نور را کاهش دهد. با کاهش پراکندگی نور انتقال نور تقریباً کامل شده و شفافیت نوری حاصل شد. تصاویر به دست آمده از میکروسکوپ الکترونی پر شدن حفرات را در چوب های شفاف حاصل در دو مقطع عرضی و شعاعی نشان می دهد (شکل ۶-ج و ۷-ج، د).

تصاویر به دست آمده از SEM فضاهای خالی ساختار چوب لیگنین زدایی شده را تایید می کند. هرچه اختلاف ضریب شکست بین دو محیط بیشتر باشد، زاویه پراکنده شدن نور بزرگتر خواهد بود. پس از لیگنین زدایی، ضریب شکست اجزای دیواره سلولی تقریباً یکسان و حدود $1/53$ خواهد بود. برای تنظیم بیشتر ضریب شکست چوب و حذف تخلخل در مقیاس نانو، رزین های اپوکسی با ضریب شکست حدود $1/50$ [۲۳] و PVA با ضریب شکست



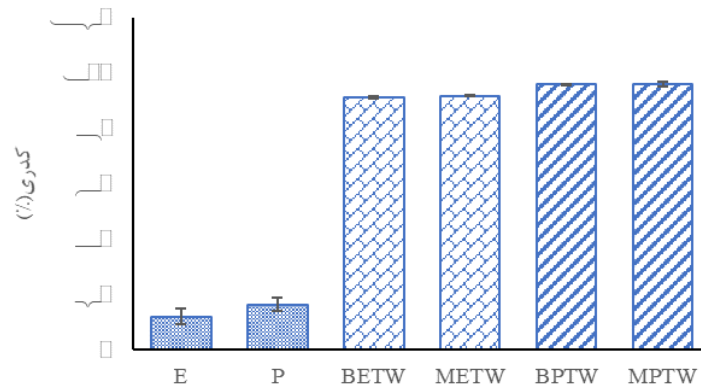
شکل ۴- عبور نور از کامپوزیت چوب شفاف (B: چوب راش، M: چوب افرا، E: ماتریس پلیمری اپوکسی و P: ماتریس پلیمری PVA)

نشان داده است مقدار سلولز و تخلخل چوب بر شفافیت فرآورده موثر است. ویژگی های چوب شفاف از طریق تفاوت های گونه های چوبی مختلف از نظر مقدار سلولز قابل تنظیم است. مقادیر سلولز راش $47/66\%$ [۲۴] و افرا $36/70\%$ [۲۶] گزارش شده است. همچنین نزدیک تر بودن

با توجه به شکل ۴، شفافیت نوری راش بهتر است. علاوه بر این رزین اپوکسی نتایج بهتری نسبت به رزین PVA نشان داد. ظاهر واضح حروف در زیر نمونه چوب شفاف، بخصوص در آزمونهای ساخته شده با رزین اپوکسی نشان دهنده عبور نور بالا است (شکل ۳). تحقیقات

شفاف اپوکسی شود. مقدار لیگنین باقی مانده بیشتر گونه افرا نسبت به گونه چوبی راش نیز می تواند باعث کاهش عبور نور در نمونه افرا شده باشد.

ضریب شکست اپوکسی به سلولز در مقایسه با PVA و فرایند ساخت راحت تر نمونه های ETW در مقایسه با PTW می تواند باعث ویژگی های نوری بهتر نمونه های



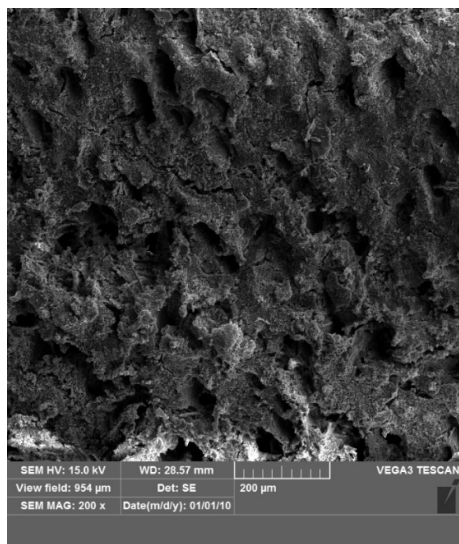
شکل ۵- کدری تیمارهای مختلف چوب شفاف (B: چوب راش، A: چوب افرا، E: ماتریس پلیمری اپوکسی و P: ماتریس پلیمری PVA)

طولانی تری در سلولز خورشیدی به دام می افتد. زمان به دام افتادن طولانی تر به معنای تعامل بهتر بین نور و محیط است که می تواند منجر به راندمان بهتر سلولز خورشیدی شود [۳۰]. کدری باعث می شود ضمن حفظ حریم خصوصی داخلی، نور طبیعی به داخل ساختمان منتقل شود. همانطور که در شکل نیز مشاهده می شود کدری نمونه های چوب شفاف هر دو گونه چوبی با رزین های مختلف تفاوت چشمگیری ندارد و از این نظر برای غلبه بر خیرگی نور نیز مفید هستند. جدول ۲ به مقایسه تغییرات مقادیر عبور نور و کدری نمونه های شفاف نسبت به نمونه های پلیمر خالص می پردازد. نمونه MPTW کمترین عبور نور را نسبت به نمونه شاهد داشته و بیشترین کدری نیز در نمونه چوب METW مشاهده شد. شکل های ۶ و ۷ نتایج مربوط به میکروسکوپ الکترونی نمونه های مختلف شامل نمونه های شاهد و چوب شفاف را نشان می دهند.

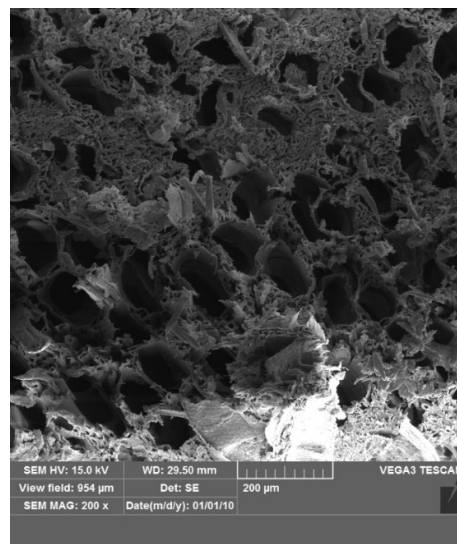
شکل ۵ کدری نمونه های شفاف را در مقایسه با پلیمرهای خالص نشان می دهد. نتایج نشان داد کدری چوب شفاف، بیشتری از نمونه های رزین خالص است. پخش شدن پرتو به دلیل ساختار ارتوتروپیک چوب و مجموعه فیبریل های سلولزی در دیواره سلولی رخ می دهد. سلولز موجود در ساختار چوب از یک سو باعث شفافیت و عبور نور شده و از سوی دیگر نور را در همه جهات پراکنده می کند [۲۱]. فیبریل های سلولزی بافت چوب در امتداد دیواره سلولی پرتو نور را هدایت می کنند تا روی مخروطی در راستای فیبر پخش شود [۲۷] پس از عبور پرتو از چوب شفاف، هندسه مقطع آن به شکل متوازی الاضلاع پخش می شود [۲۱] که این عوامل باعث کدر شدن و ماتی نمونه های چوب شفاف می شود. کدری زیاد نمونه های چوب شفاف برای برخی از کاربردها بسیار مفید است. چنانچه در بستر سلولز خورشیدی جذابیت زیادی برای مصرف کننده دارد [۲۸ و ۲۹] زیرا همراه با پراکندگی بیشتر نور در این فرآورده، نور برای مدت

جدول ۲. دامنه درصد تغییرات خواص نوری کامپوزیت های چوبی شفاف نسبت به نمونه های شاهد از پلیمر خالص

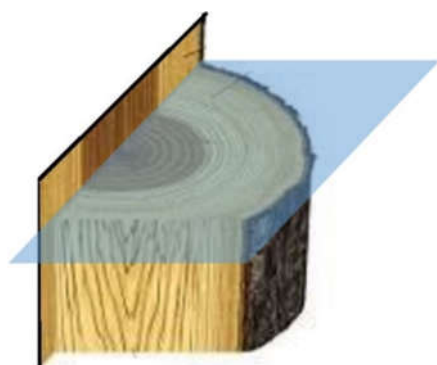
نمونه های	درصد تغییرات نسبت به نمونه های شاهد (%)	
	عبور نور	کدری
BETW	-۱۷/۴۳	۶۶۶/۷۰
METW	-۲۴/۳۴	۶۷۱/۴۳
EPTW	-۷/۸۵	۴۸۶/۱۱
MPTW	-۷۷/۴۲	۴۸۵/۸۷



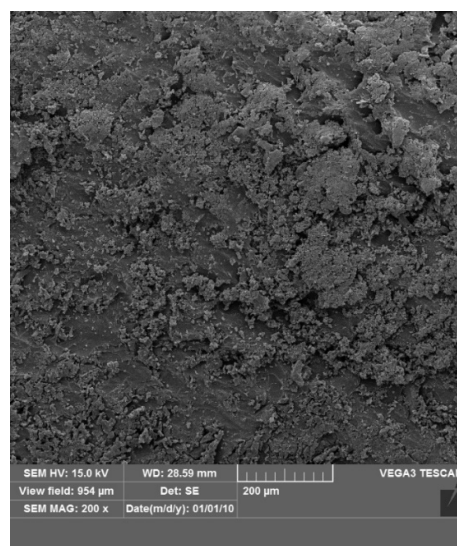
(ب)



(الف)

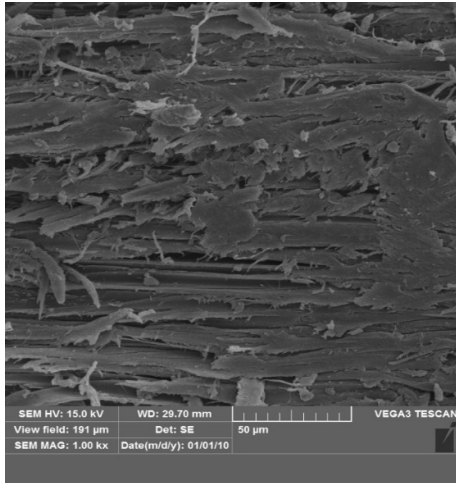


(د)

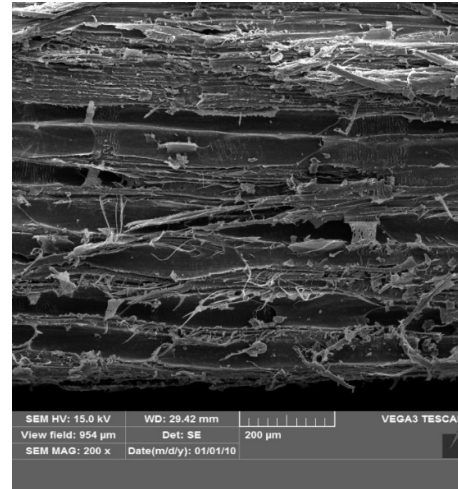


(ج)

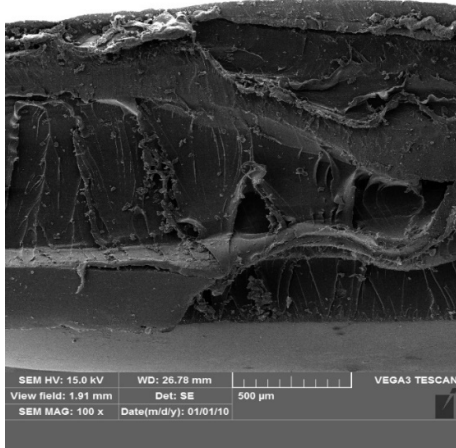
شکل ۶- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از ریزساختار چوب شفاف. الف) تصویر مقطع عرضی روکش چوبی ب) چوب لیگنین زدایی شده، دیواره‌های سلولی نازک‌تر چوب و مجاله شدن حفرات را پس از فرآیند لیگنین زدایی نشان می‌دهد. ج) تصاویر SEM از چوب شفاف پر شده با پلیمر، ساختار متراکم چوب را نشان می‌دهد. د) طرح شماتیک از مقطع مورد بررسی را نشان می‌دهد.



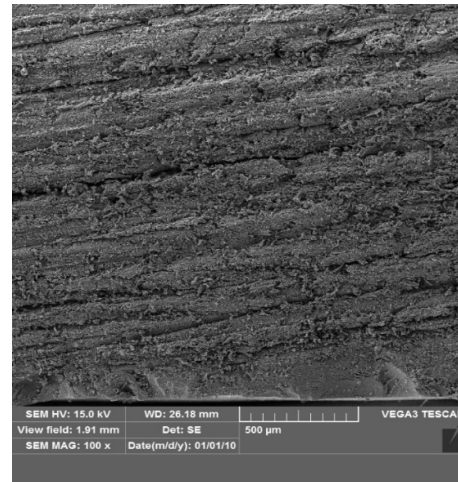
(ب)



(الف)



(د)



(ج)



(ه)

شکل ۷- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از ریزساختار چوب شفاف. الف) تصویر چوب ب) چوب لیگنین زدایی شده، دیواره‌های سلولی نازک‌تر چوب و مجاله شدن حفرات را پس از فرآیند لیگنین زدایی نشان می‌دهد. ج) تصاویر SEM از چوب شفاف پر شده با پلیمر و ساختار متراکم چوب را نشان می‌دهد د) حفرات آوندی مسدود شده با پلیمر و ه) طرح شماتیک از مقطع شعاعی مورد بررسی را نشان می‌دهد

نتیجه گیری

نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان داد امکان تولید کامپوزیت چوبی شفاف با گونه‌های بومی فراهم است. گونه راش خواص نوری بهتری داشت و عبور نور و کدری مناسب‌تری نشان داد. کامپوزیت چوبی شفاف دارای ویژگی‌های کدری مناسبی است که با استفاده از آن در فضاهای قابل تفکیک و پنجره‌ها، ضمن فراهم ساختن امکان استفاده از نور خورشید شرایط مناسب برای حفظ حریم خصوصی هم ایجاد می‌شود. این فراورده به دلیل داشتن کدری بالا از عبور نور خیره کننده جلوگیری می‌کند. نتایج به دست آمده از هر دو گونه مناسب است و کامپوزیت ساخته شده از رزین اپوکسی ویژگی‌های بهتری نشان داد. نتایج به دست آمده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی تغییرات حفرات پس از فرایند لیگنین‌زدایی و پر شدن حفرات طی فرایند ساخت چوب شفاف را تایید کرد. تحقیق در زمینه چوب‌های شفاف هوشمند با قابلیت تغییر شفافیت پویا با استفاده از مواد محرک‌پذیر برای ایجاد پنجره‌هایی که براساس دما، نور یا ولتاژ تغییر شفافیت می‌دهند، ادغام این فراورده با فناوری‌های انرژی‌های تجدیدپذیر مانند استفاده از آن به عنوان بستر سلول‌های خورشیدی نسل جدید و یکپارچه‌سازی با سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی و بهبود پایداری و چرخه عمر با کمک توسعه روش‌های بازیافت کامل چوب شفاف و استفاده از پلیمرهای زیستی به جای PMMA از حوزه‌های تحقیقاتی داغ در سال ۲۰۲۵ برای چوب شفاف محسوب می‌شوند که در مراحل بعدی تحقیقات و به ثمر نشستن فرایند تولید می‌توان آنها را پیگیری نمود.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی طبق ابلاغ گرنت شماره ۱۴۰۴/۳۹۲۱۱۷ مورخ ۱۴۰۴/۰۳/۱۷ انجام گردیده است.

منابع

- [2] Huang, Y., Chen, Y., Fan, X., Luo, N., Zhou, Sh., Chen, S.C., Zhao, N. and Wong C.P. 2018. Wood derived composites for high sensitivity and wide linear-range pressure sensing. *Small*, 14(31), 1801520. <https://doi.org/10.1002/sml.201801520>
- [3] Li, Y., Vasileva, E., Sychugov, I., Popov, S. and Berglund L. 2018. Optically transparent wood: recent progress, opportunities, and challenges. *Advanced Optical Materials*, 6(14), 1800059. <https://doi.org/10.1002/adom.201800059>
- [4] Vasileva E., Chen, H., Li, Y., Sychugov, I., Yan, M., Berglund, L. and Popov S. 2018. Light scattering by structurally anisotropic media: a benchmark with transparent wood. *Advanced Optical Materials*, 6(23), 1800999. <https://doi.org/10.1002/adom.201800999>
- [5] Fink S. 1992. Transparent wood—a new approach in the functional study of wood structure. *Holzforschung*, 46, 403–408. <http://doi.org/10.1515/hfsg.1992.46.5.403>
- [6] Choy, W.C.H., Chan, W.K. and Yuan, Y. 2014. Recent advances in transition metal complexes and light-management engineering in organic optoelectronic devices. *Advanced Materials*, 26(31), 5368–5399. <https://doi.org/10.1002/adma.201306133>
- [7] Jia, C., Chen, C., Mi, R., Li, T., Dai, J., Yang, Z., Pei, Y., He, S., Bian, H., Jang, S.H., Zhu, J.Y. Yang, B. and Hu, L. 2019. Clear wood toward high-performance building materials. *ACS Nano*, 13(9), 9993–10001. <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b00089>
- [8] Chen, L., Zhang, Y., Wang, H., & Hu, L. (2024). High-performance transparent wood with tunable light transmission for smart windows. *Advanced Energy Materials*, 14(5), 230–245. <http://doi.org/10.1002/aenm.202303456>
- [9] Zhou, J., Li, X., & Yu, Y. (2024). Multifunctional transparent wood composites for smart buildings. *Nature Materials*, 23(3), 345–358. <http://doi.org/10.1038/s41563-024-01815-1>
- [10] Zhao, L., Strobach, E., Bhatia, B., Yang, S., Leroy, A., Zhang L. and Wang E. N. 2019. Theoretical and experimental investigation of haze in transparent aerogels. *Optics Express*, 27(4), 39–50. <https://doi.org/10.1364/OE.27.000A39>
- [11] Chen, H., Baitenov, A., Li, Y., Vasileva, E., Popov, S., Sychugov, I., Yan, M. and Berglund, L. 2019. Thickness dependence of optical transmittance of transparent wood: chemical modification effects. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(38), 35451–35457. <https://doi.org/10.1021/acsmi.9b11816>
- [12] Chen, H., Montanari, C., Shanker, R., Marcinkevicius, S., Berglund, L.A. and Sychugov, I. 2022. Photon Walk in transparent wood: scattering and absorption in hierarchically structured materials. *Advanced Optical Materials*, 10(8), 2102732. <https://doi.org/10.1002/adom.202102732>
- [1] Chen, C., Kuang, Y., Zhu, Sh., Burgert, I., Keplinger, T., Gong, A., Li, T., Berglund, L., Eichhorn, S.J. and Hu, L. 2020. Structure–property–function relationships of natural and engineered wood. *Nature Reviews Materials*, 5(9), 642–666. <http://doi.org/10.1038/s41578-020-0195-z>

- [23] Heged, G., Sarkadi T. and Czigány T. 2017. Analysis of the Light Transmission Ability of Reinforcing Glass Fibers Used in Polymer Composites. *Materials*, 10, 637-646 <https://doi.org/10.3390/ma10060637>
- [24] Somesh, T. E., Al-Gunaid, M.Q. A., Madhukar, B. S. and Hatna S. 2019. Photosensitization of optical band gap modified polyvinyl alcohol films with hybrid AgAlO₂ nanoparticles. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* <https://doi.org/10.1007/s10854-018-0226-3>
- [25] Bodîrlău, R., Teacă C. A. and Spiridon I. 2008. Chemical modification of beech wood: Effect on thermal stability. *BioResources*, 3(3), 789-800 <http://doi.org/10.15376/biores.3.3.789-800>
- [26] Antczak, A., Michaluszko, A., Klosinska, T. and Drozddek M. 2013. Determination of the structural substances content in the field maple wood (*Acer campestre* L.) – comparison of the classical methods with instrumental. *Forestry and Wood Technology*, 82, 11-17.
- [27] Marschner, S. R., Westin, S. H., Arbree, A., and Moon, J. T. 2005. Measuring and modeling the appearance of finished wood. *ACM Transactions on Graphics*, 24 (3), 727–734. <http://doi.org/10.1145/1073204.1073254>
- [28] Fang, Z. Q., Zhu, H. L., Yuan, Y. B., Ha, D. H., Zhu, S. Z., Preston, C., Chen, Q. X., Li, Y. Y., Han, X. G., Li, S. W., Chen, G., Li, T., Munday, J., Huang, J. S., Hu, L. B. 2014. Novel Nanostructured Paper with Ultrahigh Transparency and Ultrahigh Haze for Solar Cells. *Nano Letters*, 14(2), 765 – 773. <https://doi.org/10.1021/nl404101p>
- [29] Gan, W., Xiao, S., & Berglund, L. A. (2024). Sustainable transparent wood for eco-friendly photovoltaics. *Joule*, 8(2), 410–425. <http://doi.org/10.1016/j.joule.2024.01.012>
- [30] Lare, C. V., Lenzmann, F., Verschuuren, M. A., Polman, A. 2015. Dielectric Scattering Patterns for Efficient Light Trapping in Thin-Film Solar Cells. *Nano Letters*, 15(8), 4846 – 4852. <http://doi.org/10.1021/nl5045583>
- [13] Chen, P., Li, Y., Nishiyama, Y., Pingali, S.V., Neill, H.M.O., M. Zhang, Q. and Berglund, L.A. 2021. Small angle neutron scattering shows nanoscale PMMA distribution in transparent wood biocomposites. *Nano Letter*, 21(7), 2883–2890. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.0c05038>
- [14] Wu, J., Wu, Y., Yang, F., Tang, C., Huang, Q. and Zhang, J. 2019. Impact of delignification on morphological, optical and mechanical properties of transparent wood. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 117, 324–331. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.12.004>
- [15] Foster, K.E.O., Jones, R., Miyake, G.M., Srubar, W.V. 2021. Mechanics, optics, and thermodynamics of water transport in chemically modified transparent wood composites. *Composites Science and Technology*, 208, 108737. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2021.108737>
- [16] ASTM D1003-21, Standard Test Method for Haze and Luminous Transmittance of Transparent Plastics. ASTM international.
- [17] TAPPI. (2002). Acid-insoluble lignin in wood and pulp (T 222 om-02). TAPPI Press.
- [18] TAPPI. (2013). Kappa number of pulp (T 236 om-13). TAPPI Press.
- [19] Müller, U., Rätzsch, M., Schwanninger, M., Steiner, M., Zöbl, H. 2003. Yellowing and IR-changes of spruce wood as result of UV-irradiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 69(2), 97 – 105.
- [20] Wang, J., Deng, Y., Qian, Y., Qiu, X., Ren, Y., Yang, D. 2016. Reduction of lignin color via one-step UV irradiation. *Green Chemistry*, 18, 695 – 699. <https://doi.org/10.1039/C5GC02180D>
- [21] Li, Y., Fu, Q., Yu, Sh., Yan M. and Berglund L. 2016. Optically Transparent Wood from a Nanoporous Cellulosic Template: Combining Functional and Structural Performance. *Biomacromolecules*, 17,1358 – 1364. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.6b00145>
- [22] Toomre, D., Manstein, D. J. 2001. Lighting up the cell surface with evanescent wave microscopy. *Trends in Cell Biology*, 11(7), 298 – 303.