

(OPEN ACCESS)

Evaluation of mechanical properties of engineered transparent wood from several domestic hardwood species

Hamideh Abdolzadeh^{*1}, Reza Saadati², Seyed Mahmoud Miri Tari³

1. Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Wood Science and Technology, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran. E-mail: h_abdolzadeh@sru.ac.ir
2. M.Sc. Student of Wood Science and Technology, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran. E-mail: rezasaadati2424@gmail.com
3. Assistant Prof., Dept. of Wood Science and Technology, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran. E-mail: miritari@sru.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Full Length Research Paper	Background and Objectives: Polymers are used in industrial and structural applications not only for their cost-effectiveness but also for their desirable mechanical properties. Consequently, these mechanical properties are often more critical than chemical or physical properties in most applications and are a major focus of research. It is therefore essential to understand these properties thoroughly and to leverage the structural versatility of polymers to enhance mechanical performance. Wood, one of the oldest construction materials, is highly valued in building structures, particularly green structures, due to its lightweight nature and high tensile strength along the fiber direction. Researchers have long been interested in combining the favorable mechanical properties of wood with various polymers, leading to the development of various wood composites. Transparent wood composites (known as "transparent wood" in European and American industries) are emerging materials used as substitutes for glass. A detailed investigation of their properties is essential for developing commercially viable products.
Article history: Received: 08.14.2025 Revised: 09.24.2025 Accepted: 10.14.2025	
Keywords: Epoxy resin, Mechanical properties, Parallel-to-grain tension, Polyvinyl alcohol resin, Transparent wood composite	
	Materials and Methods: This study used three native wood species common in Iran, beech, maple, and poplar, to produce transparent wood composites. The wood veneers were delignified using sodium chlorite (NaClO_2) at a pH of 4.6. The delignified samples were then impregnated with epoxy resin (E) and polyvinyl alcohol (PVA) under vacuum conditions. The PVA resin was polymerized at 40 °C in an oven, while the epoxy resin was cured at ambient temperature. The resulting specimens were evaluated for transparency and prepared for tensile testing along the fiber direction. Data were analyzed using analysis of variance (ANOVA), and mean comparisons were performed using Duncan's Multiple Range Test (DMRT) at a 95% confidence level with SPSS software.
	Results: The results showed that the veneers retained desirable tensile strength along the fiber direction despite the delignification process. Transparent maple wood specimens exhibited favorable properties with both resin types. However, the properties of products made with PVA

resin were superior to those made with epoxy resin. Control specimens of pure epoxy and PVA polymers exhibited higher strain at break than the transparent wood composites and other control specimens. Among all species, transparent maple wood with PVA resin demonstrated the highest ultimate tensile stress and corresponding strain in the longitudinal direction.

Conclusion: The suitable transparency of the produced composites, combined with their favorable mechanical properties, makes them appropriate for structural components where transparent products are subjected to tensile stresses along the fiber direction. The results indicate that both polymer matrices performed acceptably under axial stress, a finding further supported by the high strain observed in the products.

Cite this article: Abdolzadeh, Hamideh, Saadati, Reza, Miri Tari, Seyed Mahmoud. 2025. Evaluation of mechanical properties of engineered transparent wood from several domestic hardwood species. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 32 (2), 85-102.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwfst.2025.23973.2123

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

ارزیابی خواص مکانیکی چوب شفاف مهندسی از چند گونه پهن برگ داخلی

حمیده عبدل‌زاده^{۱*}، رضا سعادت^۲، سید محمود میری تازی^۳

۱. نویسنده مسئول، استادیار گروه صنایع چوب، دانشکده عمران، دانشگاه تربیت‌دبیر شهیدرجایی، تهران، ایران. رایانامه: h_abdolzadeh@sru.ac.ir
۲. دانشجوی کارشناسی‌ارشد صنایع چوب، دانشکده عمران، دانشگاه تربیت‌دبیر شهیدرجایی، تهران، ایران. رایانامه: rezasaadati2424@gmail.com
۳. استادیار گروه صنایع چوب، دانشکده عمران، دانشگاه تربیت‌دبیر شهیدرجایی، تهران، ایران. رایانامه: miritari@sru.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی-پژوهشی	سابقه و هدف: علاوه بر قیمت مناسب دلیل اصلی استفاده از پلیمرها در صنعت و ساخت سازه‌ها، خواص مکانیکی مطلوب آن است. به این دلیل خواص مکانیکی در اکثر کاربردها دارای اهمیت بیش‌تری نسبت به خواص شیمیایی و فیزیکی بوده و مورد توجه می‌باشد؛ بنابراین لازم است اطلاع جامعی در رابطه با این خواص به‌دست آورد و چگونگی اصلاح رفتارهای مکانیکی را با کمک عوامل ساختاری زیاد پلیمرها پیگیری نمود. چوب جزء قدیمی‌ترین مصالح ساختمانی است که به‌دلیل سبک بودن و مقاومت کششی بالا در راستا موازی الیاف دارای ارزش زیادی در ساخت سازه‌ها به‌خصوص سازه‌های سبز است. تلفیق خواص مکانیکی خوب چوب با پلیمرهای مختلف از دیرباز مورد توجه پژوهش‌گران مختلف قرار گرفته است. کامپوزیت چوبی مختلف محصول این دیدگاه است. کامپوزیت چوبی شفاف که در صنعت اروپا و آمریکا به‌عنوان چوب شفاف شناخته می‌شود از جمله کامپوزیت‌های نوظهوری هستند که به‌عنوان جایگزینی برای شیشه استفاده می‌شوند. بررسی ویژگی‌های متنوع این فرآورده برای رسیدن به محصول تجاری مناسب ضروری به نظر می‌رسد.
واژه‌های کلیدی: خواص مکانیکی، رزین اپوکسی، رزین پلی‌وینیل الکل، کامپوزیت چوبی شفاف، کشش موازی الیاف	مواد و روش‌ها: در پژوهش حاضر سه گونه بومی پرمصرف در ایران شامل راش، افرا و صنوبر 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 خلأ 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. آزمون‌های ساخته‌شده پس از بررسی شفافیت برای آزمون کشش در راستای الیاف آماده شد. داده‌ها با استفاده از تحلیل واریانس (ANOVA) تجزیه و تحلیل شدند. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن (DMRT) با سطح اطمینان ۹۵٪ انجام شد. تمام تجزیه و تحلیل‌ها با نرم‌افزار SPSS انجام شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد علی‌رغم انجام فرایند لیگنین‌زدایی، روکش‌ها هم‌چنان مقاومت کششی مطلوبی در راستا الیاف داشتند. آزمون‌های شفاف گونه چوبی افرا خواص مناسبی با هر دو نوع رزین نشان داد. ویژگی‌های فراورده‌های ساخته‌شده با رزین پلی‌وینیل الکل بهتر از رزین اپوکسی بود. آزمون‌های شاهد از پلیمر اپوکسی و پلی‌وینیل الکل دارای کرنش شکست بالاتری نسبت به کامپوزیت‌های چوبی شفاف و سایر آزمون‌های شاهد بودند. چوب شفاف گونه افرا و رزین PVA از نظر مقادیر تنش نهایی و کرنش معادل آن در راستای طولی بهتر از سایر گونه‌ها بود.

نتیجه‌گیری: براساس نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر شفافیت مناسب فراورده‌های ساخته‌شده در کنار خواص مکانیکی مناسب، شرایط استفاده این محصول را در قسمت‌هایی از سازه که فراورده شفاف تحت تنش‌های کششی در راستا الیاف می‌باشد، مساعد می‌سازد. نتایج نشان داد هر دو ماتریس پلیمری نتایج قابل‌قبولی در برابر تنش محوری داشتند و کرنش بالای فراورده‌ها نیز تأییدی بر این موضوع است.

استناد: عبدالزاده، حمیده، سعادت، رضا، میری تار، سید محمود (۱۴۰۴). ارزیابی خواص مکانیکی چوب شفاف مهندسی از چند گونه پهن‌برگ داخلی. نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل، ۳۲ (۲)، ۸۵-۱۰۲.

DOI: 10.22069/jwfst.2025.23973.2123



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

چوب ماده اولیه چندمنظوره محسوب می‌شود. شیشه به‌عنوان ماده اولیه در ساخت‌وساز به دلیل مقاومت مکانیکی اندک، خطرناک بودن قطعات پس از شکست به دلیل لبه‌های برنده و تیز و قطعات ریز، عدم سازگاری با محیط‌زیست و باقی ماندن در طبیعت با محدودیت‌هایی مواجه است. چوب شفاف مهندسی^۱ شده (ETW) در صنعت ساختمان و ساخت‌وساز می‌تواند به‌عنوان جایگزین شیشه عمل کند. برای ساخت چوب شفاف، لیگنین و رنگسازهای ساختار آن اصلاح یا حذف می‌شوند، جذب نور کاهش می‌یابد و پراکندگی نور در سطح مشترک هوا/دیواره سلولی به حداقل رسیده و با نفوذ پلیمری به درون آن، شفافیت حاصل می‌شود (۱). ETW دارای خواص نوری عالی، کدری بالا، عایق حرارتی، ساختار سلسله مراتبی منحصربه‌فرد، عملکرد خوب در تحمل بار و شکل‌پذیر است. این خواص، کاربردهای چوب را در سازه‌های نوری مانند سلول‌های خورشیدی، صفحات نمایش، پنجره‌ها، مواد مغناطیسی و مواد لومینسانس و تزئینی گسترش می‌دهد.

در ETW پراکندگی نور و ضریب شکست کاهش یافته و انعکاس نور کنترل و شفافیت افزایش می‌یابد. چوب لیگنین‌زدایی شده دارای ساختار دیواره سلولی مزومتخلخل منحصربه‌فرد و سطح ویژه بالایی است (۲). هرچند مطالعاتی برای تولید ETW با استحکام و خواص نوری عالی انجام شده است، اما نیاز به بهبود همکشیدگی پلیمر طی پلیمریزاسیون، از بین بردن شکاف‌های دیواره سلولی با بهبود نفوذ پلیمر، بهبود یکپارچگی کوتاه‌مدت و بلندمدت ETW به‌ویژه در کاربردهای بیرونی، بهره‌برداری از ویژگی‌های طبیعی چوب به نفع ETW (مثلاً الگوهای زیبایی‌شناختی) و کاهش محدودیت‌های نوری ETW مربوط به

ضخامت با اصلاح سطح، لایه‌بندی و چندلایه‌سازی وجود دارد (۳، ۴).

پلیمر نقش مهمی در تعیین خواص ساختاری، نوری و عملکردی ETW ایفا می‌کند (۵). یک پلیمر خوب، پلیمری است که ضریب شکست آن با اجزای چوب شامل سلولز (۱/۵۲۵)، همی‌سلولز (۱/۵۳۲) و لیگنین (۱/۶۱۰) مطابقت داشته باشد (۶). علاوه‌بر این، ضریب شکست، ویسکوزیته، سازگاری و همکشیدگی پلیمر، معیارهای مهم انتخاب هستند (۷). مزایای کامپوزیت‌های ETW نسبت به سایر فراورده‌های شفاف یا موانع پرهزینه ورود نور مانند پرده‌های داخلی و خارجی، موانع حرارتی شفاف، سایه‌بان‌ها، پوشش‌ها، فیلم‌ها و پنجره‌های چند جداره قابل بررسی است. ولی خواص نوری خوب این فراورده مانند عبور نور و کدری انکارناپذیر است (۸، ۹، ۱۰). ETW ارزان، پایدار، تجدیدپذیر، سبک است و می‌تواند مشکلات ایمنی مرتبط با شکنندگی شیشه را کاهش می‌دهد (۱۱، ۱۲). لی و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند که ETW در هنگام شکست تقریباً تنشی بیش از شکست شیشه را می‌تواند تحمل کند. کرنش شکست این فراورده بسیار بیشتر از شیشه است (۱۳).

استفاده از ETW به‌عنوان مصالح ساختمانی به‌جای شیشه به بهبود عبور نور، عدم ایجاد اثر خیرگی، کدری مناسب، هدایت خاص نور با نسبت پراکندگی زیاد درون ماده، عایق خوب حرارتی، کاهش مشکلات ایمنی، ساخت ساده و سریع و مقیاس‌پذیری منجر شد (۱۴). لی و همکاران (۲۰۱۶) نشان دادند که استفاده از ETW به‌عنوان سقف، روشنایی یکنواخت و دمای ثابت را در داخل ساختمان حفظ می‌کند (۱۴، ۱۵).

برای بهبود انعطاف‌پذیری ETW می‌توان تغییراتی در پلیمرهای استفاده شده ایجاد کرد. یکی از این

تأثیرگذار بر خواص مکانیکی محصول است. بررسی محصول تحت تنش‌های محوری یکی از این زمینه‌های تحقیقاتی است. در این پژوهش به اثر ماتریس‌های پلیمری مختلف در ETW‌های حاصل از سه گونه پرکاربرد در ایران بر مقادیر مقاومت کششی و کرنش شکست محصول پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

برای ساخت کامپوزیت‌های چوب شفاف روکش‌هایی از چوب راش، افرا و صنوبر به ترتیب با ضخامت‌های ۱ mm، ۱/۲ و ۱/۸ تهیه شد. روکش‌ها در ابعاد ۱۰۰×۵۰ mm^۲ برش داده شد و سپس لیگنین‌زدایی آزمونه‌ها با کمک کلریت سدیم با غلظت ۴٪ در بافر با pH ۴/۶ در دمای ۸۰°C تا سفید شدن آزمونه‌ها انجام شد.

روش‌ها نفوذ دادن رزین PVP است که شامل رزین PVA با عامل نرم‌کننده مانند پروپیلن گلیکول (PG) استفاده شد (۱۶). ضخامت ETW به ضخامت چوب اولیه بستگی دارد. خواص مکانیکی و نوری ETW را می‌توان با خواص نوری و مکانیکی پلیمر نفوذ داده شده کنترل کرد. رسیدن به چنین محصولاتی مستلزم ساخت فرآورده‌های اولیه و بررسی ویژگی‌های مختلف آن از نظر مکانیکی، فیزیکی و نوری است.

بررسی پژوهش‌های اخیر در زمینه فرآورده‌های چوبی و چوب شفاف نشان داد که این محصول در ۱۰ سال اخیر مورد توجه ویژه پژوهش‌گران قرار گرفته است ولی در ایران پژوهش‌های مبسوطی در رابطه با کامپوزیت چوبی شفاف انجام نشده است. یکی از قسمت‌های مهم در پژوهش‌های ابتدایی این محصول، بررسی خواص مکانیکی آن و شناسایی عوامل

جدول ۱- علائم اختصاری تیمارها.

Table 1. Abbreviations of treatments.

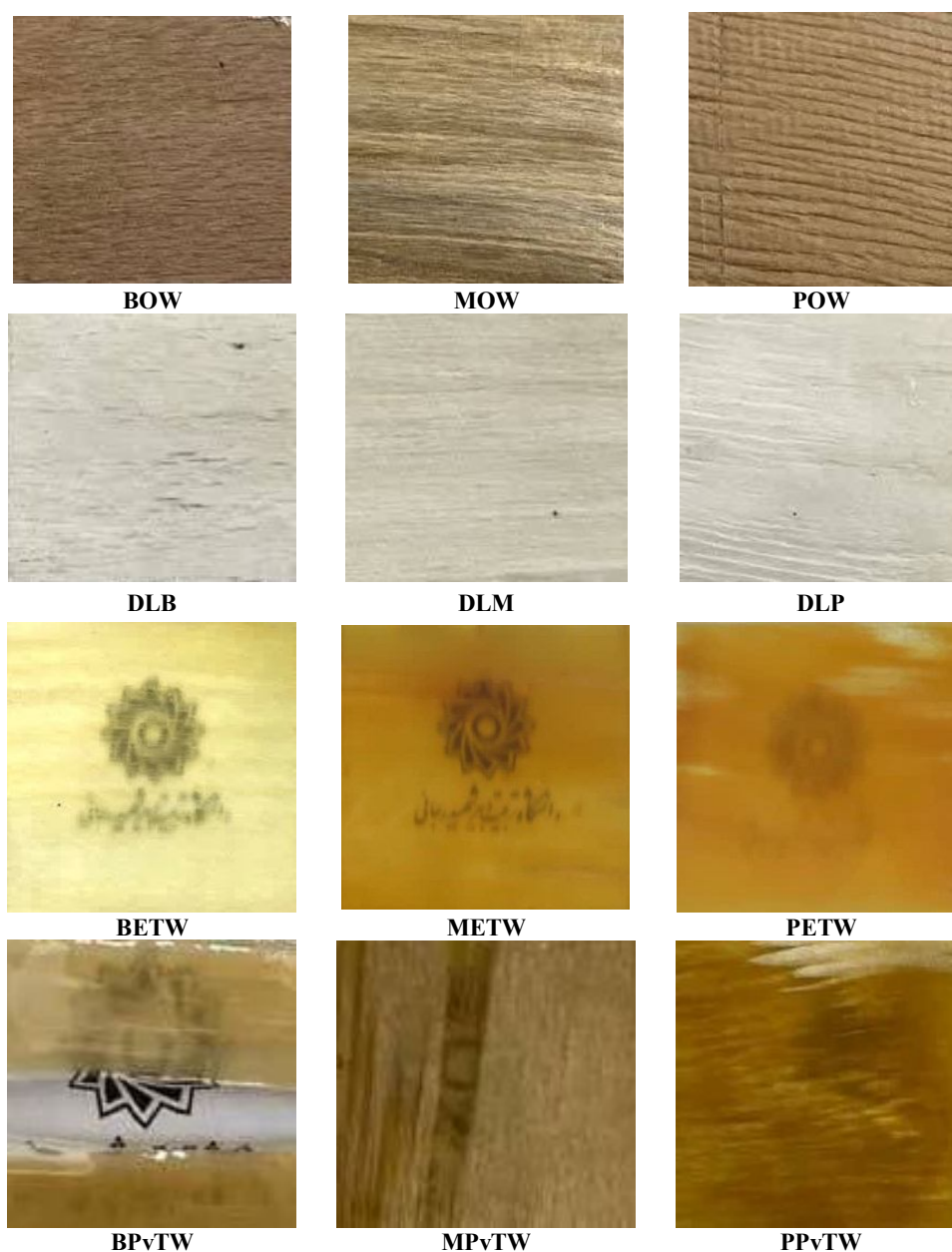
تیمار Treatment	علائم اختصاری Abbreviation	تیمار Treatment	علائم اختصاری Abbreviation
روکش چوب راش Beech Wood Veneer	B	چوب شفاف راش با رزین اپوکسی Beech Transparent Wood with Epoxy resin	BE
روکش چوب افرا Maple Wood Veneer	M	چوب شفاف افرا با رزین اپوکسی Maple Transparent Wood with Epoxy resin	ME
روکش چوب صنوبر Poplar Wood Veneer	P	چوب شفاف صنوبر با رزین اپوکسی Poplar Transparent Wood with Epoxy resin	PE
روکش لیگنین‌زدایی شده راش Delignification of Beech Veneer	B	چوب شفاف راش با رزین PVA Beech Transparent Wood with PVA resin	BPv
روکش لیگنین‌زدایی شده افرا Delignification of Maple Veneer	M	چوب شفاف افرا با رزین PVA Maple Transparent Wood with PVA resin	MPv
روکش لیگنین‌زدایی شده صنوبر Delignification of Poplar Veneer	P	چوب شفاف صنوبر با رزین PVA Poplar Transparent Wood with PVA resin	PPv
رزین اپوکسی Epoxy resin	E		
رزین پلی‌وینیل‌الکل (PVA) Polyvinyl alcohol (PVA) resin	Pv		

از آنجاکه مقادیر لیگنین باقی مانده بر روی خواص نوری و مقاومت کامپوزیت مؤثر است، تعیین مقادیر لیگنین باقی مانده در روکش های لیگنین زدایی شده ضروری است. به دلیل مقادیر اندک لیگنین باقی مانده امکان تعیین آن از طریق استاندارد TAPPI T 222 om-02 (لیگنین کلزن) فراهم نبود (۱۷)، بنابراین از طریق تعیین عدد کاپا بر اساس استاندارد TAPPI T 236 om-13 محاسبه شد (۱۸). مقدار لیگنین باقی مانده در آزمون های DLM، DLB و DLP به ترتیب $1/78$ ، $3/13$ و $2/84$ به دست آمد.

پس از لیگنین زدایی آزمون ها، با تزریق رزین های اپوکسی شفاف (E)، پلی وینیل الکل (PVA)، کامپوزیت های چوبی شفاف ساخته شدند. رزین PVA با حل کردن پودر پلی وینیل الکل شرکت مرک در آب مقطر با غلظت 8% در دمای بین 80°C تا 90°C با هم زدن مداوم تهیه شد. این رزین محلول در آب به مقدار ۱۵ برابر ضخامت آزمون ها درون ظروف ریخته شده و آزمون های لیگنین زدایی شده درون ظرف غوطه ور شد (۱۹). آزمون های لیگنین زدایی شده غوطه ور در رزین تا زمانی که رزین کاملاً حباب گیری شود تحت خلأ قرار گرفت. تقریباً در تمام آزمون ها پس از حباب گیری آزمون ها تا ۱۵ دقیقه تحت شرایط خلأ باقی ماند تا رزین داخل آزمون ها به طور کامل نفوذ کند. آزمون های غوطه ور در رزین به مدت ۷۲ ساعت درون آن با دمای حدود 40°C تا تکمیل

فرایند پلیمریزاسیون و خشک شدن کامل قرار گرفت. کامپوزیت های حاوی رزین اپوکسی با تزریق رزین دوجزئی شامل رزین و هاردنر با نسبت ۱:۲ پس از مخلوط و هم زدن کامل ساخته شدند. رزین اپوکسی مانند رزین PVA تحت شرایط خلأ به آزمون های لیگنین زدایی شده تزریق شد. سپس به مدت ۷۲ ساعت در دمای اتاق قرار گرفت تا کاملاً خشک شود. از آزمون چوب با ابعاد مشابه، آزمون های لیگنین زدایی شده و پلیمر شفاف برای مقایسه بهتر نتایج به عنوان آزمون شاهد استفاده شد. تیمارها و علائم اختصاری آن ها در جدول ۱ آورده شده است. مقادیر عبور نور و کدوری آزمون های ساخته شده قبل از انجام آزمون های مکانیکی مورد بررسی قرار گرفت شکل ۱ تصویر ظاهری آن ها را به تفکیک نشان می دهد.

از هر تیمار دو تکرار در ابعاد $100 \times 20 \text{ mm}^2$ توسط دستگاه تست کشش پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی مورد آزمایش قرار گرفت. مقدار تنش نهایی شامل حداکثر تنش در نمودار تنش و کرنش می باشد، توسط دستگاه آزمون گر از نمودار تنش و کرنش استخراج شده و گزارش شد. برای تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده، از نرم افزار SPSS و آزمون تجزیه واریانس در قالب طرح کاملاً تصادفی در سطح احتمال ۹۵ درصد استفاده شد. گروه بندی میانگین ها نیز با آزمون چند دامنه ای دانکن انجام شد.



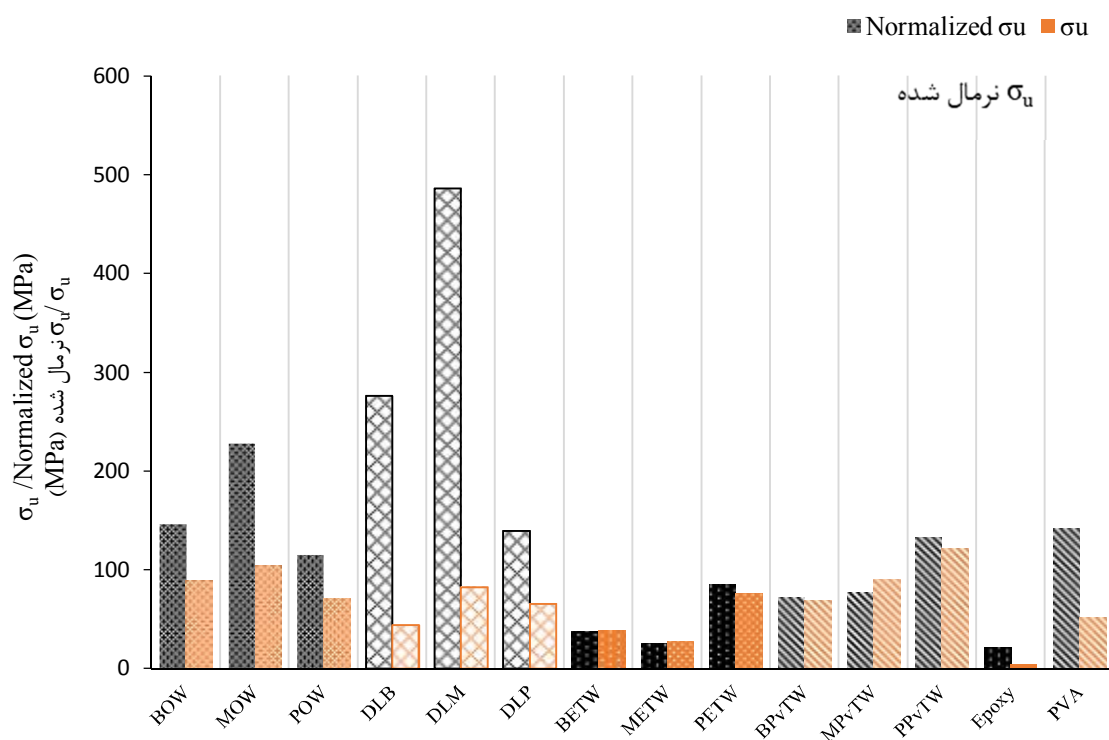
شکل ۱- تصویر نوری روکش چوبی (ردیف ۱)، پس از لیگنین‌زدایی (ردیف ۲)، نمونه‌های چوب شفاف با رزین اپوکسی (ردیف ۳) و نمونه‌های چوب شفاف با رزین PVA (ردیف چهارم).

Figure 1. Optical image of wood veneer (first row), after the delignification (second row), transparent wood specimens with epoxy resin (3th row) and transparent wood specimens with PVA resin (4th row).

مقادیر تنش نهایی کششی و تنش نهایی ویژه با هم مقایسه شده است.

نتایج و بحث

با توجه به اثر دانسیته بر خواص مکانیکی، داده‌های به‌دست‌آمده از آزمون کشش، نرمال‌سازی شد و مقادیر تنش نهایی ویژه محاسبه گردید. در شکل ۲



شکل ۲- مقایسه مقادیر تنش نهایی (σ_u) و تنش نهایی نرمال شده بر اساس دانسیته آزمونه‌ها.

Figure 2. Comparison of ultimate stress (σ_u) and normalized ultimate stress values based on the density of the specimens.

می‌شود. در نتیجه شبکه ضعیف‌تر می‌شود. در برخی از موارد نیز رقیق‌کننده پس از خشک شدن تبخیر می‌شوند و باعث ایجاد حفره‌های ریز در ساختار رزین می‌شود که مقاومت کششی و مکانیکی را کاهش داده و احتمال ترک‌خوردگی و شکنندگی را افزایش می‌دهد. در این پژوهش اپوکسی شفاف و رقیق برای ساخت فراورده استفاده شد.

نتایج تجزیه واریانس عوامل متغیر بر تنش نهایی ویژه (σ_u) آزمونه‌ها تحت کشش در راستای طولی نشان داد، اثرات مستقل و متقابل عوامل متغیر بر مقادیر تنش نهایی آزمونه‌ها در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار است.

شکل ۲، اثر متقابل عوامل متغیر را بر σ_u و σ_u نرمال شده را نشان می‌دهد. بیش‌ترین σ_u در آزمونه‌های PPvETW مشاهده شد. کم‌ترین σ_u مربوط به آزمونه‌های شاهد اپوکسی بود. پژوهش‌های قبلی تأییدی بر مقاومت اندک پلیمرهای خالص (آزمونه‌های شاهد) است (۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۴). رزین اپوکسی پس از اختلاط با هاردنر، یک ساختار شبکه‌ای سه‌بعدی و بسیار مستحکم تشکیل می‌دهد. این شبکه دلیل اصلی مقاومت بالای مکانیکی رزین است. برای کاهش گرانروی و نفوذ بهتر رزین از رقیق‌کننده‌ها استفاده می‌شود. استفاده از رقیق‌کننده‌ها باعث کاهش مقاومت و ضعیف شدن اتصالات

جدول ۲- اثرات مستقل تیمارها بر تنش نهایی (σ_u) نرمال شده و گروه‌بندی دانکن.Table 2. Independent effects of treatments on normalized ultimate stress (σ_u) and Duncan's grouping.

گروه‌بندی دانکن Duncan	σ_u (MPa)	آزمونه‌ها Specimens
a	227.83	شاهد Blanks
c	41.54	اپوکسی Epoxy
b	103.80	PVA
c	85.38	BOW
c	110.34	MOW
c	106.59	POW
b	276.31	DLB
a	486.49	DLM
c	115.29	DLP
c	81.69	ETWs

جدول ۲، اثر مستقل هر یک از متغیرها را بر σ_u و گروه‌بندی دانکن آن‌ها را نشان می‌دهد. بر اساس این جدول، آزمونه‌های شاهد ساخته‌شده با رزین اپوکسی کم‌ترین σ_u را نشان دادند. بر اساس جدول ۳، روند نزولی مقاومت به ترتیب در گونه‌های چوبی راش، صنوبر و افرا مشاهده شد. به دلیل حذف لیگنین از ساختار چوب، خلل و فرج آزمونه‌های شاهد افزایش می‌یابد و به دنبال آن دانسیته کاهش چشمگیری داشته است (جدول ۳). برای بررسی تأثیر دانسیته بر مقاومت نهایی (شکل ۲)، مقادیر تنش نهایی ویژه (نرمال شده) محاسبه شد. نتایج نشان داد تنش نهایی ویژه آزمونه‌های چوب شفاف تفاوت چشمگیری با تنش نهایی نداشتند. ولی این تفاوت به دلیل دانسیته پایین آزمونه‌های شاهد در آن‌ها چشمگیر بود (شکل ۲). البته روند تغییرات مقاومت نیز هم‌چنان ثابت باقی ماند. σ_u آزمونه‌های لیگنین‌زدایی شده مقاومت ویژه

بالای این آزمونه‌ها را تحت تنش کششی در راستای طول نشان داد که نشان‌دهنده عدم تخریب ساختار آزمونه‌ها پس از لیگنین‌زدایی است. وانگ و همکاران (۲۰۲۲) تأیید کردند که چگالی ETW بیش‌تر از چوب لیگنین‌زدایی شده است (۲۵). چوب‌های سبک‌تر پس از حذف لیگنین، مستعد شکستگی هستند (۱۳). لیگنین به‌عنوان یک چسب بین سلول‌های چوب عمل می‌کند، از این‌رو پس از لیگنین‌زدایی، یکپارچگی مکانیکی چوب از بین می‌رود (۳). به دلیل مقدار لیگنین باقی‌مانده بیش‌تر، مقاوم‌ترین ساختار پس از فرایند لیگنین‌زدایی مربوط به گونه افرا بوده است و آزمونه‌های راش کم‌ترین مقاومت را پس از لیگنین‌زدایی نشان دادند. همان‌طور که قابل پیش‌بینی نیز بوده آزمونه‌های ساخته‌شده از ماتریس پلیمری اپوکسی (E) و PVA خالص کم‌ترین مقاومت را داشتند (گروه C).

جدول ۳- دانسیته آزمونه‌ها.

Table 3. Density of specimens.

Specimen آزمونه	OW			DL			EETW			E	PvETW			Pv
	B	M	P	B	M	P	B	M	P		B	M	P	
دانسیته (g/cm ³) Density (g/cm ³)	0.61	0.47	0.62	0.16	0.17	0.4	1.01	1.06	0.95	0.21	0.98	1.17	0.98	0.37

با مصارف سازه‌ای باید نوع رزین با دقت بیشتری انتخاب شود.

بررسی مقاومت کششی PvETW با EETW نشان داد به واسطه مقاومت بالاتر پلیمر خالص PVA نسبت به σ_u ، E در ETW افزایش یافته است. بررسی مقاومت گونه چوبی صنوبر تأیید کرد که PPvETW افزایش مقاومت کششی بالاتری نسبت به سایر گونه‌های چوبی داشته است. مقاومت کششی بالاتر گونه صنوبر به دلیل مقدار لیگنین باقی‌مانده بیش‌تر در ساختار کامپوزیت شفاف است. بررسی‌ها نشان داد به دلیل محتوای لیگنین بیش‌تر در گونه افرا با وجود شرایط مشابه با گونه راش و لیگنین‌زدایی خوب هر دو گونه لیگنین باقی‌مانده در ساختار چوب افرا بیش‌تر بوده که بر روی دانسیته و متناسب با آن بر تنش نهایی ویژه فراورده مؤثر بوده است. پژوهش‌ها نشان داده است که خواص مکانیکی بالای ETW در راستای طولی به دلیل بهبود هم‌افزایی بین ساختار چوب و پلیمر بوده است (۳).

ETW نسبت به رزین اپوکسی خالص σ_u بالاتری را تحمل کردند (شکل ۲ و جدول ۴)، نفوذ پلیمر با چسباندن نانوفیبرهای سلولزی چوب به یکدیگر، استحکام مکانیکی چوب لیگنین‌زدایی شده را بهبود می‌بخشد (۲۵). پس از لیگنین‌زدایی، چگالی به دلیل افزایش تخلخل دیواره سلولی چوب پس از حذف لیگنین، همی‌سلولز و سلولز آمورف، کاهش می‌یابد. پس از نفوذ پلیمر به منافذ، چگالی افزایش می‌یابد (۲۶). افزایش چگالی تأثیر مستقیمی بر خواص مکانیکی دارد. برخی از پژوهش‌های انجام‌شده بر روی ETW تحت خمش نشان داد با توجه به نوع پلیمر استفاده‌شده بهترین تغییرات خمشی در اپوکسی و PVA-PG (پلی‌وینیل الکل - پروپیلن گلیکول) مشاهده شده است (۱۶، ۲۷، ۲۸، ۲۹). استحکام پلیمر خالص به‌طور مثبت بر استحکام ETW کمک می‌کند. خواص ETW برآیندی از ویژگی‌های هر دو ماده سازنده است. برای رسیدن به خواص مکانیکی مطلوب در کنار خواص نوری مناسب باید به این موضوع پرداخته شود. بنابراین در ساخت این فراورده

جدول ۴- دامنه درصد تغییرات مقاومت کششی نرمال شده کامپوزیت‌های چوبی شفاف مهندسی (ETW) نسبت به آزمون‌های شاهد.

Table 4. Range of percentage changes in normalized tension strength of engineered transparent wood (ETW) composite specimens compared to blanks.

آزمون‌های ETW ETW Specimens	درصد تغییرات نسبت به آزمون‌های شاهد (%) Change percentage relative to Blanks (%)		
	روکش چوبی Veneer	روکش لیگنین‌زدایی‌شده Delignified Veneer	رزین خالص Pure resin
BE	-73.68	-86.09	79.75
ME	-88.63	-94.68	21.145
PE	-25.57	-38.73	300.75
BPv	-50.91	-74.06	-49.455
MPv	-66.05	-84.106	-45.47
PPv	15.12	-5.23	-6.55

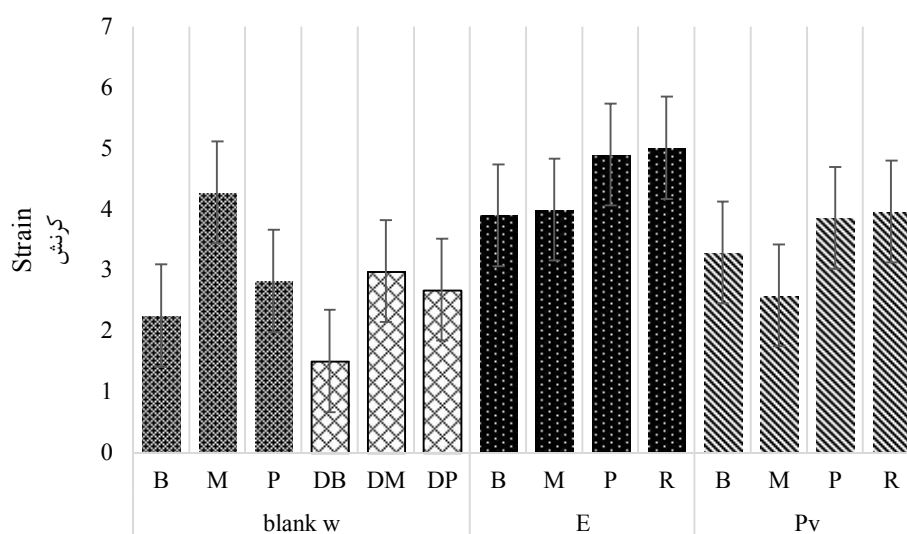
بر اساس نتایج تجزیه واریانس اثرات مستقل و متقابل عوامل بر مقادیر ϵ_{II} آزمون‌ها در سطح ۹۵٪ معنی‌دار نبود. جدول ۵، اثر مستقل هریک از متغیرها را بر ϵ_{II} و گروه‌بندی دانکن آن‌ها را نشان می‌دهد. براساس این جدول، آزمون‌های شاهد روکش چوبی و لیگنین‌زدایی‌شده کم‌ترین مقدار ϵ_{II} را داشتند و آزمون‌های ساخته‌شده با رزین اپوکسی (EETW) بیش‌ترین مقدار را در ETW‌ها به خود اختصاص داده است (شکل ۲). حداکثر ϵ_{II} در روکش چوب صنوبر و حداقل آن در آزمون‌های لیگنین‌زدایی‌شده گونه راش مشاهده شد. آزمون‌های شاهد از ماتریس پلیمری اپوکسی (E) و PVA بیش‌ترین کرنش را داشتند و در گروه‌بندی دانکن بهترین گروه را از نظر تحمل کرنش نهایی به خود اختصاص دادند.

نتایج نشان داد خواص کششی چوب صنوبر تغییرات کم‌تری در ETW به‌دست‌آمده داشته است. کسر حجمی سلولز در چوب یک ویژگی قابل تنظیم است که بر خواص ETW تأثیر می‌گذارد. فو و همکاران (۲۰۱۸) رابطه خطی بین استحکام ETW با کسر حجمی سلولز گزارش کردند (۳۰). گونه‌های چوبی مختلف چگالی، محتوای سلولز، مورفولوژی ساختار سلولی و ساختار حلقه‌های سالانه متفاوتی دارند که همگی بر خواص ساختاری، مکانیکی، عملکردی و نوری ETW تأثیر می‌گذارند (۱۶). مقادیر سلولز صنوبر ۵۰/۴٪ (۳۱)، راش ۴۷/۶۶٪ (۳۲) و افرا ۳۶/۷۰٪ (۳۳) گزارش شده است. نتایج به‌دست آمده تأییدی بر تأثیر مقادیر سلولز بر خواص کششی محصول ساخته‌شده است.

جدول ۵- اثرات مستقل تیمارها بر کرنش نهایی (ϵ_u) و گروه‌بندی دانکن.

Table 5. Independent effects of treatments on ultimate Strain (ϵ_u) and Duncan's group.

آزمونه‌ها Specimens	σ_u (MPa)	گروه‌بندی دانکن Duncan
شاهد Blanks	2.746	b
اپوکسی Epoxy	4.442	a
PVA	3.415	a, b
BOW	3.139	a, b
MOW	3.610	a, b
POW	3.851	a
DLB	1.500	b
DLM	2.979	a, b
DLP	2.669	a, b
ETWs	4.478	a



شکل ۳- اثر متقابل تیمارها بر مقادیر کرنش نهایی (ϵ_u) آزمونه‌ها.

Figure 3. Dependent effects of treatments on ultimate strain (ϵ_u) of specimens.

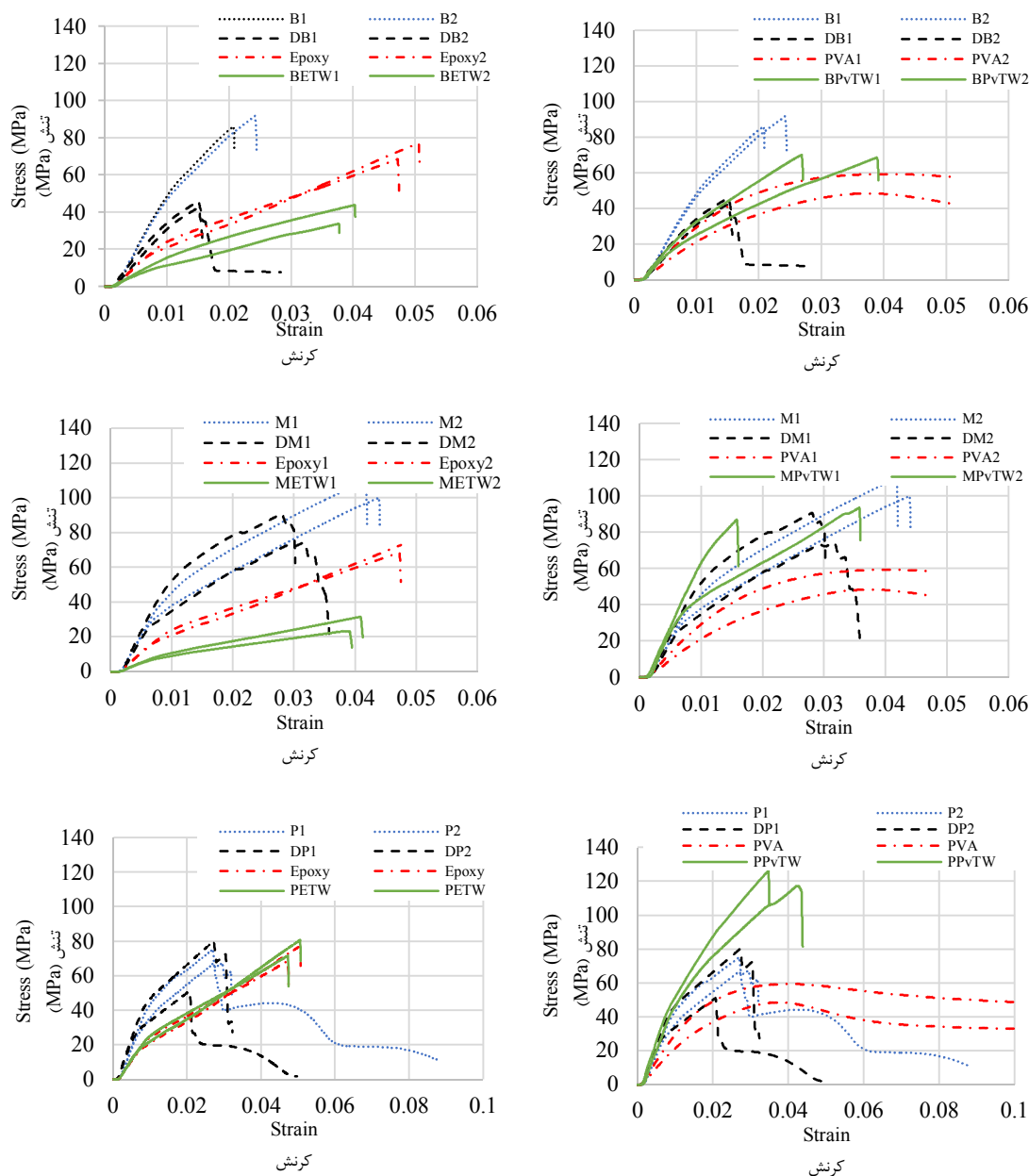
این دو فراورده است. مقادیر تنش و کرنش شکست پلیمر PVA بالاتر از اپوکسی بود.

شکل ۴ نمودارهای تنش کرنش آزمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد، ردیف اول تا سوم به ترتیب مربوط به گونه‌های راش، افرا و صنوبر است.

شکل ۳، اثر متقابل عوامل بر مقادیر ϵ_u را نشان می‌دهد. پس از آزمونه‌های پلیمر خالص، بالاترین ϵ_u در آزمونه‌های PEETW مشاهده شد. ماتریس پلیمری رزین‌های اپوکسی و PVA هر دو مقادیر σ_u کم ولی ϵ_u بسیار بالایی داشتند که نشان‌دهنده رفتار پلاستیک

شکل ۳ تأییدی بر هم‌افزایی بهتر گونه افرا با رزین PVA و صنوبر با هر دو رزین می‌باشد.

همان‌طور که در شکل نیز می‌توان مشاهده نمود بهترین مقاومت در رزین PVA مشاهده شد و آزمون‌های گونه صنوبر خواص مقاومتی بهتری را نشان دادند.



شکل ۴- نمودار تنش کرنش آزمون‌های گونه چوبی راش (ردیف ۱)، گونه چوبی افرا (ردیف ۲) و گونه چوبی صنوبر (ردیف ۳).

Figure 4. Stress- strain diagram of Beech wood (First row), Maple wood (Second row) and Poplar wood (3th row) species.

جدول ۶ دامنه تغییرات ϵ_{II} را با هر سه نمونه شاهد مقایسه کرده است. بالاترین تغییرات کرنش نسبت به روکش‌های چوبی در PEETW با $73/66\%$ و کم‌ترین تغییرات در نمونه‌های چوب افرا ($30/20\%$) مشاهده شد. این تفاوت از محتوای سلولزی دوگانه حاصل می‌شود. حداقل و حداکثر تغییرات ϵ_{II} نسبت به چوب لیگنین‌زدایی‌شده به ترتیب در MPvETW

جدول ۶- دامنه درصد تغییرات کرنش کششی نمونه‌های کامپوزیت چوبی شفاف مهندسی (ETW) نسبت به نمونه‌های شاهد.

Table 6. Range of percentage changes in tension strain of engineered transparent wood (ETW) composite specimens compared to blanks.

ETW Specimens	درصد تغییرات نسبت به نمونه‌های شاهد (%)		
	Change percentage relative to Blanks (%)		
	روکش چوبی Veneer	روکش لیگنین‌زدایی‌شده Delignified Veneer	رزین خالص Pure resin
BE	73.49	159.53	-22.16
ME	-6.58	54.90	-20.28
PE	73.67	83.10	-2.28
BPv	46.17	118.67	-17.07
MPv	-30.20	15.73	-24.68
PPv	36.89	44.32	-2.60

نتایج نشان داد بیش‌ترین مقادیر تنش کششی نهایی در ETW های ساخته‌شده گونه چوبی صنوبر مشاهده شد. رفتار الاستیک چوب و رفتار پلاستیک پلیمرها کم‌ترین هم‌افزایی را در گونه راش داشتند. تغییراتی در ویژگی‌های الاستیک چوب‌های شفاف مشاهده شد. براساس نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر شفافیت مناسب فراورده‌های ساخته‌شده در کنار خواص مکانیکی مناسب، شرایط استفاده این محصول را در قسمت‌هایی از سازه که فراورده شفاف تحت تنش‌های کششی در راستای الیاف می‌باشد، مساعد می‌سازد. پنجره‌ها و نماهای هوشمند در معرض وزش بادهای قوی می‌تواند باعث ایجاد تغییر

شکل و تنش‌های کششی در سطح ماده شود. نصب پنجره در قاب، تغییرات دما (انبساط و انقباض حرارتی متفاوت قاب و ماده)، استفاده از چوب شفاف به‌عنوان یک لایه محافظ روی سطوح منحنی یا انعطاف‌پذیر (مانند صفحات نمایش یا پنل‌های نورپردازی منحنی)، استفاده به‌عنوان بستر ادوات الکترونیکی (مانند سلول‌های خورشیدی، صفحات لمسی) و استفاده از آن در اتصال و سوراخ‌ها ممکن است باعث ایجاد تنش‌های کششی موضعی شود. بررسی مقاومت کششی چوب شفاف تنها به معنای جستجوی یک کاربرد تحت کشش محض نیست، بلکه اقدامی ضروری برای تکمیل رفتار مکانیکی ماده، درک بنیادی رفتار آن، اطمینان از عملکرد قابل‌اعتماد و

سپاسگزاری

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

ایمن محصول در کاربردهای واقعی که در معرض ترکیبی از بارها است (از جمله مؤلفه کششی) می‌باشد. نتایج نشان داد هر دو ماتریس پلیمری نتایج قابل‌قبولی در برابر تنش محوری داشتند و کرنش فرآورده‌ها نیز تأییدی بر این موضوع است.

منابع

1. Wu, J., Wu, Y., Yang, F., Tang, C., Huang, Q., & 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. DOI: 10.1016/j.compositesa.2018.12.004.
2. Montanari, C., Ogawa, Y., Olsen, P., & Berglund, L. A. (2021). High performance, fully bio-based, and optically transparent wood biocomposites. *Advanced Science*. 8, 2100559. DOI:10.1002/advs.202100559.
3. Mi, R., Chen, C., Keplinger, T., Pei, Y., He, S., Liu, D., Li, J., Dai, J., Hitz, E., & Yang, B. (2020). Scalable aesthetic transparent wood for energy efficient buildings. *Nature Communications*. 11, 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41467-20-17513-w>.
4. Jia, C., Chen, C., Mi, R., Li, T., Dai, J., Yang, Z., Pei, Y., He, S., Bian, H., & Jang, S. H. (2019). Clear wood toward high-performance building materials. *ACS Nano*. 13, 9993-10001. DOI:10.1021/acsnano.9b00089.s001.
5. Wang, K., Dong, Y., Ling, Z., Liu, X., Shi, S. Q., & Li, J. (2021). Transparent wood developed by introducing epoxy vitrimers into a delignified wood template. *Composites Science and Technology Journal*. 207, 108690. DOI: 10.1016/j.compscitech.2021.108690.
6. Vasileva, E., Chen, H., Li, Y., Sychugov, I., Yan, M., Berglund, L., & Popov, S. (2018). Light scattering by structurally anisotropic media: a benchmark with transparent wood. *Advanced Optical Materials*, 6, 1800999. DOI: 10.1002/adom.201800999.
7. Li, Y., Fu, Q., Yang, X., & Berglund, L. (2018). Transparent wood for functional and structural applications. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 376, 20170182. DOI:10.1098/rsta.2017.0182.
8. Sheng, X., Zhang, Ch., Pan, N., Shi, R., Jia, H., Zhang, J., Li, N., Shi, H., Wang, B., & Ping, Q. (2024). Multidimensional quantitative analysis of process parameters and performance of lignin-based sustainable transparent wood: Response surface analysis, linear analysis, and life cycle assessment. *ACS Applied Polymer Materials*. 7(17), 301058-301072. DOI:10.1021/acsapm.5c02145.
9. Mi, R., Li, T., Dalgo, D., Chen, C., Kuang, Y., He, S., Zhao, X., Xie, W., Gan, W., & Zhu, J. (2020). A clear, strong, and thermally insulated transparent wood for energy efficient windows. *Advanced Functional Materials*. 30, 1907511. DOI:10.1002/adfm.202001291.
10. Zhang, L., Wang, A., Zhu, T., Chen, Zh., Wu, Y., & Gao, Y. (2020). Transparent wood composites fabricated by impregnation of epoxy resin and W-Doped VO₂ nanoparticles for application in energy-saving windows. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 12(31), 34777-34783.
11. Li, Y., Fu, Q., Yu, S., Yan, M., & Berglund, L. (2016). Optically transparent wood from a nanoporous cellulosic template: combining functional and structural performance. *Biomacromolecular Journal*. 17, 1358-1364.

12. Wang, X., Zhan, T., Liu, Y., Shi, J., Pan, B., Zhang, Y., Cai, L., & Shi, S. Q. (2018). Large-size transparent wood for energy-saving building applications. *ChemSusChem*, 11, 4086-4093.
13. Li, Y., Fu, Q., Rojas, R., Yan, M., Lawoko, M., & Berglund, L. (2017). Lignin-retaining transparent wood. *ChemSusChem*, 10, 3445-3451.
14. Li, T., Zhu, M., Yang, Z., Song, J., Dai, J., Yao, Y., Luo, W., Pastel, G., Yang, B., & Hu, L. (2016). Wood composite as an energy efficient building material: Guided sunlight transmittance and effective thermal insulation. *Advanced Energy Materials*, 6, 1601122.
15. Wu, J., Shi, Y., Wen, X., Zhang, W., Zhao, D., Liu, L., & Duan, J. (2024). Ultraviolet-Shielded Transparent Wood with Improved Interface for Insulating Windows. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 17(2), 3146-3157.
16. Rao, A. N. S., Nagarajappa, G. B., Nair, S., Chathoth, A. M., & Pandey, K. K. (2019). Flexible transparent wood prepared from poplar veneer and polyvinyl alcohol. *Composites Science and Technology*, 182, 107719.
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. Li, Z., Li, L., Li, L., Zhu, J. Y., & Li, Z. (2022). Transparent Wood Developed by a Fast and Scalable Method Using UV-Curable Polyurethane. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 61(18), 6055-6065.
20. Wang, K., Liu, X., Dong, Y., Ling, Z., Cai, Y., Tian, D., Fang, Z., & Li, J. (2022). Editable shape-memory transparent wood based on epoxy-based dynamic covalent polymer with excellent optical and thermal management for smart building materials. *Cellulose*, 29, 7955-7972.
21. Gong, L. X., Pei, Y. B., Han, Q. Y., Zhao, L., Wu, L. B., Jiang, J. X., & Tang, L. C. (2016). Polymer grafted reduced graphene oxide sheets for improving stress transfer in polymer composites. *Composites Science and Technology*, 134, 144-152.
22. Yusof, N. S. M., Dewi, D. E. O., Salih, N. M., Supriyanto, E., Syahrom, A., & Faudzi, A. A. M. (2016). Epoxy resin characterization for imaging phantom: X-ray, textural, and mechanical properties. In: IEEE EMBS conference on biomedical engineering sciences. Pp: 617-622.
23. Jain, N., Singh, V. K., & Chauhan, S. (2017). A review on mechanical and water absorption properties of polyvinyl alcohol-based composites/films. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 26, 213-222.
24. Seghir, R., & Pierron, F. (2018). A novel image-based ultrasonic test to map material mechanical properties at high strain-rates. *Experimental Mechanics*, 58, 183-206. DOI:10.1007/s11340-017-03294.
25. Zhu, M., Li, T., Davis, C. S., Yao, Y., Dai, J., Wang, Y., AlQatari, F., Gilman, J. W., & Hu, L. (2016). Transparent and haze wood composites for highly efficient broadband light management in solar cells. *Nano Energy*, 26, 332-339.
26. Jele, T. B., Andrew, J., John, M., & Sithole, B. (2023). Engineered transparent wood composites: a review. *Cellulose*, 30, 5447-5471.
27. Zhu, M., Song, J., Li, T., Gong, A., Wang, Y., Dai, J., Yao, Y., Luo, W., Henderson, D., & Hu, L. (2016). Highly anisotropic, highly transparent wood composites. *Journal of Advanced Materials*, 28, 5181-5187.
28. Yu, Z., Yao, Y., Yao, J., Zhang, L., Chen, Z., Gao, Y., & Luo, H. (2017). Transparent wood containing Cs x WO₃ Nanoparticles for heat-shielding window applications. *Journal of Materials Chemistry*, 5, 6019-6024.
29. Wang, M., Li, R., Chen, G., Zhou, S., Feng, X., Chen, Y., He, M., Liu, D., Song, T., & Qi, H. (2019). Highly stretchable, transparent, and conductive

- wood fabricated by in situ photopolymerization with polymerizable deep eutectic solvents. *ACS Applied Materials & Interfaces Journal*. 11, 14313-14321.
30. Fu, Q., Yan, M., Jungstedt, E., Yang, X., Li, Y., & Berglund, L. A. (2018). Transparent plywood as a load-bearing and luminescent biocomposite. *Composites Science and Technology*. 164, 296-303.
31. Jin, W., Singh, K., & Zondlo, J. (2013). Pyrolysis Kinetics of Physical Components of Wood and Wood-Polymers Using Isoconversion Method. *Agriculture*. 3, 12-32.
32. Bodîrlău, R., Teacă C. A. و & Spiridon I. (2008). Chemical modification of beech wood: Effect on thermal stability. *BioResources*. 3(3), 789-800.
33. Antczak, A., Michaluszko, A., Klosinska, T., & 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.