Research Article

Iranian Journal of Wood and Paper Industries
Vol. 16, No. 4, Page 591 - 604 (2026)

DOI: 10.22034/ijwp.2025.2067804.1720

Investigation the Physical and Mechanical Properties of Wood-Plastic Composite After Steam Treatment and the Addition of Recycled Polypropylene

Sanaz Parvizi[1*], Habibollah Khademi Eslam[2]

1- Corresponding author, Graduate of Wood and Paper Industry Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran. Email: sanazparvizi@yahoo.com
2- Professor, Department of Wood and Paper Industries, Faculty of Natural Resources and Environment, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

Received: August 2025 Accepted: November 2025

Abstract

Problem definition and objectives: Wood-plastic composites (WPCs) are a suitable alternative for reducing environmental pollution and managing waste due to their utilization of wood and polymeric residues. While the use of raw cellulosic fibers reduces compatibility with non-polar polymer matrices and leads to a decline in mechanical properties due to their polarity and hydroxyl groups, employing modification methods such as thermal treatment (steaming) can address these challenges. This study seeks to utilize steam treatment on poplar wood flour and recycled polypropylene, which is abundantly available in various sources. The primary objective of this research is to improve the physical and mechanical properties of wood-plastic composites, thereby producing a product of acceptable quality for industrial applications by reducing production costs and utilizing waste materials.

Methodology: To this end, Tabriz poplar wood flour was prepared and subjected to steam treatment at 180°C for one hour. For composite fabrication, virgin and recycled polypropylene were used alongside maleic anhydride as a coupling agent. Materials were mixed in an internal mixer based on specific weight ratios (40% wood flour and 60% polymer), and samples were prepared using injection molding. Prior to testing, samples were conditioned under standard environmental conditions (23°C temperature and 50% relative humidity). To determine physical and mechanical characteristics, tests for water absorption, thickness swelling, tensile strength, flexural strength, and impact strength were conducted. Additionally, scanning electron microscopy (SEM), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and X-ray diffraction (XRD) were employed for structural analysis.

Results: Regarding physical properties, the lowest water absorption and thickness swelling were observed in samples containing steamed fibers and virgin polymer. These results indicate the removal of some hemicelluloses and a reduction in hydroxyl groups due to steaming, leading to increased hydrophobicity. In terms of mechanical properties, the highest tensile, flexural, and impact strengths were found in samples made from steamed poplar wood flour and virgin polypropylene. Scanning electron microscopy images demonstrated better distribution and superior adhesion between steamed fibers and the polymer matrix. FTIR results indicated a decrease in the intensity of peaks related to hydroxyl groups and the degradation of hemicelluloses. Although the use of recycled polymer caused a slight decrease in properties, this difference was not statistically significant.

Conclusion: The results showed that steaming reduced water absorption and thickness swelling while enhancing mechanical properties. The most significant finding was the improvement in adhesion between the fiber phase and the polymer due to the removal of hemicelluloses. In addition to improving physical properties, combining steamed wood flour with virgin polypropylene increased mechanical strengths. Furthermore, while the use of recycled polymer was accompanied by a slight decrease in properties, it is of industrial and economic importance due to its environmental benefits and cost reduction, and can serve as a suitable alternative when combined with virgin polymer.

Keywords: Wood-plastic composite, recycled polypropylene, steaming, mechanical properties, scanning electron microscopy

بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی چندسازه چوب پلاستیک پس از بخاردهی و افزودن پلیمر بازیافتی

ساناز پرویزی[۱*]، حبیب الله خادمی اسلام[۲]

۱- نویسنده مسئول، دانش آموخته مهندسی صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه آزاد اسلامی ، واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران. رایانامه: sanazparvizi@yahoo.com
۲- استاد گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران

تاریخ دریافت: شهریور ۱۴۰۴ تاریخ پذیرش: آبان ۱۴۰۴

چکیده

بیان مساله و اهداف: چندسازه‌های چوب‌پلاستیک به دلیل استفاده از ضایعات چوبی و پلیمری، جایگزینی مناسب برای کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و مدیریت پسماند هستند. در حالی که استفاده از الیاف سلولزی خام به دلیل قطبی بودن و وجود گروه‌های هیدروکسیل، باعث کاهش سازگاری با ماتریس‌های پلیمری غیرقطبی و افت خواص مکانیکی می‌شود، بهره‌گیری از روش‌های اصلاحی همچون تیمار حرارتی (بخاردهی) می‌تواند چالش‌های موجود را مرتفع سازد. این تحقیق به دنبال بهره‌گیری از تیمار بخاردهی بر روی آرد چوب صنوبر و استفاده از پلی‌پروپیلن بازیافتی است که در منابع مختلف به وفور یافت می‌شود. هدف اصلی این پژوهش بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی چندسازه‌های چوب‌پلاستیک است، به‌طوری‌که با کاهش هزینه‌های تولید و استفاده از ضایعات، محصولی با کیفیت قابل قبول برای مصارف صنعتی تولید گردد.

مواد و روش‌ها: برای این منظور، آرد چوب صنوبر تبریزی تهیه و تحت تیمار بخاردهی در دمای ۱۸۰ درجه سانتیگراد به مدت یک ساعت قرار گرفت. برای ساخت کامپوزیت، از پلی‌پروپیلن بکر و بازیافتی به همراه مالئیک انیدریک به عنوان عامل سازگارکننده استفاده شد. مواد بر اساس نسبت وزنی مشخص (۴۰ درصد آرد چوب و ۶۰ درصد پلیمر) در دستگاه مخلوط‌کن داخلی ترکیب و نمونه‌ها با استفاده از قالب‌گیری تزریقی ساخته شدند. قبل از انجام آزمون‌ها، نمونه‌ها در شرایط محیطی استاندارد (دمای ۲۳ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۵۰ درصد) قرار گرفتند. برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی، آزمون‌های جذب آب، واکشیدگی ضخامت، کشش، خمش و ضربه و برای بررسی ساختاری، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، طیف‌سنجی مادون قرمز (FTIR) و پراش اشعه ایکس (XRD) استفاده شد.

نتایج: در مورد خواص فیزیکی، کمترین میزان جذب آب و واکشیدگی ضخامت مربوط به نمونه‌های حاوی الیاف بخاردهی شده و پلیمر بکر بود. این نتایج نشان‌دهنده حذف بخشی از همی‌سلولزها و کاهش گروه‌های هیدروکسیل در اثر بخاردهی است که منجر به افزایش آب‌گریزی شده است. از نظر خواص مکانیکی، بالاترین مقاومت‌های کششی، خمشی و ضربه‌ای در نمونه‌های ساخته شده از آرد چوب بخاردهی شده و پلی‌پروپیلن بکر مشاهده شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان‌دهنده توزیع بهتر و همپوشانی مناسب‌تر بین الیاف بخاردهی شده و ماتریس پلیمری بود. نتایج FTIR حاکی از کاهش شدت پیک‌های مربوط به گروه‌های هیدروکسیل و تخریب همی‌سلولزها بود. در حالی که استفاده از پلیمر بازیافتی باعث کاهش اندک خواص شد، اما این اختلاف از نظر آماری معنی‌دار نبود.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که بخاردهی باعث کاهش جذب آب و واکشیدگی ضخامت و افزایش خواص مکانیکی گردید. مهم‌ترین یافته، بهبود چسبندگی بین فاز الیاف و پلیمر در اثر حذف همی‌سلولزها بود. علاوه بر بهبود خواص فیزیکی، ترکیب آرد چوب بخاردهی شده با پلی‌پروپیلن بکر باعث افزایش مقاومت‌های مکانیکی شد. همچنین استفاده از پلیمر بازیافتی اگرچه کمی کاهش خواص را به همراه داشت، اما به دلیل مزایای زیست‌محیطی و کاهش هزینه‌ها، به لحاظ صنعتی و اقتصادی حائز اهمیت است و می‌تواند به عنوان جایگزینی مناسب در ترکیب با پلیمر بکر مورد استفاده قرار گیرد.

واژه های کلیدی: کامپوزیت چوب-پلاستیک، پلی‌پروپیلن بازیافتی، بخاردهی، خواص مکانیکی، میکروسکوپ الکترونی روبشی

مقدمه

در چند دهه اخیر استفاده ناآگاهانه از منابع زیست محیطی، جهان را به یک بحران اساسی و ناخواسته کشانده است. در این وضعیت دانش و فناوری جوامع مختلف در جهت مهار کردن صدمات وارده به محیط زیست و جلوگیری از به اوج رسیدن این مشکلات زیست محیطی می‌باشد [۱]. یکی از موادی که اهمیت بسزایی درکاهش ضایعات چوبی و پلاستیکی داشته است، چند-سازه چوب‌پلاستیک می‌باشد. چندسازه چوب‌پلاستیک که توسط فرآیندهای تولید مواد پلاستیکی تولید می‌شود، ظاهری شبیه به چوب دارد. این دسته از چندسازه‌های زمینه پلیمری توانسته است تحول بزرگی را در زمینه کاهش آلودگی محیط زیست به وجود آورد [۲].

چوب به عنوان ماده پرکننده، دارای ویژگی‌هایی همچون قیمت مناسب، تجزیه و تجدیدپذیری، دسترسی آسان، زیست تخریب‌پذیری، مقاومت بالا در برابر سایش، مقاومت به خراش، ضریب انبساط حرارتی کم، استحکام و خصوصیات مکانیکی بالا می‌باشد. خرده چوب‌هایی که به عنوان دورریز تولید می‌شوند می‌توانند انتخاب مناسبی به عنوان فاز تقویت کننده باشند. کارآمدی این دورریزها موجب پیشرفت روند دوستی با محیط زیست نیز گردیده است. با اصلاح و بهبود خواص چوب می‌توان بافت سلولزی آن را تقویت کرد تا تاثیرپذیری آن از عوامل جوی به حداقل برسد [۳].

زباله‌های حاوی پلاستیک، باعث آلودگی قابل توجه محیط زیست می‌شوند زیرا برای مدت طولانی بدون تجزیه در طبیعت باقی می‌مانند. در سال‌های اخیر، گام-های مهمی برای حذف اثرات زیست محیطی زباله‌های جامد برداشته شده است. هدف، کاهش این زباله‌ها با استفاده از آنها برای تولید محصولات چندسازه جدید است [۴]

هر ساله مقدار زیادی پسماند پلیمری از صنعت، کشاورزی، زندگی شهرنشینی و صنعت ساختمان تولید می‌شود. حل مشکل این پسماندها هنوز یک مشکل جدی است. روش‌های سنتی مانند سوزاندن یا دفن کردن پسماندها، اثرات منفی به محیط زیست تحمیل می‌کند که شامل آسیب به ترکیب خاک، آزاد شدن گازهای سمی به هوا و آلودگی آب‌ها و منابع زیرزمینی می‌شود. فرآیند بازیابی، بهترین روش برای مدیریت پسماندهای پلیمری است اما در این روش نیز بعد از چندین بار فرآیند بازیابی، ساختار مولکولی پلیمر دست خوش تغییرات جدی شده و خواص مکانیکی و فیزیکی آن نسبت به پلیمر بکر، دچار تغییر می‌شود. از این‌رو به نظر می‌رسد بهینه‌ترین راه برای بازیابی مواد پلاستیکی و غلبه بر محدودیت‌های نام برده شده، مخلوط کردن آن با مواد پلیمری بکر و دیگر مواد و یا توسعه مواد مرکب است [۵].

صنعت بازیافت در سال‌های اخیر به سرعت توسعه یافته است. کاغذ، پلاستیک، شیشه و فلزات بیشترین مواد بازیافتی هستند [۶]. با توجه به افزایش آگاهی مصرف-کنندگان چوب‌پلاستیک در زمینه اکولوژیکی، توجه به استفاده از پلیمر بازیافتی زیاد شده است [۷]. به‌طورکلی ترکیب پلیمرها با الیاف یا ذرات بدست آمده از طبیعت را به عنوان چندسازه‌های چوب‌پلاستیک می‌شناسند. در طی سال‌های اخیر توجه به استفاده از چوب و مواد لیگنوسلولزی به عنوان پرکننده در پلاستیک‌ها دچار فراز و فرودهای بسیاری شده است. چوب پلاستیک‌ها چند-سازه‌هایی با پایداری مناسب در شرایط محیطی هستند و استفاده از آنها به دلیل برخورداری از خواص مناسب از جمله مقاومت به رطوبت، دوام بالا در برابر عوامل جوی و مخرب، مقاومت خمشی بالا، قابلیت تولید در ابعاد مختلف، امکان قالب‌گیری و شکل‌پذیری آسان و غیره در حال افزایش است. در عین حال شباهت ظاهری به محصولات چوبی، کاربردهای زیادی دارند. مهم‌ترین ویژگی برجسته چندسازه‌های چوب پلاستیک پایداری آن‌ها در برابر شرایط محیطی مختلف است. این محصولات به دلیل استفاده از ماتریس پلیمری قابلیت این را دارند که تقریبا در تمام شرایط بیولوژیکی ماندگاری مناسبی از خود نشان دهند. این ویژگی آن‌ها را به عنوان جایگزین مناسب برای قطعات چوب قرار داده است. این ویژگی در اکثر موارد به عنوان مزیت محسوب می‌شود اما از نقطه

نظر زیست‌محیطی پایداری بعضی محصولات در طبیعت یک تهدید شمرده می‌شود. چندسازه‌های چوب پلاستیک به۲دلیل خواص بهبود یافته و همچنین از لحاظ مدیریت انرژی حرارتی، در مقایسه با ترکیبات دیگر، بیشتر در قسمت‌های داخلی ساختمان استفاده می‌شوند [۸]. Dairi و همکاران (۲۰۱۷) خواص مورفولوژی و فیزیکی چند-سازه‌های ساخته شده با ترکیبات پلی‌پروپیلن تقویت شده با آرد چوب و پلی‌اتیلن ترفتالات بازیافت شده را بررسی کردند و مشاهده کردند سازگار کننده باعث بهبود قابل توجه مقاومت‌کششی، مقاومت‌خمشی، مدول‌کششی، مدول‌خمشی و مقاومت در جذب آب ماده مرکب می‌شود [۹]. Bouhamed و همکاران (۲۰۲۰) به ارزیابی ویژگی های مکانیکی به عنوان ابزاری برای بررسی ترکیبات چوب و پلیمر به ویژه آرد چوب زیتون پرداختند. آن‌ها دریافتند که افزایش محتوایی مقدار الیاف و اتصال‌دهنده، سفتی چندسازه را به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد [۱۰]. در پژوهشی که در سال ۲۰۱۷ انجام شد، چندسازه چوب‌پلاستیک با استفاده از ضایعات پلی‌اتیلن با چگالی کم و چوب بازیافتی به روش اکستروژن و قالب گیری تزریقی تهیه شد و مشخص شد که چندسازه‌های پلیمری از ترموپلاستیک بازیافتی با الیاف طبیعی، جایگزین مناسبی است که به حفظ منابع طبیعی، کاهش ضایعات آلاینده و تولید مواد کم هزینه کمک می‌کند. با تصاویر میکروسکوب الکترونی روبشی، تعامل مناسب بین ماتریس زمینه و تقویت کننده، باعث افزایش مدول یانگ شد [۱۱]. Li و همکاران (۲۰۱۴) تأثیر استفاده از زغال بامبو در چندسازه‌های چوب پلاستیک زمینه پلی‌اتیلن با چگالی کم به همراه روان کننده و آرد چوب را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها علاوه بر بهبود خواص مکانیکی همانند خواص خمشی و کششی و فیزیکی همانند آبگریزی، نشان دادند که خواص حرارتی نیز بهبود یافته و چندسازه در دماهای پایین تخریب نمی‌شود. افزودن درصدهای بالاتر از آرد چوب باعث کاهش پایداری حرارتی چوب پلاستیک می‌گردد [۱۲]. الیاف طبیعی، مانند آرد چوب و سایر مواد لیگنوسلولزی، معمولاً دارای گروه‌های هیدروکسیل قطبی روی سطوح خود هستند که تشکیل یک فاز میانی قوی با یک ماتریس غیرقطبی را هنگام ترکیب با یک ماده ترموست یا ترموپلاستیک، چالش برانگیز می‌کند. این امر منجر به برهم کنش ضعیف بین سطحی بین اجزا می‌شود که منجر به کاهش خواص مکانیکی، فیزیکی و حرارتی در چندسازه‌های چوب-پلاستیک می‌شود. رویکردهای مختلفی را می‌توان برای بهبود چسبندگی بین سطحی اعمال کرد، مانند پیش تیمار حرارتی آرد چوب، تقویت با پرکننده‌های معدنی و نانوافزودنی‌ها و افزودن سازگارکننده‌ها [۱۳]. حذف بیشتر همی‌سلولزها و مقدار کمی لیگنین در طول بخاردهی تراشه‌های چوب صنوبر منجر به افزایش اندازه متوسط منافذ و مساحت سطح ویژه تراشه‌های چوب هیدرولیز شده شد، در نتیجه دیواره سلولی را برای مایع قابل دسترس‌تر کرده و انتشار ماده محلول را بهبود بخشید. به طور خاص، حذف همی‌سلولزها و لیگنین منجر به افزایش دسترسی به سلولز شد، بنابراین واکنش‌پذیری سلولز افزایش یافت [۱۴]. عامل سازگاردهنده انیدریدمالئیک با گروه‌های هیدروکسیل اجزای چوب پیوند تشکیل می‌دهد و چسبندگی را در چندسازه چوب پلاستیک بهبود می-دهد [۱۵]. برندسازی محصولات نوآورانه چوب‌پلاستیک‌ها یک چالش است زیرا چوب‌پلاستیک ها به سختی از نظر بصری از پلاستیک خالص قابل تشخیص هستند و مصرف‌کنندگان فقط می‌توانند پتانسیل پایداری را از روی نام قضاوت کنند [۱۶]. در این مطالعه، به دلیل بهبود خواص آرد چوب با تیمار حرارتی به بررسی تولید و بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی چندسازه پرداخته شد و به‌دلیل کاهش هزینه‌های تولید و نگرانی‌های زیست محیطی ناشی از پسماندهای تجزیه‌پذیر، از پلیمر بازیافتی استفاده شد.

مواد و روش‌ها

تهیه و آماده سازی مواد

پلی پروپیلن (PP) با شاخص جریان مذاب $8^{gr/10min}$ و چگالی $۹۱۰^{\frac{kg}{m3}}$، به عنوان ماده زمینه پلیمری از شرکت Hyundai Petrocdemical Co. تهیه شد. به‌دلیل‌اینکه در کشور ایران هنوز مواد زائد شهری با برنامه مدون از هم تفکیک نمی‌شوند و به‌دلیل عدم آگاهی فروشندگان ظروف یکبار مصرف درباره مواد تشکیل دهنده ظروف، و امکان وجود ناخالصی در آن، و به‌منظور جلوگیری از هر گونه خطا و دقت عمل بالا، تصمیم گرفته شد پلی‌پروپیلن بازیافتی به روش آزمایشگاهی در

پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران و با استفاده از دستگاه اکسترودر، با دو بار اکسترود با شاخص جریان مذاب $۱۰ gr/10min$ و چگالی $۹۱۰ \frac{kg}{m^3}$، تهیه گردد. آرد چوب مورد استفاده در این تحقیق از گونه صنوبر تبریزی بوده که پس از استحصال از جنگل آموزشی دانشگاه تهران و تبدیل به اندازه مناسب مورد استفاده قرار گرفت. عامل سازگارکننده مورد استفاده در این تحقیق مالئیک انیدریک پیوند شده با پلی پروپیلن و با نام تجاری Solvay به میزان ۳ درصد انتخاب گردید. چیپس حاصل از کناره-بری صنوبر در ابتدا بوسیله دستگاه آسیاب آزمایشگاهی به ابعاد کوچکتر تبدیل و بوسیله الک آزمایشگاهی به منظور دستیابی به اندازه یکنواخت الیاف مش بندی شد. الیاف باقیمانده برروی مش ۴۰ در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. سپس الیاف بدست آمده در یک خشک‌کن دارای جریان هوا به مدت ۲۴ ساعت و در دمایی حدود ۶۵ درجه سانتیگراد قرار گرفتند تا رطوبت اضافی از آن‌ها خارج شود و مقدار رطوبت آن‌ها به زیر نیم درصد وزنی برسد.

روش‌ها

بخاردهی‌آرد چوب با رطوبت نسبی ۵۰ درصد، جهت تیمار و اصلاح خواص الیاف در آزمایشگاه علوم و صنایع چوب و کاغذ پردیس منابع طبیعی دانشگاه تهران، توسط دستگاه بخاردهی به مدت یک ساعت و در دمای ۱۸۰ درجه سانتیگراد و تحت فشار ۷۰۰ کیلو پاسکال انجام شد. فرایند اختلاط در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران و با استفاده از دستگاه مخلوط‌کن داخلی دو ماردون و همسوگرد، انجام شد و نمونه‌ها با استفاده از قالب‌گیری تزریقی تهیه شدند.

جذب آب و واکشیدگی ضخامت در ۲۴ ساعت غوطه-وری، مطابق استاندارد ASTM D 703 اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری وزن نمونه‌ها از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم و برای اندازه‌گیری ضخامت آن‌ها از میکرومتر (ریزسنج) با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر استفاده شد.

آزمون کشش مطابق با آیین نامه D 638M-89 استاندارد ASTM بر روی نمونه‌ها و به منظور تعیین مقاومت و مدول الاستیسیته آن‌ها انجام گردید. نوع M-I نمونه دمبلی شکل انتخاب و آزمون کشش به وسیله دستگاه آزمون کشش مدل Instron 4486 مجهز به سیستم جمع‌آوری کامپیوتری اطلاعات و ظرفیت سلول بار ۱۰۰ نیوتن بر روی نمونه‌ها انجام گردید. با نصب کرنش‌سنج و تعیین سرعت بارگذاری ۵ میلیمتر بر دقیقه، تنظیم و سه نمونه از هر ترکیب مورد آزمون قرار گرفتند.

آزمون خمش مطابق با آیین نامه D 790 استاندارد ASTM و به روش سه نقطه بر روی نمونه‌ها به منظور تعیین مقاومت و مدول الاستیسیته آن‌ها انجام گردید. نمونه مورد آزمون به شکل مکعب مستطیل با سطح مقطع ۱۳ در ۵ میلیمتر انتخاب و آزمون‌خمش به‌وسیله دستگاه آزمون خمش مدل Instron 4486 مجهز به سیستم جمع آوری کامپیوتری اطلاعات و ظرفیت سلول بار ۱۰۰ نیوتن بر روی نمونه‌ها انجام گردید. فاصله دو تکیه‌گاه ۱۰۰ میلیمتر و سرعت بارگذاری ۵ میلیمتر بر دقیقه انتخاب شد و سه نمونه از هر ترکیب مورد آزمون قرار گرفتند.

آزمون مقاومت به ضربه فاقدار با استفاده از آیین نامه D 256 استاندارد ASTM و بوسیله دستگاه آزمون ضربه دیجیتالی از نوع پاندولی و مدل SANTAM 11 J انجام شد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS در قالب طرح کاملا تصادفی انجام شد و در نهایت مقایسه و گروه‌بندی به کمک آزمون دانکن در سطح اطمینان ۹۵ درصد انجام شد.

پیش از انجام هرگونه آزمونی، همه نمونه ها بر طبق استاندارد، به مدت حداقل ۴۰ ساعت در اتاقی با دمای ۲۳ درجه و رطوبت نسبی ۵۰ درصد قرار داده شد تا رطوبت و دمای محیط به تعادل برسد. ازپلیمر به‌دلیل پایداری حرارتی مناسب و رفتار رئولوژیکی مطلوب به‌مقدار ۵۷ درصد و به‌منظور سازگاری آن با فاز قطبی چوب، از مالئیک انیدرید به‌عنوان عامل سازگارکننده به میزان ۳ درصد استفاده شد.

جدول ۱ - اجزای تشکیل دهنده ترکیبات مختلف

تیمار	الیاف صنوبر (٪)	الیاف صنوبر بخاردهی شده (٪)	پلی پروپیلن (٪)	مالئیک انیدریک (٪)	پلی پروپیلن بازیافتی (٪)

۱	۴۰	۰	۵۷	۳	۰
۲	۰	۴۰	۵۷	۳	۰
۳	۴۰	۰	۰	۳	۵۷
۴	۰	۴۰	۰	۳	۵۷

جذب آب و واکشیدگی ضخامت

جدول ۲، مقادیر متوسط و انحراف معیار جذب آب و واکشیدگی ضخامت اندازه‌گیری شده در ۲۴ ساعت برای هر ترکیب را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود بالاترین مقدار جذب آب و واکشیدگی ضخامت در چند-سازه‌های حاوی الیاف بخاردهی نشده و پلیمر بازیافتی و کمترین آن در چندسازه‌های حاوی الیاف بخاردهی شده و پلیمر بکر دیده می‌شود. (مقادیر انحراف معیار هر تیمار در داخل پرانتز ذکر شده است)

جدول ۲ - میانگین جذب آب و واکشیدگی ضخامت در ۲۴ ساعت (تیمار ۱، ۲، ۳، ۴)

تیمار	میانگین جذب آب (٪)	میانگین واکشیدگی ضخامت
۱	۱/۰۵ (۰/۵۵)	۰/۹۷۴ (۰/۱۵۰)
۲	۰/۸۵ (۰/۵)	۰/۷۹ (۰/۱۲)
۳	۱/۴۸ (۱/۶۴)	۱/۱۵ (۰/۲۸)
۴	۱/۱۲ (۱/۵۸)	۱/۰۶ (۰/۳۷)

جدول ۳، تاثیر مستقل بخاردهی را بر جذب آب و واکشیدگی ضخامت در سطح اطمینان ۹۵٪، در ترکیبات ۱ و ۲، تاثیر مستقل پلیمر بازیافتی بر جذب آب و واکشیدگی ضخامت در ترکیبات ۱ و ۳ در سطح اطمینان ۹۵٪ و همین‌طور تاثیر متقابل بخاردهی و پلیمر بازیافتی در سطح اطمینان ۹۵٪ در ترکیبات ۱، ۲، ۳ و ۴ نشان می‌دهد. بین ترکیب شماره یک و دو یعنی تاثیر بخاردهی در جذب آب و واکشیدگی ضخامت، معنی‌دار است. بین ترکیب شماره یک و سه یعنی تاثیر مستقل پلیمر بازیافتی در جذب آب و واکشیدگی ضخامت معنی‌دار نیست. بین هر چهار ترکیب تاثیر کلی معنی‌دار است.

جدول ۳ - تجزیه واریانس تاثیر مستقل بخاردهی، تاثیر مستقل پلیمر بازیافتی و تاثیر متقابل بخاردهی و پلیمر یازیافتی بر جذب آب و واکشیدگی ضخامت، در ۲۴ ساعت غوطه‌وری

منابع تغییر	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	Sig(۰/۰۵)
بخاردهی بر جذب آب	۱/۲۵	۲	۰/۸۰۷	۰/۰۴۷*
بخاردهی بر واکشیدگی ضخامت	۰/۱۷	۲	۰/۰۷۸	۰/۰۰۷*
پلیمر بازیافتی بر جذب آب	۱/۰۸۱	۲	۰/۵۴	۰/۸۲۶ns
پلیمر بازیافتی بر واکشیدگی ضخامت	۰/۱۵۴۹	۲	۰/۱۳	۰/۰۹۵ns
بخاردهی و پلیمر بازیافتی بر جذب آب	۰/۱۱۴	۴	۰/۰۲۹	۰/۰۰۵*
بخاردهی و پلیمر بازیافتی بر واکشیدگی ضخامت	۰/۰۳۲	۴	۰/۰۰۸	۰/۰۰۱۷*

*معنی‌دار در سطح ۹۵درصد ns عدم معنی‌دار

اندازه‌گیری خواص مکانیکی

از میان همه خواص چوب-پلاستیک، خواص مکانیکی از مهمترین خواص محسوب می‌شود. به‌طوری‌که انتخاب ماده در کاربردهای گوناگون کاملا بر پایه خواص مکانیکی مثل مقاومت کششی، مقاومت خمشی و مقاومت به ضربه آن می‌باشد

جدول ۴، مقادیر متوسط و انحراف معیار مدول

کششی، مقاومت کششی، مدول خمشی، مقاومت خمشی، مقاومت به ضربه اندازه‌گیری شده برای هر ترکیب را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود بالاترین خواص مکانیکی در چندسازه‌های حاوی الیاف بخاردهی شده و پلیمر بکر، و کم‌ترین آن در چندسازه‌های حاوی الیاف بخاردهی نشده وپلیمر بازیافتی دیده می‌شود. (مقادیر مربوط به انحراف معیار داخل پرانتز ذکر شده است)

جدول ۴ - میانگین مقاومت کششی، مقاومت خمشی، مقاومت به ضربه در ترکیبات مختلف

تیمار	مقاومت کششی (مگا پاسکال)	مقاومت خمشی (مگا پاسکال)	مقاومت به ضربه (ژول بر متر)
۱	۳۶/۴۹ (۰/۶۴۰۹)	۴۶/۶۲(۰/۴۵۱۳)	۷۰ (۰/۰۱)
۲	۴۰/۵۷(۰/۷۹۱۰)	۴۸/۲۴(۰/۹۰۳۵)	۷۳/۷۵ (۰/۰۲۶)
۳	۳۵/۰۲(۰/۷۴۵۰)	۴۳/۸۵(۰/۷۲۰۲)	۵۸/۷۵ (۰/۰۲)
۴	۳۵/۹۲(۰/۷۵۵۰)	۴۶/۱۸(۱/۳۵۰۹)	۶۰ (۰/۰۰۵)

در جدول۵، تاثیر مستقل بخاردهی بر مقاومت کششی، مقاومت خمشی، مقاومت به ضربه در سطح اطمینان ۹۵٪، در ترکیبات ۱، ۲ معنی‌دار است.

تاثیر مستقل پلیمر بازیافتی بر مقاومت کششی، مقاومت خمشی، مقاومت به ضربه در سطح اطمینان ۹۵٪ در ترکیبات ۱و ۳ معنی‌دار نیست. تاثیر متقابل بخاردهی و پلیمر بازیافتی بر مقاومت کششی، مقاومت خمشی، مقاومت به ضربه در سطح اطمینان ۹۵٪ اختلاف معنی-داری را نشان نمی‌دهد.

در تحقیقی که توسط Luisa و همکاران انجام شد متوجه شدند که خواص مکانیکی در چندسازه‌های چوب پلاستیک حاوی پلیمر بازیافتی تفاوت زیادی با چندسازه-های پلیمر بکر ندارد [۱۷].

جدول ۵- تجزیه واریانس تاثیر مستقل بخاردهی، تاثیر مستقل پلیمر بازیافتی و تاثیر متقابل بخاردهی و پلیمر یازیافتی بر مقاومت کششی، مقاومت خمشی و مقاومت به ضربه

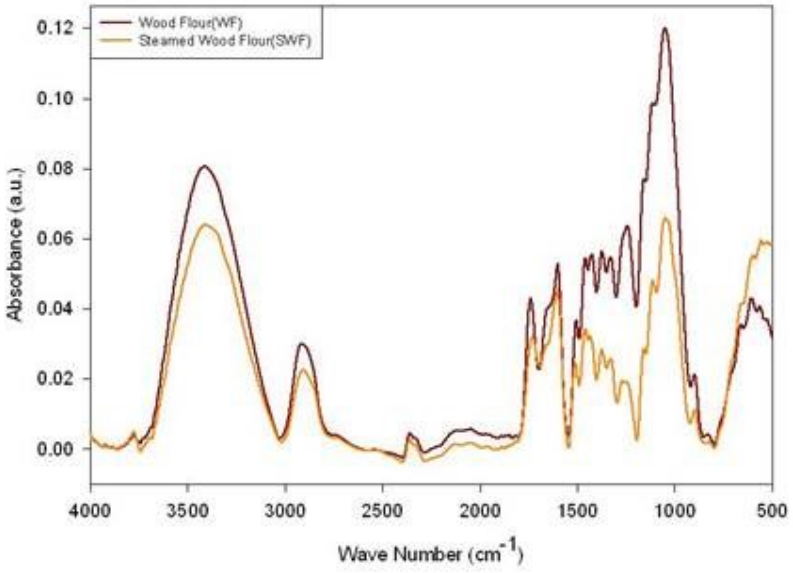
منبع تغییر	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	Sig(۰/۰۵)
اثر مستقل بخاردهی در مقاومت کششی	۲۴/۶۱۴۲	۲	۱۲/۰۷۱	۰/۰۱۱*
اثر مستقل پلیمر بازیافتی در مقاومت کششی	۳۲/۰۵۱	۲	۱۶/۰۲۶	۰/۴ns
اثر متقابل بخاردهی و پلیمر بازیافتی در مقاومت کششی	۹/۳۶۰	۴	۲/۳۴۰	۰/۳۶۹ns
اثر مستقل بخاردهی در مقاومت خمشی	۱۳/۳۶۹۲	۲	۶/۵۷۱	۰/۰۵۱ns
اثر مستقل پلیمر بازیافتی در مقاومت خمشی	۳۰/۳۴۱	۲	۱۵/۱۷۱	۰/۳ns
اثر متقابل بخاردهی و پلیمر بازیافتی در مقاومت خمشی	۱/۲۷۷	۴	۰/۳۱۹	۰/۹۵ns
اثر مستقل بخاردهی در مقاومت به ضربه	۰/۰۰۰۴	۲	۰/۰۰۲	۰/۰۳۱*
اثر مستقل پلیمر بازیافتی در مقاومت به ضربه	۰/۰۴۱	۲	۰/۰۲۱	۰/۱ns
اثر متقابل بخاردهی و پلیمر بازیافتی در مقاومت به ضربه	۰/۰۰۶	۴	۰/۰۰۰	۰/۹۰۶ns

*معنی‌دار در سطح ۹۵درصد ns عدم معنی‌دار

طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR)

طیف FTIR یک روش سریع و غیر مخرب برای شناسایی موادی مثل گروه‌های OH، بنزیل، آریل و آکلیل و سایر گروه‌ها و مناسب‌ترین روش مطالعه ساختار اتمی است. شکل زیر طیف جذب در الیاف بخاردهی شده و نشده آرد چوب صنوبر را در دامنه ۴۰۰ تا ۴۰۰۰ (cm-1) نشان می‌دهد. در این طیف دو محدوده عمده قابل شناسایی است. محدوده ۱۴۰۰-۶۰۰ (cm-1) به‌دلیل کمتر بودن میزان انرژی جذب شده و ارتعاش خمشی اکثر پیوندهای موجود در مولکول، ناحیه‌ای پیچیده و شلوغ است و به این ناحیه، ناحیه اثر انگشت می‌گویند و تشخیص همه باندهای جذب در این ناحیه مشکل است. محدوده ۴۰۰۰-۱۴۵۰ (cm-1) به‌دلیل بالاتر بودن میزان

انرژی جذب شده که ناشی از ارتعاش کششی پیوندهای قوی‌تر است به ناحیه فرکانس گروهی معروف است.



شکل ۱- طیف FTIR مربوط به آرد چوب بخاردهی شده و نشده

پیک‌های طیف FTIR قابل تفسیرتر هستند و در نتیجه تجزیه و تحلیل کیفی آسان‌تر می‌شود [۱۸]. ذرات چوب به خوبی در ماتریس پلیمری توزیع شده‌اند که نشان دهنده برهم کنش مناسب چوب و پلیمر است. طیف جذبی در الیاف بخاردهی شده و بخاردهی نشده آرد چوب صنوبر در محدوده ۵۰۰ تا ۴۰۰۰ (cm-1) نشان داده شده است [۱۹].

به‌دلیل ماهیت پیچیده چوب و تعداد زیاد واکنش‌های شیمیایی که در طول عملیات حرارتی در اجزای مستقل چوب (سلولز، همی‌سلولز و لیگنین) رخ داده است، مقایسه مستقیم داده‌های طیفی آسان نیست. هدف از هیدروترمولیز، تجزیه بخشی از همی‌سلولز بدون تأثیر بر سلولز است. همی‌سلولز ناپایدارترین ماده پلیمری چوب است. بخاردهی الیاف منجر به جدا شدن گروه‌های استیل همی‌سلولز و تشکیل اسید می‌شود. اسیدهای تشکیل شده به عنوان کاتالیزور عمل کرده و باعث آبکافت همی‌سلولز از راه شکستن پیوندهای گلیکوزیدی در همی‌سلولز می‌شوند. از طرف دیگر چون گروه‌های هیدروکسیل همی‌سلولز در دسترس است پایداری گرمایی کمتری دارد و اولین ماده-ای است که در اثر گرما تجزیه می‌شود. جزء اصلی جداسازی چوب صنوبر (بخاردهی شده) ۴-O-متیلاسیون اسید گلوکورونیک است. باند جذب در پیک ۳۴۱۵ (cm-1) مربوط به ارتعاشات کششی گروه هیدروکسیل است (این ناحیه به دلیل پیوندهای هیدروژنی پهن است). ترکیبات OH ممکن است شامل آب جذب شده، الکل‌های آلیفاتیک نوع اول و دوم موجود در سلولز، لیگنین و مواد استخراجی باشند.

بین طیف‌های FTIR آرد چوب بخاردهی شده و بخاردهی نشده تفاوتی وجود داشت که به دلیل بخارپز شدن رخ داد. تغییرات مشابهی در مورفولوژی و ویژگی‌های سطحی چوب پلاستیک‌ها مشاهده شد که ناشی از افزایش درصد آرد چوب به ماتریس پلیمری بود[۲۰].

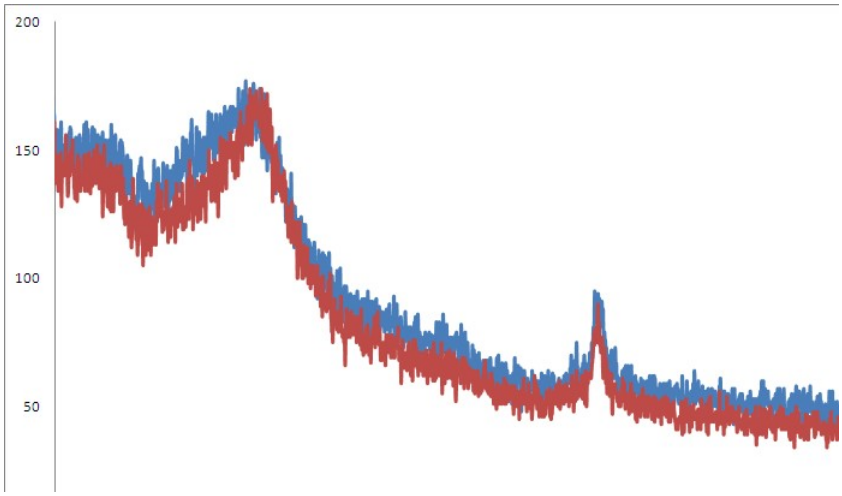
همان‌طور که ملاحظه می‌شود تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین طیف‌های FTIR در آرد چوب بخاردهی شده و نشده مشاهده می‌شود که به‌دلیل انجام عمل بخاردهی رخ داده است.

آزمون پراش اشعه ایکس (XRD)

ترکیبات الیاف چوبی بخاردهی شده و نشده بوسیله تکنیک پراکنش اشعه ایکس مورد بررسی قرار گرفت. تغییرات دیاگرام اشعه ایکس الیاف در ۵/۲۲ = ۲θ درجه

سانتیگراد مربوط به سلولز می‌باشد. تیمارهای الیاف بخاردهی شده و نشده تقریبا مشابه اند، در واقع بخاردهی تاثیر بر بلورینگی گذاشته ولی تغییرات بسیار جزئی دارند و این نشان می‌دهد که تیمار بخاردهی اثر چندان زیادی روی ساختار کریستالین یا بلورین سلولز نداشته است.

به جهت پردازش بهتر ویژگی‌های ذرات و خواص ساختاری چندسازه چوب پلاستیک، نیاز به تکنیک‌های تصویربرداری سه بعدی و توموگرافی ریز کامپیوتری اشعه ایکس است و ابزارهای ارزشمند ساختاری محسوب می‌شوند [۲۱].

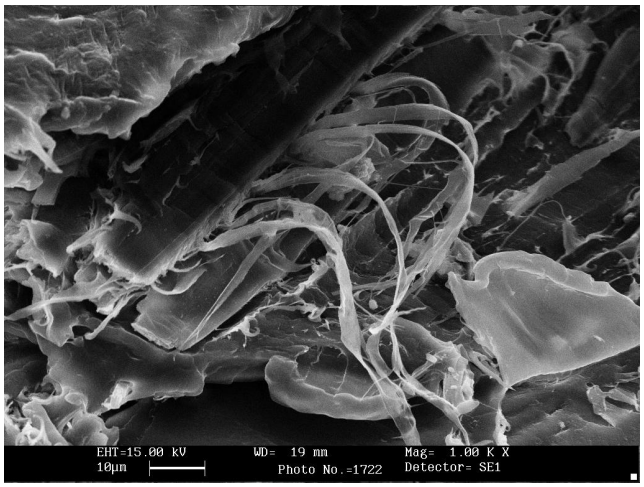


شکل ۲- طیف XRD در آرد چوب بخاردهی شده و نشده با درجه بین ۱۵ تا۵۰ درجه

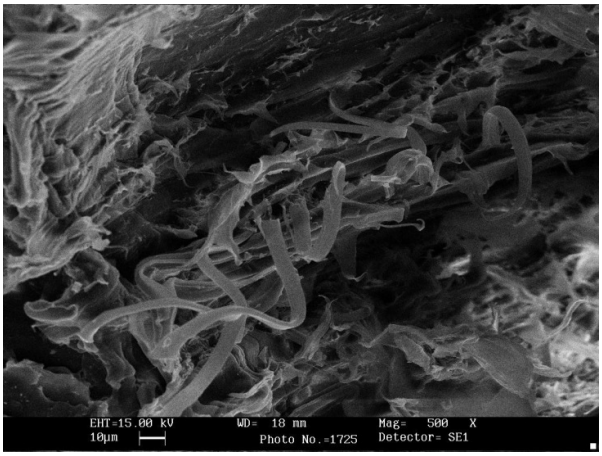
میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

با استفاده از تصاویر بدست آمده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، می‌توان سازگاری بین الیاف تقویت شده و ماتریس پلیمری را مشاهده کرد.

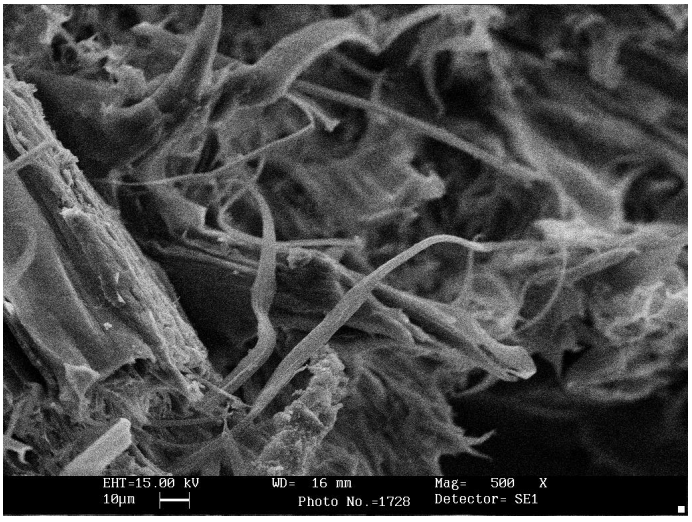
همان‌طور که در تصاویر میکروسکوپی نمونه‌ها دیده می‌شود درهم تنیدگی پلیمر و الیاف بخاردهی شده، افزایش پیدا کرده است که ناشی از توزیع مناسب ذرات چوب در زمینه می‌باشد. در بررسی سطح نمونه‌های تهیه شده، به نظر می‌رسد که زبری سطح در کامپوزیت حاوی الیاف بخاردهی نشده، افزایش می‌یابد که می‌تواند بر خواص سطحی چندسازه مانند آب دوستی آن اثرگذار باشد [۲۲].



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گرفته شده از ترکیب شماره یک شامل الیاف چوب بخاردهی نشده و پلی‌پروپیلن بکر



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گرفته شده از ترکیب شماره یک شامل الیاف چوب بخاردهی شده و پلی‌پروپیلن بکر



شکل ۵- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گرفته شده از ترکیب شماره یک شامل الیاف چوب بخاردهی نشده و پلی‌پروپیلن بازیافتی

در همه تیمارها، سازگارکننده‌های انیدرید مالئیک استفاده شده و میزان آن ثابت است. پس انتظار همپوشانی خوب و مناسبی بین تمام تیمارها داریم. شکل ۳ شامل چندسازه حاوی الیاف بخاردهی نشده و پلیمر بکر(ترکیب ۱) است و به خوبی دستجات الیاف را نشان می‌دهد. در این تصویر همپوشانی مناسب میان ماتریس زمینه و تقویت کننده دیده می‌شود.

شکل ۴ مربوط به تیمار شامل الیاف بخاردهی شده و پلیمر بکر (ترکیب۲) است تصویر بخوبی نشان دهنده این موضوع است که همپوشانی بین ماتریس پلیمری و تقویت کننده به خوبی صورت گرفته است و همچنین اثر بخاردهی الیاف طبیعی که سبب دفیبره شدن الیاف و از بین بردن کلوخه و دستجات شده در این تصویر بخوبی محسوس است.

شکل ۵، با توجه به اینکه پلیمر آن بازیافتی است اما همپوشانی خوبی در آن دیده می شود (ترکیب۳) با توجه به نتایج خوب خواص فیزیکی و مکانیکی الیاف بخاردهی شده، نشان بر این همپوشانی است.

ذرات چوب به خوبی در زمینه پلیمری توزیع شده‌اند که نشان دهنده برهم کنش مناسب بین چوب و پلیمر است. بر این اساس، می‌توان گفت که قالب گیری به صورت اکستروژن روش مناسبی برای تهیه نمونه‌های چوب پلاستیک می‌باشد [۱۹].

نتیجه‌گیری

با بخاردهی الیاف سلولزی، آب بهتر به داخل منافذ چوب نفوذ کرده و منجر به افزایش تجزیه همی‌سلولز می‌شود که موجب کاهش آب دوستی آن می‌شود و گروه‌های هیدروکسیل که عامل قطبیت است کم می‌شود و سبب سازگاری بهتر آن با پلیمرهای غیر قطبی مثل پلی‌پروپیلن می‌شود و این باعث چسبندگی بهتر و افزایش خواص مکانیکی و کاهش جذب آب می‌شود.

چندسازه چوب پلاستیک حاوی الیاف بخاردهی شده و پلیمر خالص، در مقایسه با چندسازه حاوی الیاف بخاردهی نشده و پلیمر بازیافتی کمترین جذب آب را در ۲۴ ساعت غوطه‌وری از خود نشان دادند. نتایج مربوط به واکشیدگی ضخامت نیز مشابه جذب آب بود و در تیمارهای حاوی الیاف بخاردهی شده و پلیمر خالص، حداقل واکشیدگی ضخامت مشاهده شد. این امر را می‌توان به کاهش گروه‌های هیدروکسیل الیاف سلولزی در نتیجه فرایند بخاردهی مربوط دانست. در بررسی خواص فیزیکی از لحاظ آماری، تاثیر بخاردهی بر تیمار، معنی‌دار بود، تاثیر مستقل پلیمر بازیافتی در بررسی خواص فیزیکی، مقاومت کمتری را نشان داد ولی اختلاف از لحاظ آماری معنی‌دار نبود، همچنین چندسازه حاوی الیاف بخاردهی شده و پلیمر خالص، بیشترین خواص مکانیکی را در مقاومت خمشی، مقاومت کششی و مقاومت به ضربه از خود نشان دادند. چندسازه حاوی پلیمر بازیافتی کمترین مقاومت را داشت ولی از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. با توجه به اینکه اختلاف معنی‌داری در خواص مکانیکی و فیزیکی نمونه‌های حاوی پلیمر بازیافتی مشاهده نشد، استفاده از پلیمر بازیافتی به دلیل تجزیه‌پذیر بودن این چندسازه، کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی در طبیعت، استفاده مجدد از ضایعات پلاستیکی و زباله و پسماند پلیمری و شهری در چرخه تولید چندسازه توصیه می‌شود [۲۳]. با توجه به جدول شماره ۶، که مقدار پلاستیک بکر و بازیافتی را در طی ۱۵ سال گذشته نشان می‌دهد، می‌توان حجم زیاد پلاستیک‌های ضایعاتی را به همراه الیاف لیگنوسلولزی محصولی تولید نمود که منجر به کاهش هزینه تولید نسبت به محصول تولید شده با مواد غیربازیافتی می‌شود و در عین حال مقاومت‌های مناسب و قابل کاربرد در مصارف صنایع چوب را دارد [۲۴]. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، نشان دهنده همپوشانی مناسب تیمار شامل الیاف بخاردهی شده و پلیمر است. طیف‌های اشعه ایکس (XRD)، نشان می‌دهد که الیاف چوب بخاردهی شده در پیک ۲۲/۵ درجه، کریستالینیته شده است اما چون تغییرات آن نسبت به الیاف چوبی بخاردهی نشده جزئی است این تغییرات قابل چشم پوشی است. آزمون FTIR، نشان دهنده تاثیر مناسب بخاردهی بر الیاف چوبی است و به‌خوبی نشان می‌دهد که گروههای هیدروکسیل حذف شده و نیز همی‌سلولزها تخریب شده اند. بخاردهی تاثیر بسزایی در بهبود اتصال میان الیاف و ماتریس داشته و از طریق حذف همی‌سلولزها، سبب بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی چندسازه می‌گردد.

جدول۵- مقدار پلاستیک تولید شده و قابل بازیافت در جهان طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵ میلادی

نسبت بازیافت (٪)	حجم تقریبی بازیافت شده (میلیون تن)	تولید کل پلاستیک (میلیون تن)	سال
۸/۷	۲۳/۵	۲۷۰	۲۰۱۰
۹	۲۸/۹	۳۲۲	۲۰۱۵
۹	۳۱/۸	۳۵۳	۲۰۱۹
۱۰	۴۳	۴۳۰	۲۰۲۴
۱۱	۵۰	۴۴۵	۲۰۲۵ (پیش بینی)

منابع

[1] Kinoshita, Y., Yamada, T., Gupta, S.M., Ishigaki, A. and Inoue, M. (2020) "Decision support model of environmentally friendly and economical material strategy for life cycle cost and recyclable weight", International Journal of Production Economics, 224(C), p. 107545. Doi: 10.1016/j.ijpe.2019.107545.

[2] Lopez, Y.M., Paes, J.B., Gustave, D., Gonçalves, F.G., Méndez, F.C. and Nantet, A.C.T. (2020) "Production wood-plastic composites using cedrela odorata sawdust waste and recycled thermoplastics mixture from post-consumer products-A sustainable approach for cleaner production in Cuba", Journal of Cleaner Production, 244(2), p. 118723. Doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118723.

[3] Iakovlev, M., Survase, S., Segers, P., Sideri, S., Rouzinou, S., Pylkkanen, V. and Retsina, T. (2020) "Sulfur dioxide-ethanol-water fractionation platform for conversion of recycled wood to sugars, lignin and lignosulfonates", Bioresource Technology, 300, p. 122652. Doi: 10.1016/j.biortech.2019.122652.

[4] Altuntaş, E., Yilmaz, E., Salan, T. and Alma, M.H. (2017) "Combined effect of zinc borate and coupling agent against brown and white rot fungi in wood-plastic composites", BioResources, 12(4), pp. 7056-7068.

[5] Lopez, M.D.M.C., Pernas, A.I.A., Lopez, M.J.A., Latorre, A.L., Vilariño, J.L. and Rodríguez, M.V.G. (2014) "Assessing changes on poly (ethylene terephthalate) properties after recycling: Mechanical recycling in laboratory versus postconsumer recycled material", Materials Chemistry and Physics, 147(3), pp. 884-894. Doi: 10.1016/j.matchemphys.2014.06.003.

[6] Bal, B. (2022) "Mechanical properties of wood-plastic composites produced with recycled polyethylene, used Tetra Pak® boxes, and wood flour", BioResources, 17(4), pp. 6569-6577. doi:10.15376/biores.17.4.6569-6577.

[7] Krause, K.C., Sauerbier, P., Koddenberg, T. and Krause, A. (2018) "Utilization of recycled material sources for wood-polypropylene composites: Effect on internal composite structure, particle characteristics and physico-mechanical properties", Fibers, 6(4), p. 86. Doi:10.3390/fib6040086.

[8] Jamekhorshid, A., Sadrameli, S.M., Barzin, R. and Farid, M.M. (2017) "Composite of wood-plastic and micro-encapsulated phase change material (MEPCM) used for thermal energy storage", Applied Thermal Engineering, 112, pp. 82-88. Doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.10.041.

[9] Dairi, B., Djidjelli, H., Boukerrou, A., Migneault, S. and Koubaa, A. (2017) "Morphological, mechanical, and physical properties of composites made with wood flour-reinforced polypropylene/recycled poly (ethylene terephthalate) blends", Polymer Composites, 38(8), pp. 1749-1755. Doi:10.1002/pc.23741.

[10] Bouhamed, N., Souissi, S., Marechal, P., Amar, M.B., Lenoir, O., Leger, R. and Bergeret, A. (2020) "Ultrasound evaluation of the mechanical properties as an investigation tool for the wood-polymer composites including olive wood flour", Mechanics of Materials, 148, p. 103445. Doi: 10.1016/j.mechmat.2020.103445.

[11] Moreno, D.D.P. and Saron, C. (2017) "Low-density polyethylene waste/recycled wood composites", Composite Structures, 176, pp. 1152-1157. Doi: 10.1016/j.compstruct.2017.06.025.

[12] Li, X., Lei, B., Lin, Z., Huang, L., Tan, S. and Cai, X. (2014) "The utilization of bamboo charcoal enhances wood plastic composites with excellent mechanical and thermal properties", Materials & Design, 53, pp. 419-424. Doi: 10.1016/j.matdes.2013.07.040.

[13] Khan, A., Mishra, A., Thakur, V. and Pappu, A. (2025) "Towards sustainable wood plastic composites: polymer types, properties, processing and future prospects", RSC Sustainability, pp. 2833-2862.

[14] Guo, X., Fu, Y., Zhang, F., Li, X. and Liu, N. (2021) "Change of structural features and relocalization of chemical components in the autohydrolyzed poplar wood chips enhance the accessibility of remaining components", Industrial Crops and Products, 167, p. 113508. Doi: 10.1016/j.indcrop.2021.113508.

[15] Brodowsky, H. and Mäder, E. (2018) "Investigation of transcrystalline interphases in polypropylene/glass fiber composites using micromechanical tests", Fibers, 6(1), p. 16. Doi:10.3390/fib6010016.

[16] Friedrich, D. (2024) "Branding of wood-plastic composites under generic name "Biobased-Plastic" or specifically as "Wood-Plastic Composite"? A consumer study under compolytics approach", Journal of Cleaner Production, 470, p. 143276. Doi: 10.1016/j.jclepro.2024.143276.

[17] Voltz, L., Guiseppe, I., Geng, S. and Oksman, K. (2020) "The effect of recycling on wood-fiber thermoplastic composites", Polymers, 12(8), p. 1750. Doi:10.3390/polym12081750.

[18] Toscano, G., Maceratesi, V., Leoni, E., Stipa, P., Laudadio, E. and Sabbatini, S. (2022) "FTIR spectroscopy for determination of the raw materials used in wood pellet production", Fuel, 313, p. 123017. Doi: 10.1016/j.fuel.2021.123017.

[19] Chaudhary, V., Ram, K. and Ahmad, F. (2019) Reinforced Polymer Composites. 1st edn. New Delhi: Wiley-VCH.

[20] Lazrak, C., Kabouchi, B., Hammi, M., Famiri, A. and Ziani, M. (2019) "Structural study of maritime pine wood and recycled high-density polyethylene (HDPEr) plastic composite using Infrared-ATR spectroscopy, X-ray diffraction, SEM and contact angle measurements", Case Studies in Construction

Materials, 10, e00227. Doi: 10.1016/j.cscm. 2019.e00227.

[21] Mertens, O., Krause, K.C. and Krause, A. (2018) “Evaluation of wood fiber composites based on a novel simultaneous defibration and compounding process”, Journal of Applied Polymer Science, 135(7), p. 45859. Doi:10.1002/app.45859.

[22] Hojaholeslami, Z., Bagherzadeh, E. and Zebarjad, M. (2020) “Making high-density polyethylene wood-plastic composite of poplar wood and investigating its mechanical, thermal and morphological properties”. In: 9th International conference on materials engineering and metallurgy. Tehran, 10-11 November. [In Persian].

[23] Bashardoust, Z., Hedjazi, S. and Hamzeh, Y. (2025) “Production of Chemical Pulp Using Carbonate Process from Wheat Straw”, Iranian Journal of Wood and Paper Industry, 16(1), pp. 1-14. Doi:10.22034/ijwpi.2025. [In Persian].

[24] Gholami, M., Mansori, H. and Nosrati, B. (2015) “Investigation of the Physical Properties of Wood Plastic Composite made from recycled materials”. In: Collected Papers of the First National Symposium on Wood and Lignocellulosic products. [In Persian].