

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

# Wood-Polymer Composites (WPC). I. Introduction, Properties, and Applications

Mohsen Sadroddini<sup>1\*</sup> and Masumeh Mohamadi<sup>2</sup>

1. Polymer Engineering Department, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran
2. Work and Technology Group, Education Department of West Azerbaijan, Urmia, Iran

Received: 10 August 2023, Accepted: 7 January 2024

## Abstract

Wood-polymer composites (WPC) are among the green composites that are environmentally friendly and renewable. These innovative composites have attractive features such as light weight, low cost, biodegradability, and suitable mechanical and physical properties. Typically, wood-polymer composites can be prepared by combining various types of thermoplastic and thermosetting polymer matrices with flour of different wood species using common polymer processing methods such as extrusion, injection molding, and compression molding. The wood particles used in these composites are divided into two general categories: softwood and hardwood, each of which has its own structure and characteristics. Considering these advantages, wood-polymer composites are often recognized as an exciting alternative to polymers, conventional polymer composites and wood, and are increasingly used in the construction, automotive, transportation, household appliances, sports equipment etc. By the way, in this article, wood-polymer composites and its components were first introduced, and then the chemical structure and properties of different types of wood species were also investigated. In the following, the mechanical, thermal, and water absorption properties of WPCs were reviewed and finally their diverse and attractive applications are stated.

## Key Words

wood-polymer composite,  
wood-plastic composite,  
cellulose,  
softwood,  
hardwood

(\*) To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: m.sadroddini@urmia.ac.ir

# کامپوزیت‌های پلیمر-چوب (WPC): ۱- معرفی، خواص و کاربردها

بسپارش  
فصلنامه علمی  
سال چهاردهم، شماره ۳،  
صفحه ۱۴-۱۴۰۳،  
ISSN: 2252-0449

محسن صدرالدینی<sup>۱\*</sup>، معصومه محمدی<sup>۲</sup>

۱- ارومیه، دانشگاه ارومیه، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی پلیمر

۲- ارومیه، آموزش و پرورش آذربایجان غربی، گروه کار و فناوری

دریافت: ۱۴۰۲/۵/۱۹، پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۷

کامپوزیت‌های پلیمر-چوب (WPC) از دسته کامپوزیت‌های سبز به‌شمار می‌روند که دوستدار محیط زیست و تجدیدپذیر هستند. این کامپوزیت‌های نوآورانه ویژگی‌های جذابی نظیر سبکی، هزینه کم، زیست‌تجزیه‌پذیری، خواص مکانیکی و فیزیکی مناسب دارند. به‌طور معمول، کامپوزیت‌های پلیمر-چوب را می‌توان با ترکیب انواع گوناگون ماتریس‌های پلیمری گرمانرم و گرماسخت با آرد گونه‌های چوبی مختلف به روش‌های معمول فراوری پلیمرها مانند اکستروژن کردن، قالب‌گیری تزریقی و قالب‌گیری فشاری تهیه کرد. ذرات چوبی استفاده‌شده در این کامپوزیت‌ها به دو دسته کلی چوب نرم و چوب سخت تقسیم می‌شوند که هر یک، ساختار و ویژگی‌های خاصی دارند. با در نظر گرفتن این مزایا، WPCها اغلب به‌عنوان جایگزین هیجان‌انگیزی برای پلیمرها، کامپوزیت‌های پلیمری متداول و چوب شناخته می‌شوند و به‌طور روزافزون در صنایع ساختمان، خودرو، حمل‌ونقل، لوازم خانگی، تجهیزات ورزشی و غیره استفاده می‌شوند. در این راستا، در مطالعه حاضر ابتدا کامپوزیت‌های پلیمر-چوب و اجزای تشکیل‌دهنده آن معرفی شده و سپس ساختار شیمیایی و خواص انواع مختلف گونه‌های چوبی نیز بررسی شده‌اند. در ادامه خواص مکانیکی، گرمایی و جذب آب کامپوزیت‌های پلیمر-چوب مرور شده و در نهایت کاربردهای متنوع و جذاب آن‌ها بیان شده است.

## چکیده



محسن صدرالدینی



معصومه محمدی

## واژگان کلیدی

کامپوزیت پلیمر-چوب،  
کامپوزیت پلاستیک-چوب،  
سلولوز،  
چوب نرم،  
چوب سخت

کامپوزیت‌های پلیمر-چوب (WPC، wood-polymer composites) مواد نوآورانه‌ای هستند که از ترکیب پلیمرها، آرد چوب (wood flour) و مواد افزودنی از طریق فرایندهای اکستروژن کردن، قالب‌گیری تزریقی، قالب‌گیری فشاری و چاپگر سه‌بعدی تولید می‌شوند. آرد چوب، فاز پراکنده‌ای است که استحکام و سفتی کامپوزیت نهایی را فراهم می‌کند. به جای آرد چوب، می‌توان از مواد زائد و محصولات باقی مانده از صنایع چوب و کشاورزی مانند خاک اره و آرد کاه برنج و همچنین گرمانرم‌های بازیافتی به‌عنوان مواد اولیه برای تهیه WPCها استفاده کرد. بنابراین، آن‌ها جزء کامپوزیت‌های سبز در نظر گرفته می‌شوند [۱]. باید اشاره کرد با توجه به اینکه در کامپوزیت‌های پلیمر-چوب، بیشترین تمرکز پژوهشگران روی پلیمرهای گرمانرم بوده است، بنابراین اصطلاح کامپوزیت‌های پلاستیک-چوب رواج بیشتری دارد که در ادامه از آن استفاده شده است.

برخلاف کامپوزیت‌های سنتی، WPCها دارای ویژگی‌های جذابی مانند سبکی، هزینه کم و زیست‌تخریب‌پذیری هستند و به‌طور گسترده در کامپوزیت‌های سازه‌ای مانند عرشه، نرده، کف‌پوش چوبی، چارچوب درب، خودروسازی، لوازم خانگی و تجهیزات ورزشی استفاده می‌شوند [۲،۳]. آن‌ها معمولاً به‌عنوان جایگزینی برای چوب طبیعی شناخته می‌شوند و استفاده از این کامپوزیت‌ها در محیط‌های کاری مرطوب یا در تماس نزدیک با آب نیز امکان‌پذیر است. زیرا جزء پلیمری آب‌گریز، الیاف چوب آبدوست را محافظت می‌کند و دوام آن‌ها را افزایش می‌دهد و تا حدی به مداخلات نگهداری کمتری نیاز دارند [۴،۵].

## اجزای تشکیل دهنده

WPCها از وارد کردن ذرات چوب در ماتریس پلیمری ایجاد می‌شوند. تقویت‌کننده‌های ذره‌ای جزء چوبی می‌توانند در هر شکل و اندازه‌ای باشند و به‌عنوان پرکننده یا تقویت‌کننده کامپوزیت عمل کنند. بخش بسیار کمی از کل کامپوزیت را نیز مواد افزودنی تشکیل می‌دهند که برای کمک به فراوری کامپوزیت اضافه می‌شوند و بر خواص گوناگون محصول نهایی اثرگذارند [۶]. بنابراین برای شناخت کافی کامپوزیت‌های پلاستیک-چوب، ابتدا باید دو جزء اصلی را درک کرد. اگرچه هر دو جزء برپایه پلیمر هستند، اما از نظر منشأ، ساختار و عملکرد تفاوت بسیاری دارند. چوب حاوی پلیمرهایی مانند سلولوز، همی سلولوز و لیگنین است و خواص

بسیار متفاوتی با پلیمرهای سنتزی دارد. چوب نسبت به این پلیمرهای سنتزی ارزان‌تر، سفت‌تر و مستحکم‌تر است که آن را به یک پرکننده یا تقویت‌کننده مفید تبدیل می‌کند [۷].

## پلیمر

پلیمرها موادی با وزن مولکولی زیاد هستند که به‌عنوان ماتریس در WPCها استفاده می‌شوند و عملکرد آن‌ها تا حد زیادی به‌وسیله معماری مولکولی تعیین می‌شود. به‌دلیل پایداری گرمایی کم آرد چوب، معمولاً تنها پلیمرهایی که می‌توانند در دمای کمتر از حدود ۲۰۰ °C فراوری شوند، در WPCها کاربرد دارند [۸]. به‌طور کلی، پلیمرها براساس رفتار گرمایی به دو دسته بزرگ پلیمرهای گرمانرم و گرماسخت تقسیم می‌شوند.

## گرماسخت‌ها

گرماسخت‌ها دسته‌ای از پلیمرها هستند که پس از شکل‌دهی نمی‌توان آن‌ها را مجدداً ذوب و شکل داد. این پلیمرها به‌وسیله واکنش شیمیایی پخت از حالت مایع به جامدات صلب تبدیل می‌شوند که از نظر ساختار شیمیایی دارای اتصالات عرضی میان زنجیرهای پلیمری هستند. گرماسخت‌های رایج به‌کاررفته در WPCها عبارت از رزین پلی‌استر، اپوکسی، اوره-فرمالدهید و فنول-فرمالدهید است [۶]. اولین WPC تجاری، کامپوزیت گرماسخت فنول-فرمالدهید و آرد چوب با نام تجاری باکلیت بود که برای یک دسته تعویض دنده در شرکت رولزرویس در سال ۱۹۱۶ میلادی استفاده شد. با این حال در سال‌های اخیر، گرماسخت‌ها مصرف کمتری در WPC نسبت به گرمانرم‌ها داشته‌اند [۹].

## گرمانرم‌ها

گرمانرم‌ها دسته‌ای از پلیمرها هستند که در اثر گرما، نرم می‌شوند و می‌توان آن‌ها را به دفعات شکل داد. پلی‌اتیلن پرچگالی (HDPE) با ۸۳٪، پلی‌پروپیلن (PP) با ۹٪ و پلی‌وینیل کلرید (PVC) با ۷٪ رایج‌ترین گرمانرم‌های استفاده‌شده در WPCها هستند. البته پلی‌استیرن (PS) و کوپلیمرهای آن مانند استیرن-آکریلونیتریل (SAN) و برخی گرمانرم‌های زیست‌تخریب‌پذیر مانند پلی‌لاکتیک اسید (PLA) نیز تا حدی کاربرد دارند [۳]. تا چند دهه گذشته، گرمانرم‌ها در WPCها در مقایسه با گرماسخت‌ها در مقیاس گسترده استفاده نمی‌شدند، اما اخیراً استفاده از آن‌ها بسیار زیاد شده است. این مسئله به‌دلیل رشد بسیار سریع محصولات ساختمانی بیرونی مانند نرده‌ها، پروفیل‌های پنجره و درب و به‌ویژه پلکان‌های

کامپوزیتی بوده است [۷،۱۰].

هیدروکسی و متوکسی با پیوندهای مختلف تشکیل شده است. لیگنین از سلولوز غیرقطبی تر است و به‌عنوان چسب شیمیایی درون و میان الیاف سلولوزی عمل می‌کند. سایر اجزای اضافی بسته به نوع درخت و محیط رشد حدود ۳٪ تا ۱۰٪ از چوب خشک را تشکیل می‌دهند. این مواد شامل چربی، موم، رزین، پروتئین، صمغ و قندهای ساده است [۷،۱۲].

گونه‌های چوبی براساس ترکیب شیمیایی و ساختار، به چوب نرم و چوب سخت تقسیم‌بندی می‌شوند. به‌طور کلی، چوب نرم دارای مقدار سلولوز بیشتری در واحد همی‌سلولوز است که به چسبندگی سطحی بیشتر میان ذرات چوب و ماتریس پلیمری منجر می‌شود، اما استحکام ضعیفی دارد. درمقابل، چوب سخت دارای سلولوز کمتری در واحد همی‌سلولوز است که چسبندگی سطحی ضعیف‌تری دارد، اما از نظر استحکام مناسب است. چوب سخت از درختان خزان‌شونده پربزرگ و چوب نرم از درختان مخروطی به‌دست می‌آیند [۶،۱۳].

جدول ۱، ترکیب شیمیایی گونه‌های مختلف چوب را نشان می‌دهد. مانند بیشتر مواد طبیعی، ساختار چوب پیچیده است. چوب ماده‌ای متخلخل، لیفی و ناهمسان‌گرد است. شکل ۱، ساختار چوب نرم و سخت را نشان می‌دهد. چوب عمدتاً از سلول‌های دوکی‌شکل، دراز و توخالی به نام نایدیس (tracheid) تشکیل شده است که به موازات یکدیگر در امتداد تنه درخت قرار گرفته‌اند. لومن (lumen) یا مرکز توخالی الیاف می‌تواند به‌طور کامل یا جزئی با رسوباتی مانند رزین، صمغ یا رشد سلول‌های مجاور به نام تیلوز (tyloses) پر شود. این الیاف به‌طور محکم به یکدیگر چسبیده‌اند و جزء ساختاری بافت چوب را تشکیل می‌دهند. طول الیاف چوب بسیار متغیر است، اما به‌طور متوسط حدود ۱ mm برای چوب‌های سخت و ۳-۸ mm برای چوب‌های نرم است. قطر لیف‌ها نیز معمولاً ۱۵ μm تا ۴۵ μm است [۷].

### خواص چوب

مشابه با ترکیب شیمیایی، خواص الیاف و ذرات گونه‌های مختلف چوبی می‌تواند تا حد درخور توجهی متفاوت از یکدیگر باشد. افزون‌بر این، روش‌های استخراج و تولید ذرات و الیاف از چوب و دماها و فشارهای زیاد که اغلب طی فرایند ساخت کامپوزیت وجود دارد نیز بر ویژگی‌هایی مانند شیمی سطح، چگالی و میزان رطوبت اجزای چوب در کامپوزیت نهایی اثر می‌گذارند. به‌عنوان مثال، الیاف چوب تولیدی به‌وسیله روش‌های گرم‌مکانیکی به سطوح غنی از لیگنین منجر می‌شود، در حالی که الیاف تولیدی از طریق

در آمریکای شمالی، PE بیشترین کاربرد را به‌عنوان ماتریس دارد. اگرچه از PP، PVC و سایر پلیمرها نیز استفاده می‌شود. استفاده زیاد از پلی‌اتیلن تا حدی بدین دلیل است که بسیاری از WPC‌های اولیه از فیلم‌های بازیافتی و همچنین هزینه کم و در دسترس بودن منابع بازیافتی PE ساخته شدند. PP به‌طور گسترده در اروپا استفاده می‌شود. آن‌ها رطوبت کمی را جذب و به‌عنوان مانع رطوبت عمل می‌کنند، زیرا جذب رطوبت می‌تواند بر عملکرد کامپوزیت اثر منفی بگذارد [۱۰]. از PVC نیز در WPC‌ها استفاده می‌شود، اما نه به اندازه PE و PP. استفاده گسترده‌تر از PVC در WPC‌ها با وجود عملکرد مکانیکی خوب آن، به دلیل پیچیدگی‌های فرمول‌بندی و فراوری محدود است.

### چوب

چوب به‌عنوان پلیمری طبیعی و ماده‌ای ناهمسان‌گرد، هدیه فوق‌العاده طبیعت به انسان است. اهمیت چوب به دلیل دسترس‌پذیری، پایداری خوب، تجدیدپذیری، سبکی و خواص مکانیکی، فیزیکی و گرمایی مناسب آن است. سایر ویژگی‌های این ماده از جمله سفتی، استحکام عالی، چقرمگی و هزینه کم، آن را به ساختار مفیدی برای هزاران سال تبدیل کرده است. بسته به موقعیت جغرافیایی، انواع گسترده‌ای از گونه‌های چوب در سرتاسر جهان یافت می‌شوند. ترکیب شیمیایی، ساختار، خواص فیزیکی، مکانیکی و گرمایی در گونه‌های مختلف چوب متفاوت است [۱۱]. با این حال، برخی خواص آن مانند جذب رطوبت که در طبیعت به‌خوبی به آن کمک می‌کند، می‌تواند در یک ماده کامپوزیتی مشکل‌ساز باشد. بنابراین، برای استفاده مؤثر از چوب به‌عنوان تقویت‌کننده در پلیمرها، درک رفتار و ویژگی‌های آن اهمیت دارد.

### ترکیب شیمیایی و ساختار چوب

چوب حاوی سه پلیمر طبیعی سلولوز، همی‌سلولوز و لیگنین است. سلولوز، پلیمری خطی با درصد بلورینگی زیاد (۹۰٪-۶۰) بوده که از واحدهای گلوکوز با درجه پلیمر شدن حدود ۱۰۰۰۰ تشکیل شده است و جزء اصلی در تعیین استحکام و ثبات ساختاری چوب به‌شمار می‌رود. همی‌سلولوزها، پلیمرهای شاخه‌ای متشکل از قندهای مختلف پنج و شش کربنی هستند و وزن مولکولی آن‌ها بسیار کمتر از سلولوز است، اما هنوز به‌عنوان یک جزء ساختاری چوب نقش دارند. لیگنین نیز پلیمر شبکه‌ای بی‌شکل و دارای پیوند عرضی بوده که از آرایه نامنظمی از واحدهای فنیل پروپان جایگزین

جدول ۱- ترکیب شیمیایی گونه‌های مختلف چوب سخت و نرم [۷،۱۱].

گونه چوب	مقدار اجزا (%)		
	سلولوز	همی سلولوز	لیگنین
چوب سخت:			
افرا (Maple)	۴۷	۳۰	۲۱
راش (Beech)	۴۴-۴۶	۳۰-۳۵	۲۱-۲۳
صنوبر (Poplar)	۴۴-۴۶	۳۳-۳۶	۱۸-۲۱
بلوط (Oak)	۴۲-۴۷	۲۰-۲۷	۲۵-۲۷
انبه (Mango)	۴۰/۱۹	۱۱/۴۷	۳۵/۹۶
سیب (Apple)	۳۹/۵۴	۲۶/۰۶	۲۹/۸۶
بامبو (Bamboo)	۲۶-۴۳	۳۰	۲۱-۳۱
چوب نرم:			
کاج (Pine)	۴۴-۴۶	۲۵-۲۸	۲۷-۲۹
کاج کریسمس (Spruce)	۴۴-۴۶	۲۵-۲۷	۲۷-۲۹
سدر (Cedar)	۳۷	۱۹	۳۴

کاملاً ناهمسان‌گرد بوده و بیشترین مقادیر در راستای طولی لیف است. اگرچه چگالی دیواره سلولی چوب  $1/50-1/44 \text{ g/cm}^3$  است، اما ساختار متخلخل چوب جامد دارای چگالی کلی  $0/72-0/32 \text{ g/cm}^3$  در هنگام خشک شدن است. چگالی ظاهری آرد چوب به عواملی مانند میزان رطوبت، اندازه ذرات و گونه بستگی دارد، اما معمولاً حدود  $0/19-0/22 \text{ g/cm}^3$  است [۱۵]. باید گفت، حتی چگالی چوب فشرده تا حد زیادی کمتر از پرکننده‌ها و تقویت‌کننده‌های غیرآلی معمولی است. این مزیت در کاربردهایی مانند قطعات خودرو خود را نشان می‌دهد که سبکی عامل مهمی است.

### جذب رطوبت

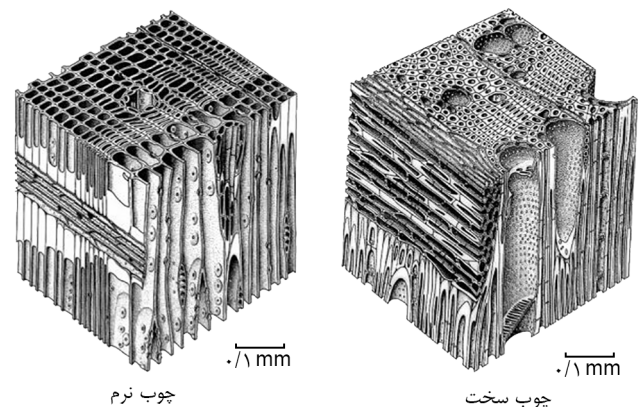
ترکیبات شیمیایی اصلی دیواره سلولی چوب حاوی هیدروکسیل و سایر گروه‌های مولکولی است که رطوبت را جذب می‌کنند. رطوبت جذب شده باعث تداخل و کاهش پیوند هیدروژنی میان پلیمرهای دیواره سلولی می‌شود و عملکرد مکانیکی آن را تغییر می‌دهد. رطوبت تعادلی چوب تحت تأثیر دما و رطوبت است و می‌تواند تا ۳-۴٪ تغییر کند که باید پیش یا حین فرآوری با پلیمرها حذف شود [۱۶]. تغییرات حجمی جزء چوب به دلیل جذب رطوبت، به ویژه چرخه رطوبتی مکرر، می‌تواند به آسیب سطحی و ترک خوردگی ماتریس منجر شود. در نتیجه، بسیاری از تولیدکنندگان WPC برای جلوگیری از جذب رطوبت و آثار منفی آن، پوششی از ماتریس

روش‌های شیمیایی دارای سطوح غنی از کربوهیدرات هستند. این تغییرات در شیمی سطح می‌تواند چسبندگی با پلیمرها را تحت تأثیر قرار دهد [۱۴].

مهم‌ترین خواص لیاف و ذرات چوب عبارت از چگالی، خواص مکانیکی، جذب رطوبت، دوام و ماندگاری و خواص گرمایی هستند.

### چگالی

جدول ۲، چگالی و خواص کششی گونه‌های مهم چوب را نشان می‌دهد. خواص مکانیکی گزارش شده برای لیاف تقویت‌کننده، به‌ویژه لیاف طبیعی، بسیار متفاوت است. خواص مکانیکی چوب



شکل ۱- ساختار فیزیکی چوب سخت و نرم [۷].

جدول ۲- چگالی و خواص کششی گونه‌های مختلف چوب [۷،۱۱].

مدول یانگ (GPa)	استحکام کششی (MPa)	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	نوع چوب
۱۰/۴۱	۷۷/۹۰	۰/۶۳	چوب سخت: بلوط
۱۱-۱۷	۱۴۰-۲۳۰	۰/۶-۱/۱	بامبو
۹/۵۱	۸۶/۲۰	۰/۵۶	راش
۹/۲۴	۱۸۶/۲۰	۰/۶۸	سنجد (Elm)
۹/۵۸	۱۰۸/۲۰	۰/۵۴	افرا
۵/۸۶	۱۵۴/۴۰	۰/۳۳	صنوبر
۱۸-۴۰	۸۴/۸۰	۱/۵	چوب نرم: کاج کریسمس
۷/۲۰	۷۸/۶۰	۰/۳۵	سدر
۰/۱-۰/۵	۱۲-۲۷	۰/۳۵	کاج

پلیمری بر جزء چوبی ایجاد می‌کنند [۷].

### خواص گرمایی

مولکولی بیشتر تشکیل شده است که به پایداری گرمایی بیشتری منجر می‌شود. بنابراین، تخریب گرمایی لیگنین در محدوده دمایی °C ۲۵۰-۵۰۰ آغاز می‌شود. به‌طور کلی، پایداری گرمایی چوب نرم بیشتر از چوب سخت است، زیرا مقدار همی سلولوز بیشتری دارد [۱۸، ۱۱].

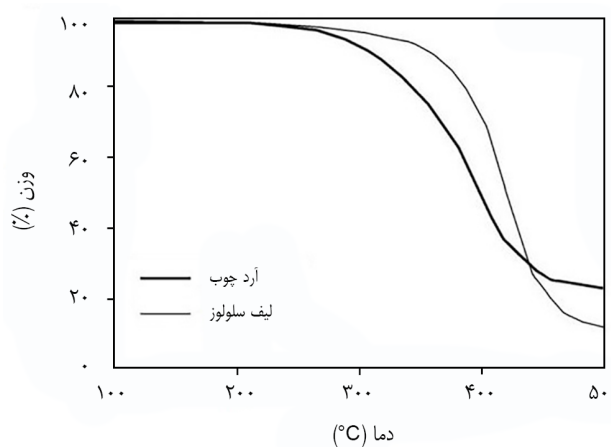
تخریب گرمایی چوب در دمای نسبتاً کم، حدود °C ۲۰۰ آغاز می‌شود [۱۷]. بنابراین، تعیین و پیش‌بینی خواص گرمایی WPCها ضروری است (شکل ۲). در ساختار چوب، همی سلولوز به‌دلیل ساختار بی‌شکل تصادفی، پایداری گرمایی خود را در محدوده دمایی °C ۱۸۰-۳۰۰ از دست می‌دهد. تخریب گرمایی سلولوز به‌دلیل ساختار بلوری در دمای بیشتر در حدود °C ۲۷۵-۳۰۰ آغاز می‌شود. ساختار لیگنین با همی سلولوز و سلولوز متفاوت است. این ماده از سه نوع واحد بنزن-پروپان با پیوندهای عرضی زیاد و وزن

### خواص کامپوزیت‌های پلاستیک-چوب

کامپوزیت‌های پلیمری پر شده با ذرات چوب، افزون بر سازگاری با محیط زیست و کم‌هزینه بودن، دارای خواص مکانیکی و فیزیکی مناسبی نیز هستند که نظر پژوهشگران را جلب کرده است. در ادامه خواص مکانیکی، گرمایی و جذب آب کامپوزیت‌های پلاستیک-چوب بحث می‌شود.

### خواص مکانیکی

خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلاستیک-چوب به خواص مکانیکی پلیمر، ذرات چوب، میزان ذرات، هندسه (شکل و اندازه) ذرات، چسبندگی سطحی و ترشوندگی بستگی دارد. چسبندگی سطحی مناسب و کسر وزنی کمتر ذرات به استحکام کششی بیشتر منجر می‌شود، در حالی که نسبت منظر بیشتر، کسر وزنی بیشتر ذرات چوب و ترشوندگی مناسب آن‌ها با ماتریس پلیمری باعث افزایش مدول کششی و استحکام ضربه‌ای کامپوزیت‌ها می‌شود [۱۱]. پلیمرهای گرمانرمی مانند پلی‌اتیلن کم‌چگالی (LDPE)، پلی‌اتیلن پرچگالی (HDPE)، پلی‌وینیل کلرید (PVC)، پلی‌استیرن (PS) و پلی‌پروپیلن (PP) سازگاری خوبی با چوب دارند. جدول ۳، خواص



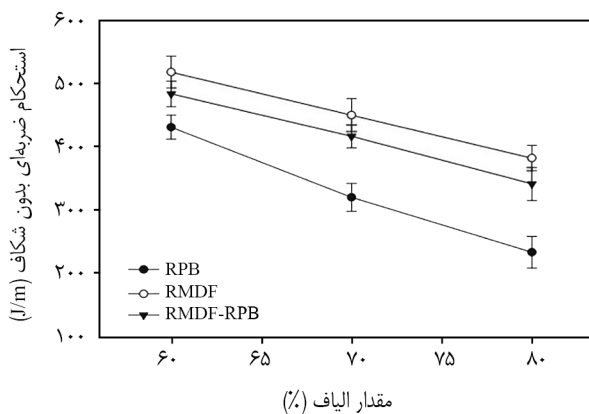
شکل ۲- تجزیه گرماوزن‌سنجی (TGA) آرد چوب کاج و الیاف سلولوزی ساخته‌شده از چوب [۷].

جدول ۳- خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری گرمانرم-چوب [۱۱].

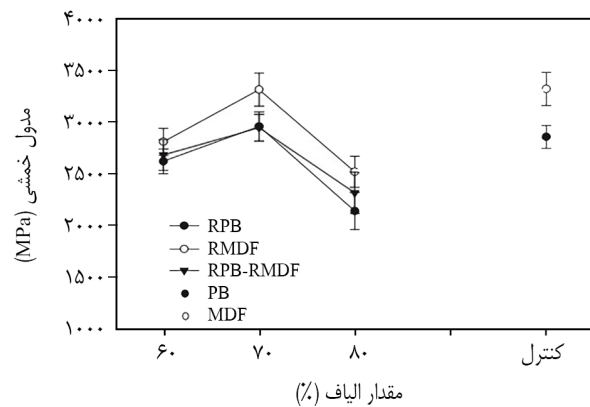
ازدیاد طول (%)	استحکام ضربه‌ای (J/m)	خواص خمشی		خواص کششی		کامپوزیت
		مدول (GPa)	استحکام (MPa)	مدول (GPa)	استحکام (MPa)	
-	-	۳/۳۴	۴۰/۷	۲/۱۹	۳۴/۱	چوب سخت:
۷	-	-	-	۲/۰۵	۳۲/۵	PP-انیه
-	۴۷/۵	۱/۴۴	۴۴/۲	۱/۵۹	۲۴	PVC-بامبو
۴/۱۲	۹/۷	-	-	۱/۴۰	۲۲/۸	PP-راش
-	-	-	-	-	-	PP-صنوبر
۱/۴۴	$۸/۱ \times ۱۰^۲$	-	-	۲/۷۰	۲۰/۵	چوب نرم:
-	-	-	-	۲/۲۸	۳۷/۵	PP-کاج
۱۰	-	-	-	-	-	PVC-کاج

داد، خواص مطالعه‌شده کامپوزیت‌ها به شدت تحت تأثیر نوع و نسبت ذرات چوب به پلیمر قرار دارد (شکل ۳). مقدار بیشینه مدول خمشی صفحه‌های WPC در مقدار لیف ۷۰٪ به دست آمد. استحکام خمشی و استحکام ضربه‌ای نیز با افزایش مقدار لیف از ۶۰٪ به ۸۰٪ کاهش یافت. مدول خمشی صفحه‌های WPC کمتر از صفحه‌های MDF دست‌نخورده بود، اما مدول خمشی کامپوزیت‌ها با مقدار لیف ۷۰٪ نزدیک به صفحه‌های RPB بود. استحکام خمشی صفحه‌های MDF به‌طور درخور توجهی بیش از WPC بود، در حالی که مدول خمشی صفحه‌های RPB با WPC مقدار الیاف ۸۰٪ قابل مقایسه بود. به‌طور کلی آن‌ها مشاهده کردند، استحکام خمشی و ضربه‌ای کامپوزیت‌ها با افزایش مقدار پرکننده کاهش و مدول خمشی افزایش می‌یابد.

مکانیکی تعدادی از کامپوزیت‌های پلاستیک-چوب را نشان می‌دهد. نوربخش و همکاران [۱۹]، خواص مکانیکی کامپوزیت‌های PP-چوب حاوی ذرات با اندازه‌های مختلف (۴۰) (۴۷۰)، (۵۰) (۳۶۸) و (۶۰ mesh) ( $۳۱۰ \mu\text{m}$ ) و نسبت منظر (۳/۵ و ۴/۵) را برای کسر وزنی ۳۰٪ ذرات چوب بررسی و مقایسه کرده‌اند. نتایج نشان داد، خواص مکانیکی کامپوزیت با افزایش شماره مش (کاهش اندازه ذرات) و نسبت منظر افزایش می‌یابد. در پژوهش دیگری، چهارم‌محالی و همکاران [۲۰] رفتار مکانیکی کامپوزیت HDPE حاوی خاک اره ذرات بازیافتی با ۶۰، ۷۰ و ۸۰٪ وزنی را مطالعه کردند. خواص فیزیکی و مکانیکی تخته‌های کامپوزیتی بررسی و با تخته‌های MDF معمولی و تخته‌های ذرات چوب بازیافتی (recycled particle-board, RPB) مقایسه شد. نتایج نشان



(ب)



(الف)

شکل ۳- اثر نوع الیاف و مقدار آن بر: (الف) مدول خمشی و (ب) استحکام ضربه‌ای کامپوزیت‌ها [۲۰].



جدول ۴- خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری گرماسخت-چوب [۱۱].

سختی (N/mm <sup>2</sup> )	استحکام ضربه‌ای (kJ/m <sup>2</sup> )	خواص خمشی		خواص کششی		کامپوزیت
		مدول (GPa)	استحکام (MPa)	مدول (GPa)	استحکام (MPa)	
-	۳/۷	۲/۷۰	۴۸/۹۲	۱/۴۰	۱۴/۲	چوب سخت: اپوکسی-ساج
۱۹۱/۲	۲۰/۰	-	۲۵/۴۱	۱/۸۲	۱۹/۵	پلی‌استر-ساج
-	۳/۲	۲/۴۰	۴۴/۲۳	۱/۳۰	۱۳/۹	اپوکسی-درخت سال
۱۶۷/۷	۱۴/۵	-	۹/۶۰	۱/۷۸	۶/۷۵	پلی‌استر-درخت سال
-	۰/۰۰۹۷	۲/۶۰	۶۱/۸۲	۰/۰۲۴	۳۴/۵	چوب نرم: فنولی-سرو
۲۳۲/۷	۲/۲	۴/۴۸	۲۰/۰۳	۴/۴۷	۱۸/۲	اپوکسی-کاج

همکاران [۲۳]، خواص مکانیکی و تریبولوژیکی کامپوزیت‌های اپوکسی-چوب سیب و اپوکسی-پوسته نارگیل را بررسی کردند. برای ۱۵٪ وزنی ذرات تقویت‌کننده، استحکام خمشی کامپوزیت اپوکسی-چوب سیب ۱۴/۶٪ بیش از کامپوزیت اپوکسی-پوسته نارگیل اندازه‌گیری شد. جدول ۴، خلاصه‌ای از خواص مکانیکی کامپوزیت‌های گرماسخت-چوب را نشان می‌دهد.

#### خواص گرمایی

تجزیه گرمایی کامپوزیت‌های پلیمری شامل بررسی دمای انتقال شیشه‌ای، مدول مکانیکی ذخیره و اتلاف، رسانندگی گرمایی، دمای ذوب، ظرفیت گرمایی ویژه، دمای بلورش و غیره کامپوزیت‌هاست. تجزیه مکانیکی دینامیکی (DMA)، گرماسنجی تفاضلی پویایی (DSC)، تجزیه گرماوزن‌سنجی (TGA)، تجزیه گرمایی تفاضلی (DTA) و روش‌های تصویربرداری گرمایی معمولاً برای توصیف گرمایی کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود.

Lette و همکاران [۲۴]، تجزیه گرمایی کامپوزیت فنولی-چوب سرو و پوسته برنج را انجام دادند. نتایج آن‌ها بیانگر پایداری گرمایی بیشتر کامپوزیت‌های حاوی پوسته برنج نسبت به چوب سرو بود. در مطالعه دیگری، پایداری گرمایی رزین پلی‌استر با وارد کردن ذرات درخت سال (*Shorea robusta*) بهبود یافت [۱۱]. Ge و همکاران [۲۲] نیز دریافته‌اند، پایداری گرمایی کامپوزیت PVC حاوی چوب کاج به‌طور درخور توجهی بیش از کامپوزیت PVC حاوی چوب بامبو است.

در پژوهشی توسط Chattopadhyay و همکاران [۲۵]، کامپوزیت‌های PP تقویت‌شده با مقادیر مختلف از الیاف بامبوی

Pérez و همکاران [۲۱] نشان دادند، استحکام کششی و کرنش و جقرمگی شکست کامپوزیت‌های PP-کاج قرمز با افزایش مقدار ذرات چوب کاهش می‌یابد. در حالی که مدول یانگ کامپوزیت‌ها افزایش یافته است. در پژوهش دیگری [۲۲]، کامپوزیت‌های PVC فاقد نرم‌کننده به‌ترتیب با آردهای بامبو و کاج مخلوط و با روش قالب‌گیری فشاری تهیه شدند. آثار پرکننده‌های آرد چوب بر شکل‌شناسی، خواص مکانیکی ایستا و خواص گرمایی کامپوزیت‌ها بررسی شد. در مقایسه با PVC خالص، افزودن هر دو آرد بامبو و کاج تا حد زیادی سفتی کامپوزیت‌ها را بهبود بخشید. در حالی که استحکام کششی را تا حدی کاهش داد. آزمون‌های کششی نشان داد، کامپوزیت‌های حاوی آرد کاج، خواص مکانیکی بهتری نسبت به کامپوزیت‌های دارای آرد بامبو (با اندازه و مقدار ذرات یکسان) نشان دادند. بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی پویایی نمایانگر پراکندگی خوب و تمایل به آرایش‌یافتگی الیاف کوتاه کاج در کامپوزیت‌ها در سطح بارگذاری کمتر بود. افزون بر این نتایج تجربی نشان داد، هر دو آرد بامبو و کاج هیچ اثر منفی آشکاری بر پایداری گرمایی این کامپوزیت‌ها نداشته‌اند.

پلیمرهای گرماسخت از نظر دوام، خواص مکانیکی، پایداری گرمایی، ترشوندگی پرکننده، خواص الکتریکی و گرمایی، مقاومت در برابر خزش و مقاومت شیمیایی نسبت به پلیمرهای گرمانرم خواص برتری دارند. رزین اپوکسی به‌دلیل مزایای عالی مانند گرانروی کم، پایداری گرمایی و عملکرد مکانیکی بهتر، چسبندگی سطحی زیاد و ترشوندگی بیشتر با پرکننده‌ها، انقباض کم پس از پخت و مقاومت شیمیایی بهتر، عموماً برای توسعه کامپوزیت‌ها در میان گرماسخت‌های موجود ترجیح داده می‌شود. در پژوهشی Ojha و



جدول ۵- دمای انحراف گرمایی (HDT) کامپوزیت‌های PP-بامبو در فشار ۱/۸ MPa [۲۵].

دمای انحراف گرمایی (°C)		الیاف (%v)
MA-g-PP-PP-الیاف استخراجی	PP-الیاف استخراجی	
۷۲	۷۲	۰
۹۵	۸۷	۳۰
۱۰۴	۹۷	۴۰
۱۱۰	۱۰۵	۵۰
۱۱۹	۱۱۰	۶۰

جدول ۶- درصد جذب آب کامپوزیت‌های PP-بامبو در مقادیر مختلف الیاف [۲۵].

مقدار جذب آب (%)		الیاف (%v)
MA-g-PP-PP-الیاف استخراجی	PP-الیاف استخراجی	
۰/۰۹	۰/۰۹	۰
۱/۰۲	۲/۰۷	۳۰
۱/۱۸	۳/۲۸	۴۰
۱/۳۰	۳/۵۴	۵۰
۱/۴۵	۳/۷۶	۶۰

اصلاح شده شیمیایی تهیه شدند. جدول ۵، تغییرات دمای انحراف گرمایی (heat deflection temperature, HDT) به عنوان تابعی از درصد حجمی الیاف در کامپوزیت‌های الیاف بامبوی استخراج شده با عامل سازگارکننده کوپلیمر پلی پروپیلن پیوندی با مالئیک انیدرید (MA-g-PP) و بدون آن را ارائه می‌دهد. مشاهده می‌شود، HDT کامپوزیت‌های PP-الیاف بامبو بدون MA-g-PP با افزایش درصد حجمی الیاف از ۳۰٪ به ۶۰٪ افزایش خطی را نشان می‌دهد. از سوی دیگر، همین رفتار در کامپوزیت‌های دارای الیاف با سازگارکننده MA-g-PP نیز دیده می‌شود با این تفاوت که در مقادیر بسیار بیشتر اتفاق می‌افتد. در مقایسه با PP خالص، HDT کامپوزیت‌های حاوی الیاف با سازگارکننده MA-g-PP با افزایش درصد حجمی الیاف از ۳۰٪ به ۶۰٪، ۶۰-۷۳°C افزایش می‌یابد. در کامپوزیت‌های حاوی الیاف بامبو بدون سازگارکننده، افزایش HDT با افزایش درصد حجم الیاف، به دلیل افزایش تحرک محدود زنجیرهای پلیمری در فاز بی‌شکل است که با وجود کامپوزیت‌های حاوی الیاف با سازگارکننده MA-g-PP افزایش استحکام سطحی بیشتر می‌شود.

به تأخیر انداختن شعله یکی از ملزومات مهم در کاربردهای مهندسی WPCهاست، زیرا آن‌ها به دلیل دارا بودن پلیمر و ذرات چوب مواد اشتعال‌پذیر و مستعد احتراق محسوب می‌شوند. بنابراین، افزایش تأخیراندازی شعله WPCها اهمیت زیادی دارد. تأخیراندازی شعله در یک ماده می‌تواند با تشکیل مانعی درون ماده ایجاد شود که چنین مانعی به عنوان عایق درون مواد عمل می‌کنند. بنابراین با کاهش سرعت انتقال گرما، انتشار آتش نیز کاهش می‌یابد [۲۶]. بدین منظور، معمولاً تأخیراندازهای شعله طی فرایند اختلاط در WPCها گنجانده می‌شوند و این کارآمدترین روش برای بهبود خواص گرمایی به‌شمار می‌رود [۲۷]. در زمینه تأخیراندازهای

شعله، آمونیم پلی فسفات (APP) نوعی تأخیرانداز استاندارد، بسیار مؤثر و پرکاربرد در جو بوده که برای بهبود کیفیت ضدشعله کامپوزیت‌های WPC استفاده شده است. از نظر بهبود اثربخشی تأخیرانداز شعله APP بر WPCها، موادی مانند صفحه‌های گرافن، SiO<sub>2</sub> یا CaCO<sub>3</sub> با APP ادغام شده‌اند تا مقاومت‌سازی مؤثر WPCها در برابر آتش به دست آید. استفاده از سایر افزودنی‌های معدنی مانند پودر آلومینیم و منیزیم سولفات گزارش شده است [۲۸].

### جذب آب

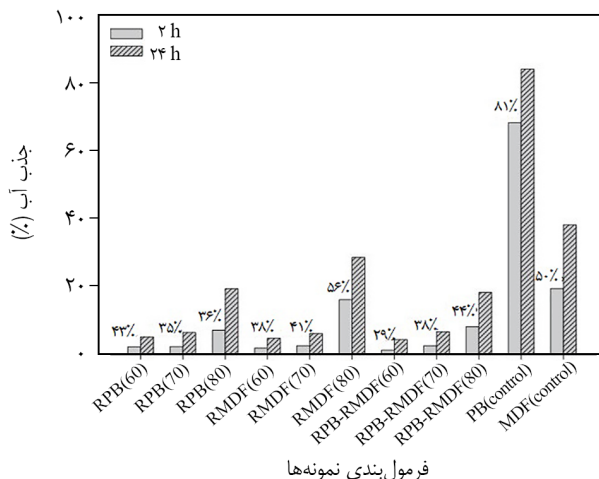
افزایش جذب آب WPCها می‌تواند دوام آن‌ها را به مقدار درخور توجهی کاهش دهد که باعث ناکارآمدی، به‌ویژه در کاربردهای خارجی می‌شود. همان‌طور که با روش زاویه تماس نشان داده شده، ترشوندگی نشانگر درجه نفوذپذیری رطوبت است. باین‌حال، پژوهش‌ها درباره جذب آب نشان می‌دهد، آب با چه سرعتی در مواد پخش و چه زمانی اشباع می‌شود. روش اندازه‌گیری جذب آب مطابق آزمون ASTM D 570 تعریف شده است که به‌موجب آن جذب آب به‌صورت درصد تغییر واقعی وزن نمونه طی زمان بیان می‌شود.

جدول ۶، مقدار جذب کامپوزیت‌های PP-بامبو را نشان می‌دهد. ظرفیت جذب آب در کامپوزیت‌های الیاف استخراجی با و بدون سازگارکننده با افزایش کسر حجمی الیاف افزایش می‌یابد. این مسئله به‌وضوح ناشی از وجود گروه هیدروکسیل و سایر گروه‌های قطبی در اجزای مختلف الیاف طبیعی است. جذب آب در کامپوزیت‌های دارای الیاف استخراجی با سازگارکننده نسبتاً کمتر است. دلیل آن است که ابتدا با عملکرد قلیایی، بخش درخور توجهی از اورونیک اسید، ترکیبی از همی سلولوز و سایر گروه‌های قطبی حذف شده و

افزون بر این، جذب آب نمونه‌های WPC با افزایش میزان الیاف افزایش یافت. با این حال، این مقدار جذب آب WPC در مقایسه با تخته‌های MDF و RPB نسبتاً کم بود. همچنین، می‌توان پیش‌بینی کرد، تفاوت میان جذب آب در مقادیر بیشتر الیاف افزایش می‌یابد. پلاستیک موجود در WPC آب‌گریز بوده، در حالی که رزین اوره فرمالدهید در تماس با آب بسیار حساس است. بنابراین، نقش چسب در RPB و MDF بکر در مقایسه با WPCها درخور توجه است.

### کاربردها

اولین کاربرد تجاری WPCها با دسته تعویض دنده برای خودروهای شرکت رولز رویس آغاز شد. کاربردهای غالب WPCها شامل صنایع ساختمانی، هوافضا و خودروسازی است. اما برای بسته‌بندی، تهیه لوازم مختلف خانگی، مبلمان، لوازم اداری و سایر موارد مرتبط نیز به‌کار می‌روند. در اکثر این کاربردها، آن‌ها به‌عنوان مواد سازه‌ای استفاده می‌شوند که ظرفیت تحمل بار تقویت‌کننده‌های برپایه چوب نقش بسزایی در آن‌ها دارد [۲۶]. کف‌پوش‌های چوبی به‌عنوان بیشترین حجم کاربرد WPCها در نظر گرفته می‌شود و کف‌پوش‌های چندلایه، پارکت و کف تخته‌ای جامد را دربرمی‌گیرد. عمده‌تاً گردو، افرا، بلوط قرمز و زبان‌گنجشک از انواع چوب‌های استفاده‌شده برای کف‌پوش‌های کامپوزیتی هستند. نرده‌ها، کاربردهای تجاری هستند که عمده‌تاً در مکان‌های مختلف مانند مراکز خرید، فروشگاه‌های بزرگ و فرودگاه‌ها برای بهبود استحکام، زیبایی و سهولت نگهداری نصب می‌شوند [۱۱]. لوازم ورزشی ساخته‌شده از WPCها شامل اسکی‌های چندلایه، کلاه ایمنی، قایق‌های موج سواری، راکت تنیس، چوب‌های گلف، هاکی و بیس‌بال است. در زمینه آلات موسیقی، WPCها برای ساخت سازهای فلوت و بادی و تخته‌های انگشتی سازهای زهی استفاده می‌شوند. از تمام مباحث پیش‌گفته می‌توان نتیجه گرفت،



شکل ۴- جذب آب کامپوزیت‌ها پس از ۲ و ۲۴ h غوطه‌وری در آب در دمای ۲۵ °C [۲۰].

باعث کاهش جذب رطوبت می‌شود. در مرحله بعد، وارد کردن MA-g-PP به‌دلیل استری شدن گروه‌های انیدرید آن با گروه‌های هیدروکسیل الیاف طبیعی، الیاف را آب‌گریزی می‌کند [۲۵].

در پژوهش دیگری، چهارمحالی و همکاران [۲۰]، مقدار جذب آب کامپوزیت‌های HDPE حاوی خاک اره ذرات بازیافتی با ۶۰ و ۷۰٪ وزنی را مطالعه کردند. به‌طور کلی، جذب آب به‌وسیله مواد کامپوزیتی به‌تخلخل، مقدار الیاف سلولوزی و دسترس‌پذیری آن‌ها برای آب ورودی بستگی دارد. شکل ۴، مقایسه میان جذب آب تخته‌های WPC پس از غوطه‌وری ۲ و ۲۴ h در دمای ۲۵ °C را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با افزایش زمان غوطه‌وری از ۲ h به ۲۴ h، جذب آب نیز افزایش می‌یابد. این واقعیت، نشانگر قابلیت بالقوه الیاف طبیعی برای جذب آب است. از آنجا که الیاف چوب در WPCها متخلخل‌اند، جذب آب کامپوزیت‌ها افزایش می‌یابد. مقادیر عددی در بالای ستون ۲ h نشان می‌دهد، مقدار آب جذب‌شده پس از ۲ h غوطه‌وری، چند درصد از کل آب جذب‌شده در ۲۴ h است.

جدول ۷- کاربردهای بالقوه کامپوزیت‌های پلاستیک-چوب [۶،۱۱].

ایالات متحده آمریکا (۲۰۱۵)	کشورهای اروپایی (۲۰۱۲)	جهان (۲۰۱۲)
عرشه (۴۳٪)	عرشه (۶۷٪)	محصولات مصرفی (۸٪)
قالب‌گیری-قطع‌های داخلی خودرو (۲۸٪)	قطع‌های داخلی خودرو (۲۳٪)	لوازم خانگی (۸٪)
نرده (۱۴٪)	کشتی‌نرده (۶٪)	اجزای الکترونیکی (۱۰٪)
ساختمان-سازه (۱۱٪)	کاربردهای فنی (۲۹٪)	هوافضا (۱٪)
سایر (۴۳٪)	مبلمان (۱۹٪)	دریایی (۱۲٪)
	کالا‌های مصرفی (۱٪)	ساختمان و سازه (۲۶٪)
		خودروسازی (۳۱٪)
		سایر (۴٪)

اسباب‌بازی، پارکت کف، گلدان، نیمکت پارک، میز پیک‌نیک و غیره) است. محصولات بر پایه WPC دارای قابلیت بالقوه بازار خوبی در آمریکای شمالی و اروپا با سرعت رشد سالانه ۱۸٪ و ۱۴٪ هستند. جدول ۷، کاربرد بالقوه جهانی WPC‌های موجود را نشان می‌دهد. شکل ۵، تعدادی از کاربردهای کامپوزیت‌های پلاستیک-چوب را نشان می‌دهد.

### نتیجه‌گیری

در دهه کنونی، تقاضا برای مواد کامپوزیتی بازیافت‌پذیر، سازگار با محیط زیست، کم‌هزینه با خواص مکانیکی و فیزیکی مناسب به میزان درخور توجهی افزایش یافته است. در این زمینه، کامپوزیت‌های پلیمری پر شده با ذرات چوب یا کامپوزیت‌های پلیمر-چوب (WPC) نظر پژوهشگران را جلب کرده است. این کامپوزیت‌ها به‌طور روزافزون در بسیاری از کاربردهای غیرسازه‌ای و سازه‌ای در صنایع ساختمان، خودروسازی، حمل‌ونقل، لوازم و تجهیزات خانگی و ورزشی به‌کار گرفته شده‌اند. در این مطالعه تلاش شد تا کامپوزیت‌های پلیمر-چوب و اجزای تشکیل‌دهنده آن به‌خوبی معرفی شوند. در ادامه نیز خواص مکانیکی، گرمایی و جذب آب آن‌ها نقد و بررسی شد. به‌طور کلی می‌توان گفت، در آینده نزدیک بخش مهمی از بازار محصولات کامپوزیتی به کامپوزیت‌های پلیمر-چوب به‌عنوان دسته جذابی از کامپوزیت‌های سبز و دوستدار محیط زیست اختصاص می‌یابد.

### مراجع

1. Wang H., Zhang X., Guo S., and Liu T., A Review of Coextruded Wood-Plastic Composites, *Polym. Compos.*, **42**, 4174-4186, 2021.
2. Teuber L., Osburg V.S., Toporowski W., Militz H., and Krause A., Wood Polymer Composites and their Contribution to Cascading Utilisation, *J. Clean. Product.*, **110**, 9-15, 2016.
3. Mazzanti V. and Mollica F., A Review of Wood Polymer Composites Rheology and Its Implications for Processing, *Polymers*, **12**, 2304-2327, 2020.
4. Fortini A. and Mazzanti V., Combined Effect of Water Uptake and Temperature on Wood Polymer Composites, *J. Appl. Polym. Sci.*, **135**, 46674-46683, 2018.
5. Mazzanti V. and Mollica F., Bending Properties of Wood Flour Filled Polyethylene in Wet Environment, *Proced. Eng.*, **200**, 68-72, 2017.
6. Schwarzkopf M.J. and Burnard M.D., Wood-Plastic Composites—Performance and Environmental Impacts, in *Environmental Impacts of Traditional and Innovative Forest-based Bioproducts*, 1<sup>st</sup> ed., 19-43, Springer, 2016.
7. Niska K.O. and Sain M., *Wood-Polymer Composites*, Woodhead, New York, USA, 10-20, 2008.
8. Friedrich D., Thermoplastic Moulding of Wood-Polymer Composites (WPC): A Review on Physical and Mechanical Behaviour under Hot-Pressing Technique, *Compos. Struct.*, **262**,



شکل ۵- کاربردهای کامپوزیت‌های پلاستیک-چوب [۱۱].

WPC‌ها عمدتاً در کاربردهای کم‌چگالی و متوسط در طیف وسیع‌تری استفاده می‌شوند [۱۱، ۲۶]. کاربردهای خاص WPC شامل ساخت انواع مختلف قطعات خودرو (به‌عنوان مثال داشبورد، دیواره درب، صندوق عقب، صفحه‌های عایق صدا، پوشش صندوق عقب، پوشش موتور، سپر، گلگیر، جعبه چرخ، دستگیره، آفتاب‌گیر و غیره)، پوشش لوازم الکترونیکی و الکتریکی (مانند لپ‌تاپ، موبایل، مبدل، پروژکتور، تثبیت‌کننده‌ها و غیره)، سایر لوازم خانگی (مانند صندوق پستی،

- 113649-113662, 2021.
9. Clemons C., Wood-Plastic Composites in the United States: The Interfacing of Two Industries, *Forest Product. J.*, **52**, 10-18, 2002.
  10. Klyosov A.A., *Wood-Plastic Composites*, John Wiley and Sons, USA, 1-49, 2007.
  11. Khan M.Z., Srivastava S.K., and Gupta M.A., State-of-the-Art Review on Particulate Wood Polymer Composites: Processing, Properties and Applications, *Polym. Test.*, **89**, 106721-106768, 2020.
  12. Pettersen R.C., The Chemical Composition of Wood, *Chem. Solid Wood*, **207**, 57-126, 1984.
  13. Bledzki A.K., Sperber V.E., and Faruk O., *Natural and Wood Fibre Reinforcement in Polymers*, iSmithers Rapra, United Kingdom, 4-15, 2002.
  14. Stokke D.D. and Gardner D.J., Fundamental Aspects of Wood as a Component of Thermoplastic Composites, *J. Vinyl. Addit. Tech.*, **9**, 96-104, 2003.
  15. Simpson W. and Tenwolde A., *The Encyclopedia of Wood.*, Skyhorse, Wisconsin, USA, 1-23, 2007.
  16. Rowell R.M., *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*, Taylor and Francis, New York, USA, 305-343, 2005.
  17. Poletto M., Zattera A.J., Forte M.M.C., and Santana R.M.C., Thermal Decomposition of Wood: Influence of Wood Components and Cellulose Crystallite Size, *Bioresource. Tech.*, **109**, 148-153, 2012.
  18. Yang H., Yan R., Chen H., Zheng C., Lee D.H., and Liang D.T., In-Depth Investigation of Biomass Pyrolysis Based on Three Major Components: Hemicellulose, Cellulose and Lignin, *Energ. Fuel.*, **20**, 388-393, 2006.
  19. Nourbakhsh A., Karegarfard A., Ashori A., and Nourbakhsh A., Effects of Particle Size and Coupling Agent Concentration on Mechanical Properties of Particulate-Filled Polymer Composites, *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, **23**, 169-174, 2010.
  20. Chaharmahali M., Mirbagheri J., Tajvidi M., Najafi S.K., and Mirbagheri Y., Mechanical and Physical Properties of Wood-Plastic Composite Panels, *J. Reinforced Plast. Compos.*, **29**, 310-319, 2010.
  21. Pérez E., Famá L., Pardo S.G., Abad M.J., and Bernal C., Tensile and Fracture Behaviour of PP/Wood Flour Composites, *Compos. Part B: Eng.*, **43**, 2795-2800, 2012.
  22. Ge X., Li X., and Meng Y., Tensile Properties, Morphology, and Thermal Behavior of PVC Composites Containing Pine Flour and Bamboo Flour, *J. Appl. Polym. Sci.*, **93**, 1804-1811, 2004.
  23. Ojha S., Raghavendra G., and Acharya S., A Comparative Investigation of Bio Waste Filler (Wood Apple-Coconut) Reinforced Polymer Composites, *Polym. Compos.*, **35**, 180-185, 2014.
  24. Lette M.J., Ly E.B., Ndiaye D., Takasaki A., and Okabe T., Evaluation of Sawdust and Rice Husks as Fillers for Phenolic Resin Based Wood-Polymer Composites, *Open J. Compos. Mat.*, **8**, 124-137, 2018.
  25. Chattopadhyay S.K., Khandal R.K., Uppaluri R., and Ghoshal A.K., Bamboo Fiber Reinforced Polypropylene Composites and Their Mechanical, Thermal, and Morphological Properties, *J. Appl. Polym. Sci.*, **119**, 1619-1626, 2011.
  26. Ramesh M., Rajeshkumar L., Sasikala G., Balaji D., Saravanakumar A., Bhuvanewari V., and Bhoopathi R., A Critical Review on Wood-Based Polymer Composites: Processing, Properties, and Prospects, *Polymers*, **14**, 589-624, 2022.
  27. Bakar M.A., Ishak Z.M., Taib R.M., Rozman H., and Jani S.M., Flammability and Mechanical Properties of Wood Flour-Filled Polypropylene Composites, *J. Appl. Polym. Sci.*, **116**, 2714-2722, 2010.
  28. Kratofil K.L., Katančić Z., Marić G., and Hrnjak-Murgić Z., Study of Fire Retardancy and Thermal and Mechanical Properties of HDPE-Wood Composites, *J. Wood. Chem. Tech.*, **35**, 412-423, 2015.