

## (OPEN ACCESS)

### The Role of Nano Calcium Carbonate in Improving the Mechanical Properties of Poplar Wood Flour and Recycled Polypropylene Nanocomposites

Alireza Khakifirooz<sup>1\*</sup>, Ahmad Samariha<sup>2</sup>  and Hirs Jouya <sup>2</sup> 

1\*- Corresponding author, Chemistry and Prtrochemistry Research Center, Cellulosic Materials and Packaging

Research Group, Standard research Center (SRI), Karaj, Iran, Email: khakifirooznaci@gmail.com

2- Department of Engineering Sciences, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

#### Article Info

#### ABSTRACT

##### Article type:

Full Length Research Paper

##### Article history:

Received: 7 June 2025

Revised: 28 July 2025

Accepted: 09 August 2025

Published online: 19

December 2025

##### Keywords:

Poplar,  
nano calcium carbonate,  
flexural strength,  
flexural modulus,  
hardness.

**Background and objectives:** Given the increasing use of nanocomposites in various industries, improving the mechanical and physical properties of these products is of particular importance. Nano calcium carbonate as an effective reinforcing agent can help improve the performance of poplar flour and recycled polypropylene nanocomposites. This research investigates the effect of the dosage of calcium carbonate nanoparticles in the nanocomposite mixturr on the mechanical properties of these nanocomposites. The main objective of this research is to evaluate the effects of the size and amount of nano-calcium carbonate on the modulus of elasticity, tensile strength, and other mechanical properties of nanocomposites. The results of this study can help develop lightweight and durable products in the packaging, automotive, and other industries, and provide a solution for the optimal use of recycled materials.

**Methodology:** For this purpose, polypropylene (at three levels of 50, 60, and 70%), poplar wood flour (at three levels of 30, 40, and 50%), nano calcium carbonate (at four levels of 0, 1, 2, and 3% by weight), and maleic anhydride grafted polypropylene at a fixed level of 3% were mixed using a twin-screw extruder, and standard test specimens were made using injection molding. Then, mechanical properties including tensile and bending strength, tensile and bending modulus, impact strength, and hardness were measured.

**Results:** The results related to the F-value and significance level showed that the effect of wood flour content on mechanical properties including tensile and bending strength, tensile and bending modulus, impact strength, and hardness was significant at a confidence level of 95%. Additionally, the effect of nano calcium carbonate on tensile and bending strength, bending modulus, and hardness was also significant at 95% confidence level, while bending modulus and impact resistance were not significant at this level. The interaction effect of flour amount and nano calcium carbonate was not significant on all strength

at the 95% confidence level.

**Conclusion:** The results of this research show that increasing poplar wood flour from 30 to 50 percent has a significant effect on the mechanical properties of nanocomposites, especially increasing tensile and bending strength, tensile and bending modulus, and hardness. This improvement is due to increased adhesion and stress transfer between phases. However, increasing the amount of flour leads to a decrease in impact resistance and greater brittleness of the composite. Adding up to 3% by weight of nano calcium carbonate also improved the mechanical properties, but similar to flour, the impact resistance decreased. Overall, the appropriate selection of the type and number of additives can help improve the performance of nanocomposites, but it is also essential to pay attention to negative effects such as reduced impact resistance.

**Cite this article:** Alireza Khakifirooz, Ahmad Samariha and Hirsia Jouya Ardekani. 2025. The Role of Nano Calcium Carbonate in Improving the Mechanical Properties of Poplar Wood Flour and Recycled Polypropylene Nanocomposites. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 40(4), 297-309. [DOI: http://doi.org/10.22092/ijwpr.2025.369762.1807](http://doi.org/10.22092/ijwpr.2025.369762.1807)



Copyright: © 2025 by the authors. This is an open access, peer-reviewed article published by Research Institute of Forests and Rangelands (<http://ijwpr.areeo.ac.ir/>) and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

## نقش نانو کربنات کلسیم در بهبود ویژگی‌های مکانیکی نانو کامپوزیت‌های آرد صنوبر و پلی‌پروپیلن بازیافتی

علیرضا خاکی فیروز<sup>۱\*</sup>، احمد ثمریها<sup>۲</sup> و هیرسا جويا<sup>۲</sup>

<sup>۱\*</sup> - نویسنده مسئول، پژوهشکده شیمی و پتروشیمی، گروه پژوهشی بسته‌بندی و سلولزی، پژوهشگاه استاندارد، کرج، ایران،

پست الکترونیک: khakifirooznaci@gmail.com

<sup>۲</sup> - گروه علوم مهندسی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

| اطلاعات مقاله             | چکیده                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| نوع مقاله:                | بیان مسئله و اهداف: باتوجه به افزایش روزافزون استفاده از نانو کامپوزیت‌ها در صنایع مختلف، بهبود ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی این فراورده‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. نانو کربنات کلسیم به‌عنوان یک تقویت‌کننده مؤثر می‌تواند به بهبود عملکرد نانو کامپوزیت‌های آرد صنوبر و پلی‌پروپیلن بازیافتی کمک کند. این پژوهش به بررسی تأثیر میزان نانو کربنات کلسیم بر خواص مکانیکی این نانو کامپوزیت‌ها می‌پردازد. هدف اصلی این تحقیق، ارزیابی تأثیرات اندازه و مقدار نانو کربنات کلسیم بر مدول الاستیسیته، مقاومت کششی و سایر ویژگی‌های مکانیکی نانو کامپوزیت‌ها است. نتایج این مطالعه می‌تواند به توسعه فراورده‌های سبک و مقاوم در صنایع بسته‌بندی، خودروسازی و دیگر حوزه‌ها کمک کند و راهکاری برای استفاده بهینه از مواد بازیافتی ارائه دهد. |
| تاریخ‌های مقاله:          | مواد و روش‌ها: برای این منظور پلی‌پروپیلن (در سه سطح ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درصد)، آرد چوب صنوبر (در سه سطح ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد)، نانو کربنات کلسیم (در چهار سطح ۰، ۱، ۲ و ۳ درصد وزنی) و انیدرید مالئیک پیوند داده شده با پلی‌پروپیلن در سطح ثابت ۳ درصد، به‌وسیله اکسترودر دو ماردونی (دو ماریچه) با یکدیگر مخلوط و نمونه‌های آزمونی استاندارد با استفاده از روش قالب‌گیری تزریقی ساخته شدند. سپس خواص مکانیکی شامل مقاومت کششی و خمشی، مدول کششی و خمشی، مقاومت به ضربه فاق‌دار، و سختی، اندازه‌گیری شدند.                                                                                                                                                                                                                                 |
| تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۷  | نتایج: نتایج مربوط به مقدار F و سطح معنی‌داری نشان داد اثر مقدار آرد چوب بر ویژگی‌های مکانیکی شامل مقاومت کششی، خمشی، مدول کششی و خمشی، مقاومت به ضربه فاق‌دار، و سختی، در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار گردید. همچنین، اثر نانو کربنات کلسیم بر مقاومت کششی و خمشی، مدول خمشی، و سختی نیز در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار بود، درحالی‌که مدول خمشی، مقاومت به ضربه فاق‌دار در این سطح معنی‌دار نشدند. اثر متقابل مقدار آرد و نانو کربنات کلسیم بر تمامی مقاومت‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار نبود.                                                                                                                                                                                                                         |
| تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۰۶ | نتیجه‌گیری: نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که افزایش آرد چوب صنوبر از ۳۰ به ۵۰ درصد تأثیر قابل‌توجهی بر خواص مکانیکی نانو کامپوزیت‌ها دارد، به‌ویژه در افزایش مقاومت کششی و خمشی، مدول کششی، خمشی و سختی. این بهبود به دلیل افزایش چسبندگی و انتقال تنش بین مراحل است. با این حال، افزایش مقدار آرد منجر به کاهش مقاومت به ضربه و تردی بیشتر کامپوزیت می‌شود. اضافه کردن نانو کربنات کلسیم تا ۳ درصد وزنی نیز خواص مکانیکی را بهبود می‌بخشد، اما مشابه با آرد، مقاومت به ضربه کاهش می‌یابد. به‌طورکلی، انتخاب مناسب نوع و مقدار مواد افزودنی می‌تواند به بهبود عملکرد نانو کامپوزیت‌ها کمک کند، اما توجه به آثار منفی مانند کاهش مقاومت به ضربه نیز ضروریست.                                                                       |
| تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۸   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۲۸  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| واژه‌های کلیدی:           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| صنوبر،                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| نانو کربنات کلسیم،        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| مقاومت خمشی،              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| مدول خمشی،                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| سختی.                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

استناد: علیرضا خاکی فیروز، احمد ثمریها و هیرسا جويا اردکانی. ۱۴۰۴. نقش نانو کربنات کلسیم در بهبود ویژگی‌های مکانیکی نانو کامپوزیت‌های آرد

صنوبر و پلی‌پروپیلن بازیافتی. نشریه تحقیقات علوم چوب و کاغذ ایران، ۴۰(۴)، ۲۹۷-۳۰۹.

DOI: <http://doi.org/10.22092/ijwpr.2025.369762.1807>

## مقدمه

کامپوزیت به فرآورده ای اطلاق می شود که از یک یا چند مرحله ناپیوسته درون یک مرحله پیوسته تشکیل شده است. در این ساختار، مرحله پیوسته به عنوان ماده زمینه یا ماتریس شناخته می شود. مرحله ناپیوسته معمولاً دارای سختی و استحکام بیشتری نسبت به مرحله پیوسته است و به عنوان تقویت کننده شناخته می شود (Ahmadi et al., 2015). صنوبر (Populus) به عنوان یک گونه درختی سریع الرشد شناخته می شود که به دلیل خواص مکانیکی و زیست محیطی آن، در صنعت چوب و صنایع وابسته کاربردهای فراوانی دارد. الیاف صنوبر به عنوان یک منبع تجدیدپذیر و طبیعی، به بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت ها کمک می کنند (Xu et al., 2022). مرحله تقویت کننده نقش قابل توجهی در بهبود خواص مکانیکی فرآورده کامپوزیت ایفا می کند. از سوی دیگر، مرحله زمینه یا ماتریس در این فرآورده ها، مسئول انتقال نیرو به مرحله تقویت کننده، مقاومت در برابر حرارت و حفاظت در برابر عوامل شیمیایی است.

به طور کلی، الیاف طبیعی به عنوان تقویت کننده برای پلاستیک های گرماسخت و گرم انرم بسیار مناسب هستند. این فرآورده به دلیل ویژگی های خود شامل سبک بودن، مقاومت بالا در برابر سایش، ایمنی و فراوانی، گزینه ای مقرون به صرفه به شمار می روند (Arjmandi et al., 2015).

پلی پروپیلن به دلیل ویژگی های مطلوب خود از جمله سختی، مقاومت شیمیایی، گرمایی و مکانیکی، نفوذناپذیری و بی اثر بودن بر مواد غذایی، مورد توجه قرار گرفته است. این پلیمر همچنین قابلیت کاربرد در دماهای بالا را داراست. ترکیب این خواص با هزینه مناسب، پلی پروپیلن را به گزینه ای ایده آل برای مصارف مختلف در فرایندهای شکل دهی گرمایی تبدیل کرده است (Hossain et al., 2024). به ویژه در صنایع بسته بندی، خودروسازی، کشاورزی و دارویی، این ماده به عنوان جایگزینی مناسب برای پلیمرهای دیگر مانند آکریلونیتریل بوتادین استایرن (Acrylonitrile (ABS) و پلی وینیل کلرید (PVC) و

پلی استایرن (Polyvinyl Chloride) (PS) شناخته می شود (Brebu, 2020).

اندازه مرحله تقویت کننده به افزایش سطح تماس میان ماتریس و تقویت کننده منجر می شود و مراکز تمرکز تنش را کاهش می دهد. این موضوع در نهایت منجر به بهبود خواص مکانیکی و کارایی کامپوزیت خواهد شد (Kiss et al., 2007).

کلسیت طبیعی یکی از قدیمی ترین پودرها است و کربنات کلسیم رسوب شده تقریباً یک قرن پیش به طور صنعتی تولید شد (Tan et al., 2020). نانو کربنات کلسیم، به دلیل اندازه نانومتری خود، دارای ویژگی های خاصی از جمله افزایش سطح تماس و بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت ها است. تحقیقات نشان داده اند که نانو کربنات کلسیم می تواند به عنوان یک تقویت کننده مؤثر در بهبود مدول کششی و مقاومت ضربه ای کامپوزیت ها عمل کند (Maurya et al., 2014). مزایای این ماده شامل ارزان بودن، در دسترس بودن، سبک بودن، سهولت در پوشش دهی سطحی، تولید آسان و قابلیت تحمل بار بالا است که موجب کاربرد وسیع آن به عنوان تقویت کننده در صنایع مختلف می شود (Durukan et al., 2023). تحقیقات متعددی در زمینه کامپوزیت ها و ترکیبات آن ها انجام شده است. برخی از مطالعات نشان داده اند که استفاده از الیاف طبیعی مانند صنوبر، می تواند به طور قابل توجهی خواص مکانیکی کامپوزیت ها را بهبود ببخشد. استفاده از الیاف صنوبر در کامپوزیت های پایه پلی پروپیلن، منجر به افزایش مدول الاستیسیته و مقاومت کششی می شود (Maurya et al., 2014). علاوه بر این، تحقیقات انجام شده توسط (Mirzaei et al., 2021) بر روی پلی پروپیلن نشان می دهد که افزودن نانو ذرات به این پلیمر می تواند به بهبود خواص مکانیکی و حرارتی آن منجر شود. این موضوع به ویژه در صنعت بسته بندی و خودروسازی حائز اهمیت است، زیرا خواص مکانیکی مطلوب و وزن سبک این کامپوزیت ها می تواند کارایی و عملکرد محصولات نهایی را افزایش دهد. همچنین، نتایج بررسی های مربوط به خواص

دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه ذوب و گرانول گردید.

#### سازگارکننده

مالئیک انیدرید پیوند خورده با پلی‌پروپیلن، محصول شرکت Priex، با دانسیته  $0.95 \text{ g/cm}^3$  و شاخص جریان مذاب ۶۴  $\text{g/10 min}$  و مقدار انیدرید پیوند خورده ۱٪ به‌عنوان عامل سازگارکننده استفاده شد.

#### نانو کربنات کلسیم

پودر نانو کربنات کلسیم تولیدشده توسط شرکت Elements از کشور آمریکا با ابعاد ۴۰-۱۵ نانومتر و خلوص ۹۹/۹ درصد تهیه شد.

#### روش‌ها

مواد مورد استفاده با کمک دستگاه اکسترودر دو مارپیچه همسوگرد (مدل کولین) مخلوط شدند. مناطق حرارتی اکسترودر به ترتیب ۱۶۵، ۱۷۰، ۱۷۵ و ۱۸۰ درجه سلسیوس برای نواحی ۱ تا ۴ اختصاص یافت. سرعت دورانی مارپیچ بر روی ۶۰ دور در دقیقه تنظیم شد. مواد مخلوط شده پس از خروج از دستگاه اکسترودر، در دستگاه گرانول ساز مدل Wieser به گرانول تبدیل شدند. به‌منظور جلوگیری از هر گونه اثر منفی رطوبت، ذرات گرانول در دمای ۸۵ درجه سلسیوس با استفاده از دستگاه خشک‌کن خشک شدند.

ذرات گرانول به‌دست‌آمده، بعد با استفاده از دستگاه قالب‌گیری تزریقی در دمای ۱۷۰ درجه سلسیوس، با سرعت ۶۰ دور در دقیقه و فشار ۱۰۰ مگاپاسکال طبق استاندارد [ASTM D3641](#)، به نمونه‌های آزمونی برای آزمایش‌های ضربه، خمش، کشش و سختی تبدیل شدند. پس از عملیات قالب‌گیری، نمونه‌های دمبلی شکل (برای آزمون کشش)، ساده (برای آزمون خمش) و شکاف‌دار (برای آزمون ضربه) تهیه شدند و مطابق با استانداردهای [ASTM D638](#)، [ASTM D790](#)، [ASTM D256](#) و [ASTM D2240](#) آزمون گردید. نتایج ارائه شده میانگین حداقل ۳ نمونه برای هر تیمار است.

مکانیکی نانو کامپوزیت‌های پلی‌پروپیلن/ کربنات کلسیم نشان می‌دهد که با افزایش میزان نانو ذرات، مدول کششی افزایش‌یافته و درعین‌حال، مقاومت کششی کاهش می‌یابد ([Sanvezzo & Branciforti, 2021](#)). بررسی خواص مکانیکی و فیزیکی کامپوزیت‌های حاوی کلسیت طبیعی نشان داد که این ماده به دلیل ویژگی‌های خاص خود، می‌تواند به‌عنوان یک تقویت‌کننده مؤثر در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گیرد ([He et al., 2011](#)). درنهایت، تأثیر ترکیب الیاف طبیعی و نانو ذرات در بهبود خواص مکانیکی و حرارتی کامپوزیت‌ها، به‌ویژه در زمینه‌های صنعتی و زیست‌محیطی، نیاز به پژوهش‌های بیشتری دارد. این پژوهش‌ها می‌توانند به توسعه مواد جدید و بهبود کارایی محصولات نهایی کمک کنند. هدف این پژوهش، بررسی تأثیر میزان نانو کربنات کلسیم بر ویژگی‌های مکانیکی نانو کامپوزیتی است که از آرد صنوبر و پلی‌پروپیلن ضایعاتی ساخته‌شده است.

#### مواد و روش‌ها

در این بررسی، مقدار آرد صنوبر در سه سطح (۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد (phc) (Per Hundred Component) و ذرات نانو کربنات کلسیم در چهار سطح (۰، ۱، ۲ و ۳ درصد (phc)) آزمایش شد.

#### تقویت‌کننده

آرد صنوبر به‌عنوان تقویت‌کننده پودری در ماتریس پلیمری از یک کارخانه چوب‌بری تأمین شد و پس از طبقه‌بندی با دستگاه الک ارتعاشی، آرد عبور کرده از الک با مش ۷۰ و باقیمانده با الک مش ۸۰ به‌عنوان تقویت‌کننده استفاده گردید. نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای  $100 \pm 3$  درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت قرار گرفتند.

#### مواد پلیمری

پلی‌پروپیلن با دانسیته  $0.952 \text{ g/cm}^3$  و شاخص جریان مذاب ۱۶  $\text{g/10 min}$  از شرکت بازرگانی پتروشیمی اراک تأمین شد و با استفاده از یک اکسترودر دو مارپیچه، تحت

## تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل نتایج آزمون‌های مکانیکی با استفاده از طرح آماری کاملاً تصادفی و به صورت آزمون فاکتوریل انجام شد. این تحلیل با استفاده از نرم افزار SPSS انجام گردید و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح اعتماد ۹۵ درصد استفاده شد.

## نتایج

در این بررسی، نتایج مربوط به مقدار F و سطح معنی داری در جدول ۱ ارائه شده است. اثر مقدار آرد چوب بر ویژگی‌های مکانیکی شامل مقاومت کششی، خمش، مدول کششی و خمشی، مقاومت به

ضربه فاقدار و سختی، در سطح اعتماد ۹۵ درصد معنی دار گردید.

همچنین، اثر نانو کربنات کلسیم بر مقاومت کششی و خمشی، مدول خمشی و سختی نیز در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی دار بود، در حالی که مدول خمشی و مقاومت به ضربه فاقدار در این سطح معنی دار نشدند.

اثر متقابل مقدار آرد و نانو کربنات کلسیم بر تمامی مقاومت‌ها در سطح اعتماد ۹۵ درصد معنی دار نبود.

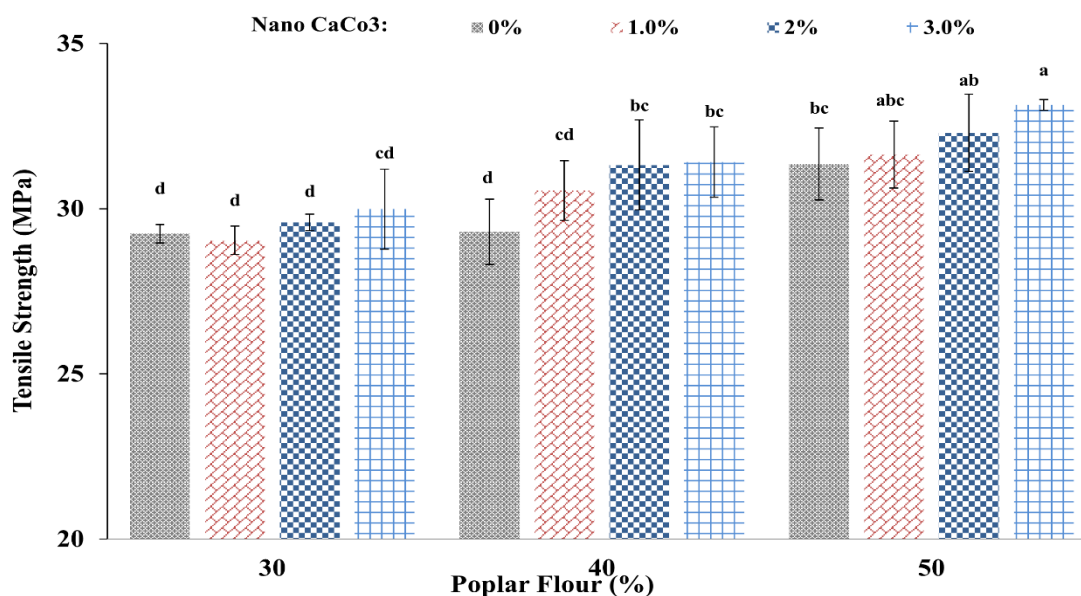
شکل‌های ۱ تا ۶، اثر مقدار آرد و نانو کربنات کلسیم بر ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی نانو کامپوزیت را نشان می‌دهد.

جدول ۱- تجزیه واریانس (مقدار F و سطح معنی داری) نتایج نانو کامپوزیت آرد صنوبر / پلی پروپیلن ضایعاتی و نانو کربنات کلسیم  
Table 1- analysis of variance (F value and significance level) nano-composite results flour poplar / polypropylene waste and nano calcium carbonate

| Variable Properties | Tensile Strength | Tensile Modulus     | Flexural Strength   | Flexural Modulus    | Impact Strength     | Hardness           |
|---------------------|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| WF                  | 24.222*          | 21.145*             | 43.367*             | 201.765*            | 720.346*            | 31.588*            |
| NCC                 | 6.645*           | 1.852ns             | 4.448*              | 33.268*             | 2.127ns             | 9.439*             |
| WF*NCC              | 0.632ns          | 0.038 <sup>ns</sup> | 0.430 <sup>ns</sup> | 1.435 <sup>ns</sup> | 0.546 <sup>ns</sup> | 0.36 <sup>ns</sup> |

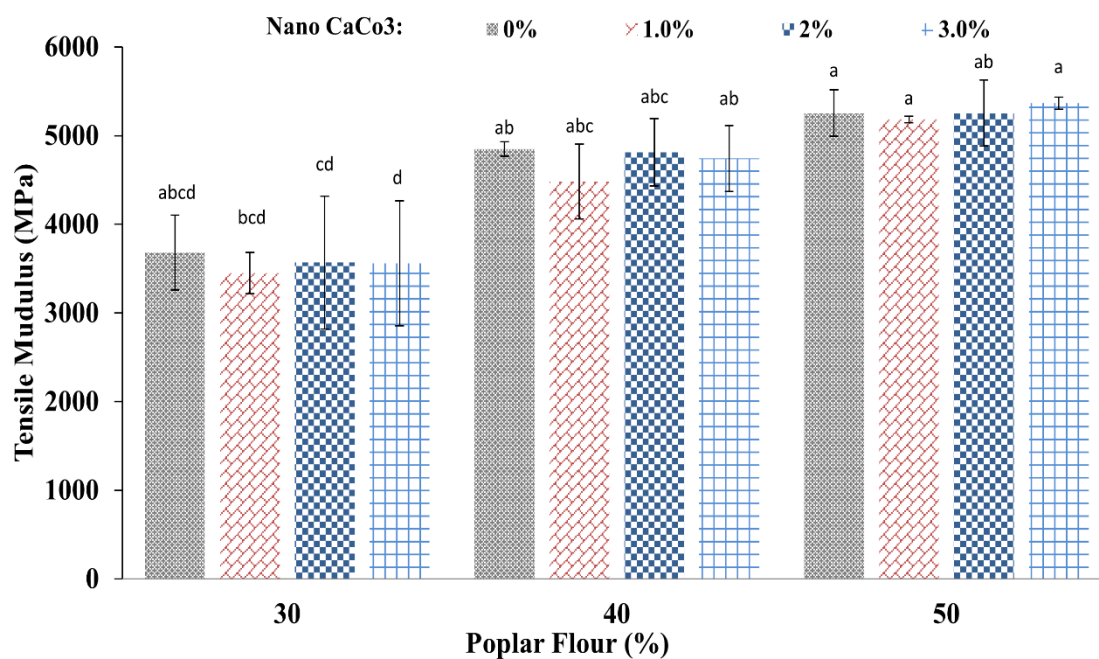
WF: Wood Flour, NCC: Nano Calcium Carbonate

Significance level: \* 95%, ns: not significant



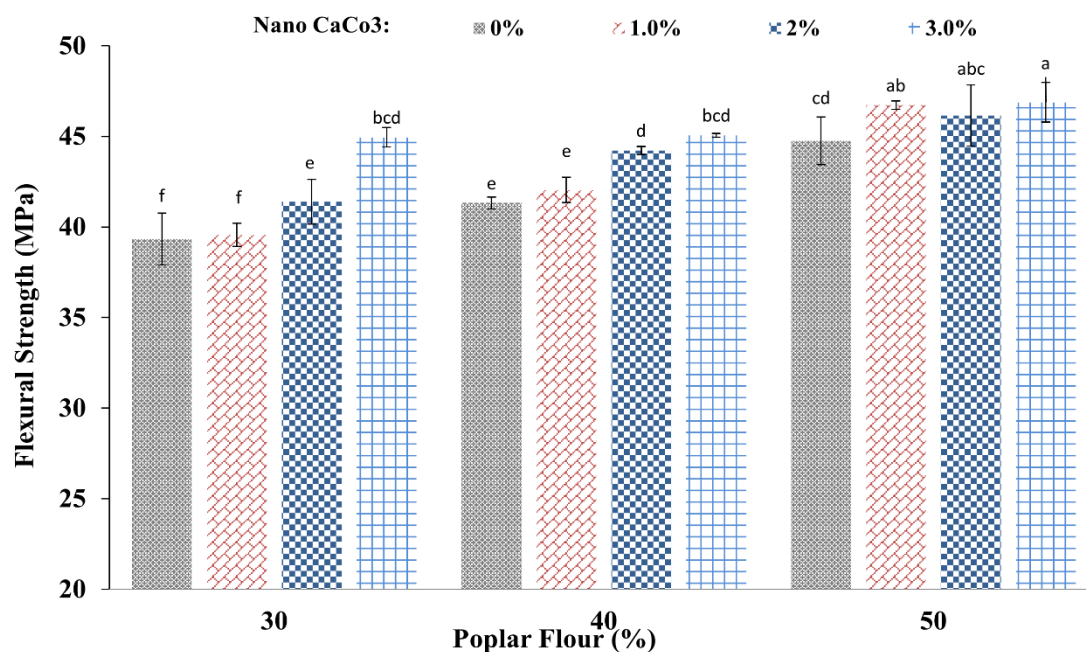
شکل ۱ - تأثیر وضعیت نانو کامپوزیت بر مقاومت کششی آرد چوب، پلی پروپیلن بازیافتی و نانو کربنات کلسیم

Figure 1. Effect of nanocomposite condition on Tensile Strength of the wood flour/rPP/nanoCaCO3



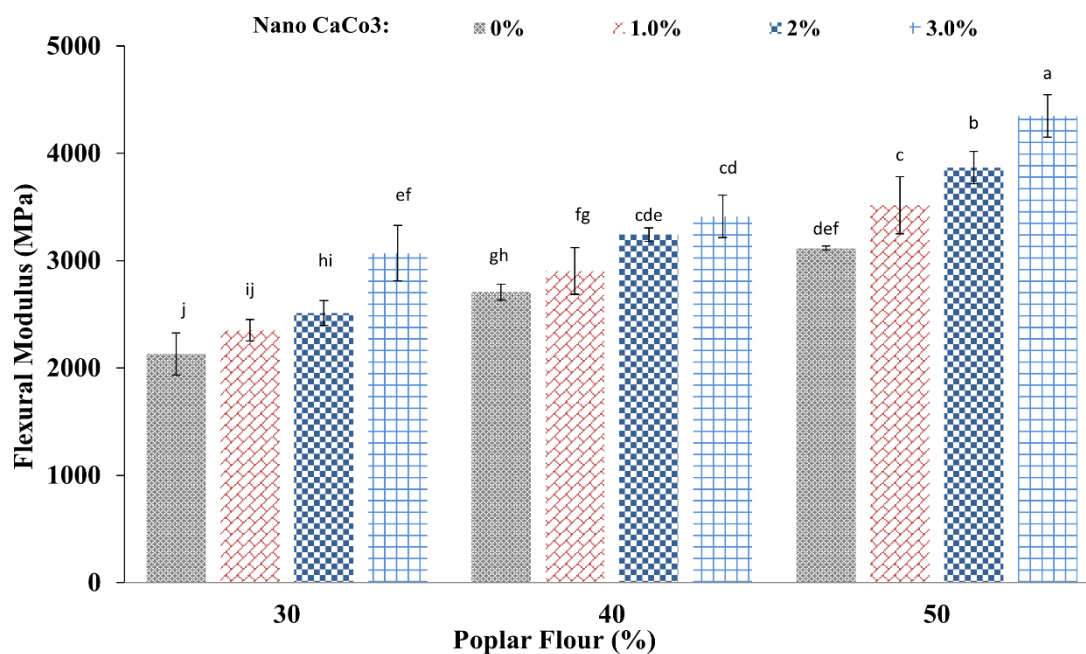
شکل ۲ - تأثیر وضعیت نانو کامپوزیت بر مدول کششی آرد چوب، پلی پروپیلن بازیافتی و نانو کربنات کلسیم

Figure 2. Effect of nanocomposite condition on Tensile Modulus of the wood flour/rPP/nanoCaCO<sub>3</sub>



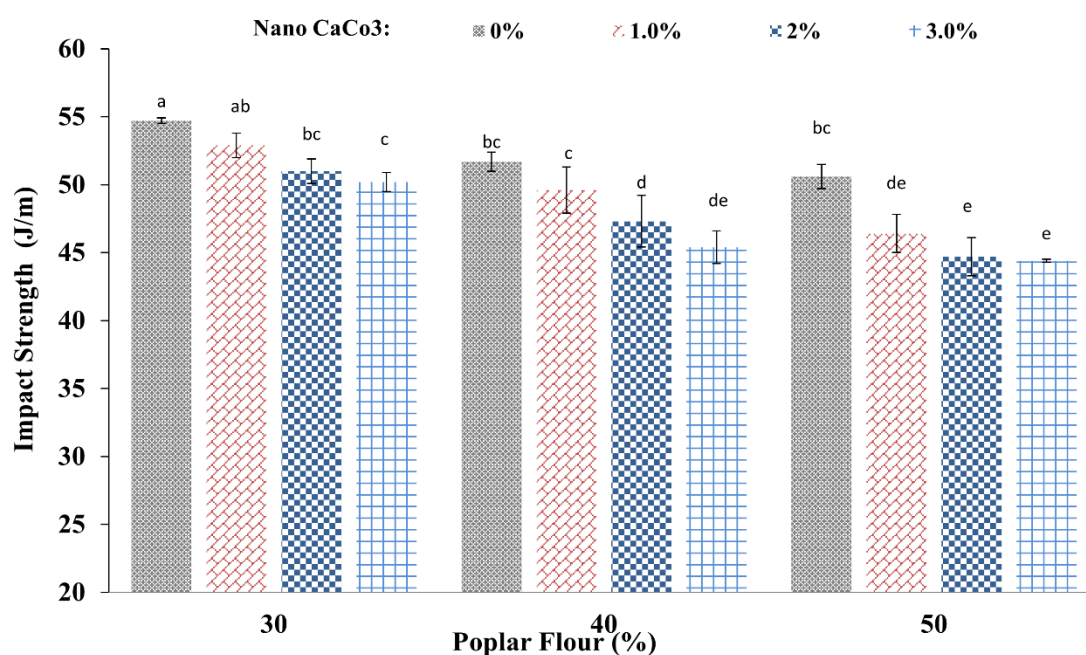
شکل ۳ - تأثیر وضعیت نانو کامپوزیت بر مقاومت خمشی آرد چوب، پلی پروپیلن بازیافتی و نانو کربنات کلسیم

Figure 3. Effect of nanocomposite condition on Flexural Strength of the wood flour/rPP/nanoCaCO<sub>3</sub>



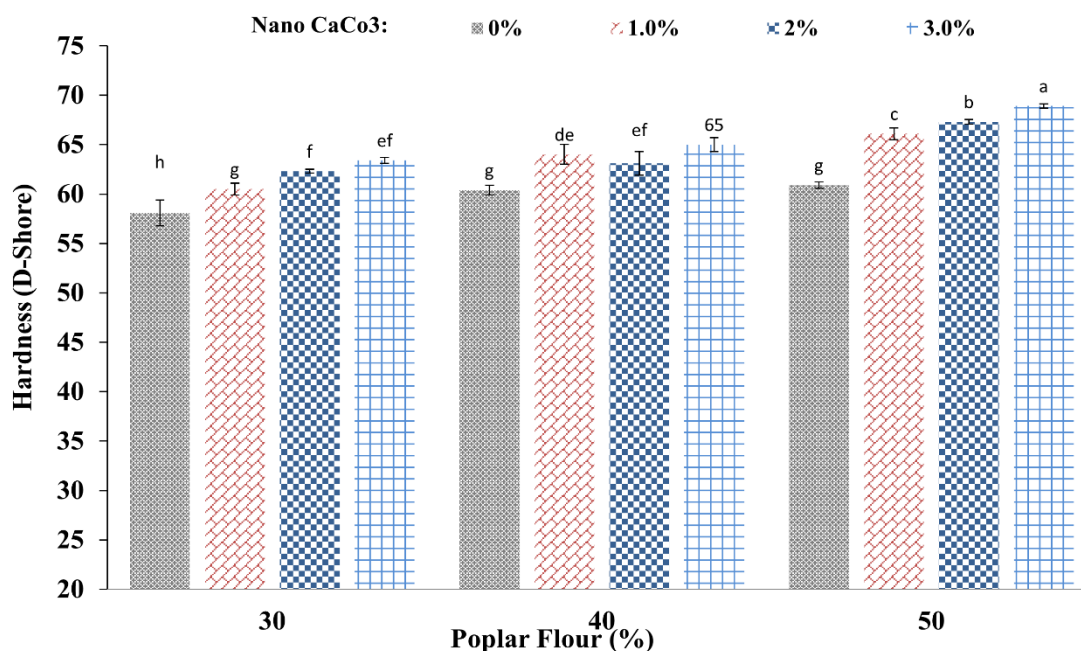
شکل ۴ - تأثیر وضعیت نانو کامپوزیت بر مدول خمشی آرد چوب، پلی پروپیلن بازیافتی و نانو کربنات کلسیم

Figure 4. Effect of nanocomposite condition on Flexural Modulus of the wood flour/rPP/nanoCaCO<sub>3</sub>



شکل ۵ - تأثیر وضعیت نانو کامپوزیت بر مقاومت به ضربه آرد چوب، پلی پروپیلن بازیافتی و نانو کربنات کلسیم

Figure 5. Effect of nanocomposite condition on Impact Strength of the wood flour/rPP/nanoCaCO<sub>3</sub>



شکل ۶ - تأثیر وضعیت نانو کامپوزیت بر سفتی آرد چوب، پلی پروپیلن بازیافتی و نانو کربنات کلسیم

Figure 6. Effect of nanocomposite condition on Hardness of the wood flour/rPP/nanoCaCO<sub>3</sub>

## بحث

### تأثیر مقدار آرد صنوبر بر مقاومت کششی و خمشی

نتایج نشان داد که با افزایش مقدار آرد چوب صنوبر از ۳۰ به ۵۰ درصد، مقاومت کششی و خمشی کامپوزیت افزایش یافت. مقاومت‌های مکانیکی کامپوزیت‌ها به شدت به کیفیت سطح مشترک بین دو مرحله کامپوزیت وابسته است. انتقال تنش از ماده زمینه به مرحله تقویت‌کننده از طریق این ناحیه انجام می‌شود. به عبارت دیگر، مرحله ماتریس نقش کلیدی در نگهداری از ماده پرکننده و تقویت‌کننده ایفا می‌کند و انتقال نیرو به مرحله ثانویه تقویت‌کننده ماتریس است. بنابراین، با افزایش درصد ماده تقویت‌کننده، میزان تنش قابل تحمل کامپوزیت به دلیل وجود تقویت‌کننده افزایش می‌یابد (Balla et al., 2019). به همین دلیل، با افزایش مقدار آرد چوب از ۳۰ به ۵۰ درصد، مقاومت کششی و خمشی افزایش یافته است. این نتایج با یافته‌های (Núñez-Decap et al., 2021) و (Bahlouli et al., 2023) همخوانی دارد. در زمان تنش کششی، انتقال بار بین ماتریس

و ذرات پرکننده به صورت برشی در سطح مشترک ماتریس و ذرات پرکننده ایجاد می‌شود. از این رو، سطح مشترک بین ذرات پرکننده و ماتریس باید قادر باشد این انتقال را به نحو مطلوبی انجام دهد (Lopez-Ramirez et al., 2023). این نکته حائز اهمیت است که کیفیت و ویژگی‌های سطحی این ناحیه می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر کارایی کلی کامپوزیت داشته باشد.

### تأثیر مقدار آرد صنوبر بر مدول کششی و خمشی

نتایج نشان داد که با افزایش مقدار آرد چوب صنوبر از ۳۰ به ۵۰ درصد، مدول کششی و خمشی کامپوزیت افزایش یافت. از آنجاکه بین مدول الاستیسیته کامپوزیت‌ها و مدول اجزای تشکیل‌دهنده آن‌ها رابطه مستقیمی وجود دارد، با در نظر گرفتن مدول الاستیسیته بالاتر مواد لیگنوسولزی، شاهد افزایش مدول الاستیسیته در کامپوزیت خواهیم بود (Khakifirouz et al., 2019). با توجه به اینکه مواد سلولزی دارای مدول کششی نسبتاً بالایی هستند، این توانایی می‌تواند به بهبود مدول کششی کامپوزیت کمک کند

لیگنوسلولزی در ترکیب کامپوزیت می تواند منجر به کاهش چقرمگی کامپوزیت شود. بنابراین، این مواد باعث افزایش سختی نانو کامپوزیت می گردند (Nikmatin et al., 2017). این تغییرات در سختی نشان دهنده تأثیر قابل توجهی است که افزودن پرکننده های سلولزی می تواند بر خواص مکانیکی کامپوزیت ها داشته باشد و اهمیت انتخاب مناسب نوع و مقدار این مواد در طراحی نانو کامپوزیت ها را تأکید می کند.

تأثیر مقدار نانو کربنات کلسیم بر مقاومت کششی و خمشی با افزایش نانو کربنات کلسیم تا ۳ درصد وزنی، مقاومت کششی و خمشی کامپوزیت افزایش می یابد. این نتیجه ممکن است به دلیل تمایل ذرات نانو کربنات کلسیم به پر کردن شکاف ها و فضاهای خالی بر روی سطح الیاف باشد، که در نتیجه نقص های ساختاری در فرایند تشکیل کامپوزیت چوب-پلاستیک کاهش می یابد (Wang et al., 2015).

افزودن نانو کربنات کلسیم و ایجاد چسبندگی سطحی قوی بین پلیمر و کربنات کلسیم موجب افزایش مقاومت خمشی می شود (Wang et al., 2015). علاوه بر این، ذرات نانو کربنات کلسیم به تشکیل پیوندهای شیمیایی قوی یا پیوند هیدروژنی متعدد کمک می کنند که با تغییر و کاهش آب دوستی الیاف، به افزایش مقاومت اتصال منجر می شود. این ذرات همچنین با اتصالات هیدروژنی و کووالانسی از طریق واکنش با گروه های هیدروکسیل موجود در سطح مشترک بین الیاف و پلی پروپیلن، عملکرد سطح مشترک را بهبود می بخشند (Rao et al., 2018). این افزایش در مقاومت فصل مشترک می تواند به طور مؤثر تنش کششی را از ماتریس (PP) به مرحله تقویت کننده منتقل کند؛ بنابراین، افزودن نانو ذرات کربنات کلسیم باعث افزایش مقاومت کششی و خمشی کامپوزیت می شود.

تأثیر مقدار نانو کربنات کلسیم بر مدول کششی و خمشی تأثیر نانو ذرات بر خواص مکانیکی نانو کامپوزیت های پلیمری به عواملی مانند اندازه، شکل، نوع، ضریب ظاهری،

(Kuan et al., 2021). بنابراین، با افزایش مقدار آرد چوب، مدول کششی افزایش می یابد. درواقع، یکی از دلایل اصلی افزودن مواد لیگنوسلولزی به پلاستیک ها، تقویت و افزایش مدول کششی آنهاست. نتایج این تحقیق با یافته (Bahlouli et al., 2023) همخوانی دارد. این افزایش مدول کششی می تواند بهبود قابل توجهی در عملکرد مکانیکی کامپوزیت ها به ویژه در کاربردهای صنعتی ایجاد کند.

تأثیر مقدار آرد صنوبر بر مقاومت به ضربه فاقدار مقاومت به ضربه فاقدار، سفتی و چقرمگی ماده را تعیین می کند و به طور کلی معرف مقاومت ماده در برابر شکست است (Nourbakhsh et al., 2010). نتایج نشان داد که افزایش مقدار آرد چوب تا ۵۰ درصد وزنی باعث کاهش مقاومت به ضربه فاقدار می شود. حضور مواد لیگنوسلولزی می تواند انرژی جذب شده توسط کامپوزیت را افزایش دهد. به این ترتیب، افزودن تقویت کننده مناطقی در ماتریس پلیمری ایجاد می کند که موجب تمرکز بیشتر تنش در این نواحی شده و نقاط شروع شکست را به وجود می آورد و به رشد ترک ها کمک می کند (Nandi and Das, 2022). با افزایش مقدار آرد چوب، عدم سازگاری بین الیاف و ماده زمینه بیشتر می شود و این مسئله باعث می گردد فرآورده در برابر ضربه ضعیف تر شود. درواقع، به دلیل کاهش ضربه پذیری و افزایش تردی نمونه ها، مقاومت به ضربه کاهش پیدا می کند (Klyosov, 2007). این نتایج با یافته های (Bahlouli et al., 2023) و (Núñez-Decap et al., 2021) همخوانی دارد و نشان دهنده اهمیت سازگاری بین مرحله های کامپوزیت برای بهبود خواص مکانیکی است.

تأثیر مقدار آرد صنوبر بر سختی زمانی که پرکننده سلولزی به ماتریس کامپوزیت اضافه می شود، تحرک زنجیره های پلیمری کاهش می یابد و سختی کامپوزیت افزایش پیدا می کند (Elfaleh et al., 2023). نتایج نشان داد که با افزایش مقدار آرد چوب از ۳۰ به ۵۰ درصد وزنی، سختی کامپوزیت نیز افزایش می یابد. حضور مواد

ساختار بلوری، مقدار و کیفیت ذرات نانو و نحوه اتصال آن‌ها با پلیمر بستگی دارد (Jahromi et al., 2010). افزایش در مقدار مدول کششی و خمشی کامپوزیت در هنگام استفاده از ۳ درصد نانو کربنات کلسیم را می‌توان به ضریب ظاهری بالای این ذرات نسبت داد. ضریب ظاهری بالای ذرات باعث افزایش سطح مشترک بین دو مرحله می‌شود. افزایش مقدار نانو کربنات کلسیم به‌طور مؤثری موجب افزایش مقاومت می‌گردد (Wang et al., 2022). علاوه بر این، ذرات نانو به‌عنوان تقویت‌کننده‌ای عمل می‌کنند که سطح مشترک بین دو مرحله را افزایش می‌دهند (Samariha et al., 2015). این افزایش در سطح مشترک و مقاومت در نهایت منجر به بهبود مدول کششی و خمشی نانو کامپوزیت‌ها می‌شود و نشان‌دهنده اهمیت انتخاب مناسب نوع و مقدار نانو ذرات در طراحی و تولید مواد پیشرفته است.

تأثیر مقدار نانو کربنات کلسیم بر مقاومت به ضربه فاقدار با افزایش مقدار نانو کربنات کلسیم، مقاومت به ضربه فاقدار کامپوزیت کاهش می‌یابد. ذرات نانو نواحی متمرکز تنش و نقاط شروع شکست را ایجاد می‌کنند. این ذرات در ماتریس پلیمری موجب سفت شدن زنجیره‌های پلیمری، کاهش قابلیت تحرک زنجیره‌ها، و افزایش انرژی جذب‌شده توسط کامپوزیت می‌شوند. این نقاط پرتنش می‌توانند محل‌هایی برای شروع شکست و ترک باشند (Wang et al., 2017).

تأثیر مقدار نانو کربنات کلسیم بر سختی

با افزایش مقدار ذرات نانو کربنات کلسیم، سختی نانو کامپوزیت افزایش می‌یابد. نانو کربنات کلسیم دارای سختی قابل‌توجهی است که افزایش آن موجب افزایش سختی می‌شود؛ بنابراین، با اضافه شدن ذرات نانو، سختی کامپوزیت افزایش پیدا می‌کند (Wang et al., 2019).

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که افزایش مقدار آرد چوب

صنوبر از ۳۰ به ۵۰ درصد تأثیر قابل‌توجهی بر خواص مکانیکی نانو کامپوزیت‌ها دارد. به‌ویژه، مقاومت کششی و خمشی، مدول کششی و خمشی و سختی به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد. این افزایش در خواص مکانیکی به دلیل بهبود انتقال تنش و چسبندگی بین مرحله‌های مختلف کامپوزیت ناشی از افزایش درصد آرد چوب است. با این حال، کاهش مقاومت به ضربه فاقدار در این حالت نشان‌دهنده تردی بیشتر کامپوزیت در اثر افزایش مقدار آرد است.

همچنین، افزودن نانو کربنات کلسیم تا ۳ درصد وزنی نیز آثار مثبتی بر روی خواص مکانیکی نانو کامپوزیت‌ها دارد. با افزایش مقدار نانو کربنات کلسیم، مقاومت کششی و خمشی، مدول کششی و خمشی و سختی افزایش می‌یابد. این افزایش به دلیل بهبود سطح مشترک بین مرحله‌های پلیمر و نانو ذرات و ایجاد پیوندهای شیمیایی قوی‌تر است. اما مشابه با افزایش آرد، مقاومت به ضربه فاقدار نیز در این حالت کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده نیاز به تعادل در طراحی نانو کامپوزیت‌هاست. در ترکیب ۵۰ درصد آرد صنوبر و ۳ درصد نانو کربنات کلسیم نسبت به شرایط ۳۰ درصد آرد صنوبر بدون افزودن نانو کربنات کلسیم به ترتیب افزایش ۱۳/۳، ۴۷/۷، ۱۹/۲، ۱۰۴/۱ و ۱۸/۶ درصدی مقاومت کشش، مدول کشش، مقاومت خمش، مدول خمش و سختی مشاهده شد.

در ترکیب ۵۰ درصد آرد صنوبر و ۳ درصد نانو کربنات کلسیم نسبت به شرایط ۳۰ درصد آرد صنوبر بدون افزودن نانو کربنات کلسیم شاهد کاهش ۲۳/۲ درصدی مقاومت به ضربه فاقدار بودیم.

به‌طورکلی، این تحقیق نشان می‌دهد که انتخاب صحیح نوع و مقدار مواد افزودنی، ازجمله آرد چوب و نانو کربنات کلسیم، می‌تواند به بهبود عملکرد مکانیکی و فیزیکی نانو کامپوزیت‌ها کمک کند. درعین حال، توجه به محدودیت‌ها و آثار منفی مانند کاهش مقاومت به ضربه نیز از اهمیت بالایی برخوردار است و باید در طراحی نهایی کامپوزیت‌ها موردتوجه قرار گیرد.

## References

- Ahmadi, H., Hemmasi, A. H., and Mahdavi, S., 2015. Investigation on mechanical properties of HDPE recycled composite filled by furfural residue produced from bagasse. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 30(3): 376-387. In Persian, DOI: <https://doi.org/10.22092/ijwpr.2015.13004>
- Arjmandi, R., Hassan, A., Majeed, K., and Zakaria, Z., 2015. Rice husk filled polymer composites. *International Journal of Polymer Science*, (1): 501471. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/501471>
- ASTM D638. 2010. Tensile properties of plastics, ASTM International, West Conshohocken, USA.
- ASTM D790. 2010. Flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials, ASTM International, West Conshohocken, USA.
- ASTM D256. 2010. Determining the Izod pendulum impact resistance of plastics, ASTM International, West Conshohocken, USA.
- ASTM D2240. 2010. Rubber property-durometer (Shore) hardness, ASTM International, West Conshohocken, USA.
- ASTM D3641. 2012. Injection molding test specimens of thermoplastic molding and extrusion materials, ASTM International, West Conshohocken, USA.
- Bahlouli, S., Belaadi, A., Makhlof, A., Alshahrani, H., Khan, M.K. and Jawaid, M., 2023. Effect of fiber loading on thermal properties of cellulosic washingtonia reinforced HDPE biocomposites. *Polymers*, 15(13): 2910. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15132910>
- Balla, V.K., Kate, K.H., Satyavolu, J., Singh, P. and Tadimet, J.G.D., 2019. Additive manufacturing of natural fiber reinforced polymer composites: Processing and prospects. *Composites Part B: Engineering*, 174: 106956. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106956>
- Breb, M. 2020. Environmental degradation of plastic composites with natural fillers—a review. *Polymers*, 12(1): 166. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym12010166>
- Durukan, S. N., Beylergil, B. and Dulgerbaki, C., 2023. Effects of silane-modified nano-CaCO<sub>3</sub> particles on the mechanical properties of carbon fiber/epoxy (CF/EP) composites. *Polymer Composites*, 44(3): 1805-1821. DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.27206>
- Elfaleh, I., Abbassi, F., Habibi, M., Ahmad, F., Guedri, M., Nasri, M. and Garnier, C., 2023. A comprehensive review of natural fibers and their composites: An eco-friendly alternative to conventional materials. *Results in Engineering*, 19: 101271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101271>
- He, H., Li, K., Wang, J., Sun, G., Li, Y. and Wang, J., 2011. Study on thermal and mechanical properties of nano-calcium carbonate/epoxy composites. *Materials & Design*, 32(8-9): 4521-4527. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.026>
- Hossain, M.T., Shahid, M.A., Mahmud, N., Habib, A., Rana, M.M., Khan, S.A. & Hossain, M.D., 2024. Research and application of polypropylene: a review. *Discover Nano*, 19(1), 2. DOI: <https://doi.org/10.1186/s11671-023-03952-z>
- Jahromi, G., Andalibzade, B. and Vossough, S., 2010. Engineering Properties of Nanoclay Modified Asphalt Concrete Mixtures. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 35(1), 89-103.
- Kiss A., Fekete E. and Pukanszky B., 2007. Aggregation of CaCO<sub>3</sub> Particles in PP Composites: Effect of Surface Coating. *Composites Science and Technology*, 67: pp. 1574-1583. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.07.010>
- Khakifirouz, A., Samariha, A., Karbaschi, A., Benakachi, M.A. and Beigloo, J.G., 2019. Nanoclay's influence on mechanical and thermal properties of a polypropylene/poplar wood flour nanocomposite. *BioResources*, 14(4): 8267-8277.
- Klyosov, A.A., 2007. Wood-plastic composites. John Wiley & Sons. United States of America, 680p.
- Kuan, H.T.N., Tan, M.Y., Shen, Y. and Yahya, M.Y., 2021. Mechanical properties of particulate organic natural filler-reinforced polymer composite: A review. *Composites and Advanced Materials*, 30: 26349833211007502. DOI: <https://doi.org/10.1177/26349833211007502>
- Lopez-Ramirez, R., Flores-Vazquez, A.L., Castrejon-Sanchez, V., Tellez-Jurado, L., Dorantes-Rosales, H.J. and Soriano-Vargas, O., 2023. Study of mechanical, thermal, and microstructural properties of polypropylene/ceramic waste composites. *Materials Science*, 29(2): 224-233. DOI: <https://doi.org/10.5755/j02.ms.30947>
- Maurya, S.D., Purushothaman, M., Krishnan, P.S.G. and Nayak, S.K., 2014. Effect of nano-calcium carbonate content on the properties of poly (urethane methacrylate) nanocomposites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 27(12), 1711-1727. DOI: <https://doi.org/10.1177/08927057.12475011>
- Mirzaei, J., Fereidoon, A. and Ghasemi-Ghalebahman, A., 2021. Experimental study on mechanical properties of polypropylene nanocomposites reinforced with a hybrid graphene/PP-g-MA/kenaf fiber by response surface methodology. *Journal of*

- Elastomers & Plastics, 53(8), 1063-1089. DOI: <https://doi.org/10.1177/00952443211015362>
- Nandi, P. and Das, D., 2022. Mechanical, thermo-mechanical and biodegradation behaviors of green-composites prepared from woven structural nettle (*Girardinia diversifolia*) reinforcement and poly (lactic acid) fibers. *Industrial Crops and Products*, 175: 114247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114247>
- Nikmatin, S., Syafiuddin, A., Hong Kueh, A.B. and Maddu, A., 2017. Physical, thermal, and mechanical properties of polypropylene composites filled with rattan nanoparticles. *Journal of applied research and technology*, 15(4): 386-395. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jart.2017.03.008>
- Nourbakhsh, A., Karegarfard, A., Ashori, A. and Nourbakhsh, A., 2010. Effects of particle size and coupling agent concentration on mechanical properties of particulate-filled polymer composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 23(2): 169-174. DOI: <https://doi.org/10.1177/0892705709340962>
- Núñez-Decap, M., Wechsler-Pizarro, A. and Vidal-Vega, M., 2021. Mechanical, physical, thermal and morphological properties of polypropylene composite materials developed with particles of peach and cherry stones. *Sustainable Materials and Technologies*, 29: e00300. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00300>
- Rao, J., Zhou, Y. and Fan, M., 2018. Revealing the interface structure and bonding mechanism of coupling agent treated WPC. *Polymers*, 10(3): 266. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym10030266>
- Samarhiha, A., Hemmasi, A.H., Ghasemi, I., Bazayr, B. and Nemati, M., 2015. Effect of nanoclay contents on properties, of bagasse flour/reprocessed high density polyethylene/nanoclay composites. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 17(3): 637-646. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000056>
- Sanvezzo, P.B. and Branciforti, M.C., 2021. Recycling of industrial waste based on jute fiber-polypropylene: Manufacture of sustainable fiber-reinforced polymer composites and their characterization before and after accelerated aging. *Industrial Crops and Products*, 168: 113568. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113568>
- Tan, W.L., Ahmad, A.L., Leo, C.P. and Lam, S. S., 2020. A critical review to bridge the gaps between carbon capture, storage and use of CaCO<sub>3</sub>. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 42: 101333. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101333>
- Wang, C., Xian, Y., Cheng, H., Li, W. and Zhang, S., 2015. Tensile properties of bamboo fiber-reinforced polypropylene composites modified by impregnation with calcium carbonate nanoparticles. *BioRes.* 10(4): 6783-6796.
- Wang, C., Wang, S., Cheng, H., Xian, Y. and Zhang, S., 2017. Mechanical properties and prediction for nanocalcium carbonate-treated bamboo fiber/high-density polyethylene composites. *Journal of Materials Science*, 52: 11482-11495. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1285-1>
- Wang, C., Cai, L., Shi, S.Q., Wang, G., Cheng, H. and Zhang, S., 2019. Thermal and flammable properties of bamboo pulp fiber/high-density polyethylene composites: Influence of preparation technology, nano calcium carbonate and fiber content. *Renewable Energy*, 134, 436-445. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.051>
- Wang, C., Wei, X., Smith, L.M., Wang, G., Zhang, S. and Cheng, H., 2022. Mechanical and rheological properties of bamboo pulp fiber reinforced high density polyethylene composites: influence of nano CaCO<sub>3</sub> treatment and manufacturing process with different pressure ratings. *Journal of Renewable Materials*, 10(7): 1829. DOI: [10.32604/jrm.2022.018782](https://doi.org/10.32604/jrm.2022.018782)
- Xu, B.H., Yu, K.B., Wu, H.C. and Bouchaïr, A., 2022. Mechanical properties and engineering application potential of the densified poplar. *Wood Material Science & Engineering*, 17(6), 659-667. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1924857>