

(OPEN ACCESS)

Improving Thermal and Mechanical Properties of Wood Flour-Based Nanocomposites with Added Nanographene

Jafar Ebrahimpour Kasmani^{*1}, Ahmad Samariha²

1. Corresponding Author, Associate Prof., Department of Wood and Paper, Sava.C., Islamic Azad University, Savadkooh, Iran.
E-mail: kasmani@iau.ac.ir
2. Assistant Prof., Department of Engineering Sciences, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.
E-mail: asamariha@tvu.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Full Length Research Paper	Background and Objectives: Nanocomposites have garnered significant interest for their ability to combine the unique properties of nanomaterials with polymer matrices. This study examines the influence of nanographene and wood flour content on the physical, mechanical, and thermal properties of nanocomposites made from spruce wood flour and recycled polypropylene. Nanographene is evaluated as a potential reinforcement for enhancing the mechanical and thermal performance of these composites.
Article history: Received: 04.17.2025 Revised: 08.23.2025 Accepted: 10.02.2025	
Keywords: Flexural modulus, Flexural strength, Nanographene, Recycled polypropylene, Wood flour of spruce	Materials and Methods: Composites were prepared using recycled polypropylene (fixed at 50%), spruce wood flour (fixed at 50%), nanographene at four loading levels (0, 0.5, 1, and 1.5 wt%), and maleic anhydride grafted polypropylene (fixed at 3%). The components were compounded using a twin-screw extruder, and standard specimens were produced by injection molding. Mechanical properties, including tensile and flexural strength, tensile and flexural modulus, and impact resistance, along with thermal and flammability characteristics, were evaluated according to ASTM standards.
	Results: Analysis of variance indicated that nanographene content did not significantly affect tensile modulus, flexural resistance, or impact resistance at a 95% confidence level. However, it exerted a significant influence on tensile strength, flexural strength, and oxygen index. Increasing nanographene content up to 1 wt% improved tensile strength, flexural strength, tensile and flexural modulus, and impact resistance. In contrast, a 1.5 wt% loading led to a reduction in these properties. Moreover, higher nanographene content resulted in increased residual ash and improved thermal stability.
	Conclusion: The incorporation of graphene nanoplatelets and wood flour significantly influences the physical, mechanical, and thermal behavior of recycled polypropylene, based nanocomposites. A nanographene content of 1 wt% enhances mechanical properties due to improved interfacial adhesion and dispersion within the polymer matrix. However, at 1.5 wt%, agglomeration and non-uniform distribution of nanographene weaken the composite structure and reduce performance. Increased nanographene

loading also improves thermal stability and char formation, contributing to flame retardancy. These findings underscore the importance of optimizing nanographene content and dispersion to achieve balanced and enhanced composite properties, supporting the efficient design and manufacturing of wood-polymer nanocomposites for advanced applications.

Cite this article: Ebrahimpour Kasmani, Jafar, Samariha, Ahmad. 2025. Improving Thermal and Mechanical Properties of Wood Flour-Based Nanocomposites with Added Nanographene. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 32 (3), 59-77.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwfst.2025.23527.2105

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

بهبود خواص حرارتی و مکانیکی چندسازه‌های مبتنی بر آرد چوب نوئل با افزودن نانو گرافن

جعفر ابراهیم‌پور کاسمانی^{1*}، احمد ثمریها²

1. نویسنده مسئول، دانشیار گروه چوب و کاغذ، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران. رایانامه: kasmani@iau.ac.ir

2. استادیار گروه علوم مهندسی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران. رایانامه: asamariha@tvu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی - پژوهشی	سابقه و هدف: نانو کامپوزیت‌ها به دلیل ترکیب ویژگی‌های مواد نانو با ماتریس‌های پلیمری، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر میزان نانو گرافن و آرد چوب بر ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و حرارتی نانو چندسازه ساخته‌شده از آرد چوب نوئل و پلی‌پروپیلن بازیافتی انجام شد. نانو گرافن به‌عنوان یک تقویت‌کننده مؤثر در بهبود خواص مکانیکی و حرارتی این کامپوزیت‌ها معرفی شده است.
تاریخ دریافت: 1404/01/28 تاریخ ویرایش: 1404/06/01 تاریخ پذیرش: 1404/07/10	مواد و روش‌ها: در این پژوهش، پلی‌پروپیلن بازیافتی (در سطح ثابت 50 درصد)، آرد چوب نوئل (در سطح ثابت 50 درصد)، نانو گرافن در چهار سطح (0، 0.5، 1 و 1/5 درصد) و انیدرید مالئیک پیوند داده‌شده با پلی‌پروپیلن در سطح ثابت 3 درصد، به‌وسیله اکسترودر دو ماردونی (دو مارپیچه) با یکدیگر مخلوط و نمونه‌های آزمونی استاندارد با استفاده از روش قالب‌گیری تزریقی ساخته شدند. خواص مکانیکی شامل مقاومت کششی و خمشی، مدول کششی و خمشی و مقاومت به ضربه فاق‌دار، هم‌چنین خواص حرارتی و آتش‌گیری، بر اساس استاندارد ASTM اندازه‌گیری شدند.
واژه‌های کلیدی: آرد چوب نوئل، پلی‌پروپیلن بازیافتی، مدول خمشی، مقاومت خمشی، نانو گرافن	یافته‌ها: نتایج تجزیه واریانس بیانگر این است که تأثیر نانو گرافن بر مدول کشش، مقاومت خمشی و مقاومت به ضربه فاق‌دار در سطح اطمینان 95٪ معنی‌دار نیست. درحالی‌که تأثیر نانو گرافن بر مقاومت کشش و خمشی و شاخص اکسیژن محدود در سطح اطمینان 95٪ معنی‌دار است. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار نانو گرافن تا 1 درصد وزنی، مقاومت کششی و خمشی، مدول خمشی و کششی چندسازه افزایش می‌یابد. باین حال، با افزودن مقدار 1/5 درصد وزنی نانو گرافن، این خواص کاهش می‌یابند. هم‌چنین، افزایش میزان نانو گرافن منجر به افزایش میزان خاکستر باقی‌مانده و بهبود ثبات حرارتی شد.

نتیجه‌گیری: این پژوهش به بررسی تأثیر میزان نانو گرافن و آرد چوب بر ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و حرارتی نانو چندسازه‌های ساخته‌شده از آرد چوب نوئل و پلی‌پروپیلن بازیافتی پرداخته است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقدار نانو گرافن تا ۱ درصد وزنی، خواص مکانیکی شامل مقاومت کششی و خمشی، مدول کششی و خمشی، افزایش می‌یابد. این افزایش به دلیل بهبود چسبندگی بین نانو گرافن و ماتریس پلیمری است که موجب تقویت ساختار کلی و افزایش استحکام می‌شود. با این حال، افزودن ۱/۵ درصد وزنی نانو گرافن منجر به کاهش این خواص می‌شود که به کلوخه شدن و توزیع نامناسب نانو گرافن در ماتریس نسبت داده می‌شود. این پدیده نقاط ضعف در ساختار ماده ایجاد کرده و عملکرد مکانیکی را کاهش می‌دهد. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش میزان نانو گرافن، میزان خاکستر باقی‌مانده نیز افزایش یافته و ثبات حرارتی چندسازه بهبود می‌یابد. نانو گرافن با ایجاد لایه زغالی در دماهای بالا، روند تخریب حرارتی را کاهش می‌دهد و می‌تواند به عنوان یک عامل مؤثر در افزایش ثبات حرارتی عمل کند. بنابراین، نتایج این پژوهش تأکید می‌کند که برای دستیابی به خواص بهینه، مدیریت دقیق مقدار نانو گرافن و توجه به توزیع یکنواخت آن در ماتریس پلیمری ضروری است. استفاده از مقادیر کم نانو گرافن می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی و حرارتی کمک کند، در حالی که مقادیر بالاتر ممکن است منجر به تضعیف این خواص شود. به طور کلی، این نتایج می‌تواند به طراحی و تولید بهینه نانو چندسازه‌ها کمک کند.

استناد: ابراهیم‌پور کاسمانی، جعفر، ثمریها، احمد (۱۴۰۴). بهبود خواص حرارتی و مکانیکی چندسازه‌های مبتنی بر آرد چوب نوئل با افزودن نانو گرافن. *نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل*، ۳۲ (۳)، ۷۷-۵۹.

DOI: 10.22069/jwfst.2025.23527.2105



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

در دنیای امروز، با توجه به افزایش نیاز به مواد پایدار و سازگار با محیط زیست، توجه به استفاده از کامپوزیت های طبیعی به طور قابل توجهی افزایش یافته است. این مواد به دلیل ویژگی های منحصر به فردی که دارند، به خصوص در صنایع مختلف مانند خودروسازی، ساختمان و بسته بندی، مورد توجه قرار گرفته اند. آرد چوب نوئل، به عنوان یکی از منابع طبیعی و تجدید پذیر، به خاطر خواص مکانیکی و حرارتی قابل قبول، به عنوان یک جزء اصلی در تولید چندسازه ها در نظر گرفته می شود (1). این ماده به دلیل وزن سبک، قابلیت تجزیه پذیری و هزینه پایین، جایگزین مناسبی برای مواد سنتزی در بسیاری از کاربردها به شمار می رود.

با این حال، یکی از چالش های اصلی در استفاده از آرد چوب نوئل، محدودیت های موجود در خواص مکانیکی و حرارتی آن است. به طور خاص، خواص طبیعی چوب معمولاً از نظر استحکام و مقاومت حرارتی نسبت به مواد سنتزی ضعیف تر هستند؛ بنابراین، بهبود این خواص برای افزایش کاربردهای صنعتی این مواد ضروری است. در این راستا، نانومواد به عنوان یک راه حل امیدوارکننده مطرح می شوند. نانو گرافن، به عنوان یک نانوماده با ساختار دو بعدی و خواص بی نظیر، به ویژه در بهبود خواص مکانیکی و حرارتی کامپوزیت ها مؤثر است.

نانو گرافن به دلیل نسبت سطح به حجم بالا و خواص مکانیکی برجسته، قادر است به طور مؤثری خواص فیزیکی و شیمیایی ماتریس های پلیمری را بهبود بخشد (2). پژوهش ها نشان داده اند که افزودن نانو گرافن به ماتریس پلی پروپیلن می تواند به طور قابل توجهی استحکام، چقرمگی و انتقال حرارت در چندسازه های مبتنی بر آرد چوب نوئل را افزایش دهد (3). این ویژگی های منحصر به فرد نانو گرافن،

به خصوص در ترکیب با مواد طبیعی، می تواند به توسعه مواد کامپوزیتی با عملکرد بهینه کمک کند و در نتیجه به بهبود ویژگی های مکانیکی و حرارتی آن ها منجر گردد (4).

بیگلو و همکاران (2017) با مطالعه تأثیر افزودن نانو گرافن به چندسازه آرد چوب پلی اتیلن بازیافتی با دانسیته بالا به این نتیجه رسیدند که با افزایش مقدار نانو گرافن تا 0/5 درصد وزنی، استحکام خمشی، مدول خمشی و مقاومت به ضربه چندسازه افزایش یافت (5).

المقدسی و همکاران (2020)، به بررسی اثر هم افزایی آرد چوبی و نانو گرافن بر خواص مکانیکی (مقاومت کششی، خمشی و ضربه)، خواص حرارتی چندسازه های پلی پروپیلن پرداخته است. نتایج نشان داد که افزودن هم آرد چوب و نانو گرافن باعث بهبود چشمگیر خواص مکانیکی، حرارتی و دینامیکی - مکانیکی چندسازه ها شده است (6).

به علاوه، نانو گرافن می تواند به عنوان یک عامل اتصال دهنده بین ذرات آرد چوب نوئل و ماتریس پلی پروپیلن عمل کند که این امر باعث افزایش پیوندهای بین فازهای مختلف و در نتیجه بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت می شود. هم چنین، تأثیر نانو گرافن بر خواص حرارتی می تواند به بهبود رفتار حرارتی کامپوزیت ها در دماهای بالا و جلوگیری از تجزیه آن ها کمک کند؛ بنابراین، بررسی دقیق تأثیر نانو گرافن بر خواص حرارتی و مکانیکی چندسازه های حاصل از آرد چوب نوئل و ماتریس پلی پروپیلن یک موضوع مهم و ضروری است.

از سوی دیگر، با توجه به اهمیت روزافزون پایداری محیط زیست و تلاش برای کاهش اثرات منفی مواد پلیمری سنتزی، استفاده از مواد طبیعی مانند آرد چوب نوئل در ترکیب با نانو گرافن می تواند راه حلی کارآمد برای دستیابی به این هدف باشد.

نانو گرافن به دلیل ساختار ویژه‌اش، می‌تواند به‌عنوان یک تقویت‌کننده مؤثر و هم‌چنین یک عامل کاهش‌دهنده مصرف مواد اولیه در تولید کامپوزیت‌ها عمل کند. این ویژگی‌ها نه‌تنها به بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی کمک می‌کند، بلکه به کاهش هزینه‌های تولید و افزایش پایداری زیست‌محیطی نیز منجر می‌شود (7).

نتایج این پژوهش می‌تواند به توسعه مواد کامپوزیتی با عملکرد بهینه در صنایع مختلف کمک کرده و به کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی ناشی از استفاده از مواد سنتزی کمک نماید. از این‌رو، استفاده از نانو گرافن در ترکیب با آرد چوب نوئل و ماتریس پلی‌پروپیلن می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر در راستای بهبود خواص مکانیکی و حرارتی این مواد در نظر گرفته شود.

روش تحقیق

مواد: جهت انجام این پژوهش پلی‌پروپیلن بازیافتی به‌طور آزمایشگاهی تهیه شد. پلی‌پروپیلن با دانسیته 0/952 گرم بر سانتی‌مترمکعب از شرکت بازرگانی

پتروشیمی اراک تهیه و با استفاده از یک اکسترودر دو مارپیچه، تحت دمای 180 درجه سانتی‌گراد و سرعت 100 دور در دقیقه 2 بار ذوب و گرانول شد. آرد چوب نوئل به‌عنوان تقویت‌کننده پودری در ماتریس پلیمری مورد استفاده قرار گرفت. آرد از یک شرکت تولیدکننده مبلمان تأمین و پس از طبقه‌بندی با دستگاه الک ارتعاشی، آرد عبور کرده از الک با مش 60 و باقی‌مانده بر الک مش 70 به‌عنوان تقویت‌کننده استفاده گردید. نمونه‌ها به مدت 24 ساعت در دمای 100 درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. هم‌چنین، مالئیک انیدرید پیوند خورده با پلی‌پروپیلن (MAPP) به‌عنوان عامل سازگارکننده با خلوص 98 درصد مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات پلی‌پروپیلن پیوند خورده با مالئیک انیدرید در جدول 1 خلاصه شده است. نانو گرافن نوع AO-4 از شرکت گرافن سوپرمارکت (Graphene Supermarket) ایالات متحده آمریکا تهیه شد. برخی از مشخصات آن در جدول 2 ارائه شده است.

جدول 1- مشخصات پلی‌پروپیلن پیوند خورده با مالئیک انیدرید.

Table 1. Specifications of maleic anhydride grafted polypropylene.

7	شاخص جریان مذاب (g/10min) Melt flow index (g/10min)
0.965	چگالی (gr/cm^3) Density (gr/cm^3)

جدول 2- مشخصات نانو گرافن.

Table 2. Specifications of nanographene.

مساحت (مترمربع بر گرم) Area (m^2/g)	قطر (میکرون) Diameter	ضخامت (نانومتر) Thickness (nm)	خلوص (درصد) Purity (%)	رنگ Color	سطح ویژه (M^2/g) Specific surface area
300	3-7	60	98.5	سیاه Black	More than 15

اکسترودر دو ماردونی¹ (دو ماریچچه) با دمای ساخت 160 درجه سانتی گراد و سرعت ماردون 70 دور در دقیقه که جهت حرکت ماردونهای آن خلاف هم بود در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران انجام شد.

روشها: درصد وزنی اجزای کامپوزیت های ساخته شده با ذکر علامت اختصاری به کاررفته برای هر تیمار در جدول 3 آورده شده است. اختلاط پلی پروپیلن ضایعاتی، آرد چوب، نانو گرافن و سازگار کننده به صورت نسبت وزنی مشخص توسط دستگاه

جدول 3- درصد اجزای کامپوزیت چندسازه در تیمارهای مختلف.

Table 3. Percentage of composite parts in different treatments.

شماره تیمار Treatment number	آرد چوب (phc) Wood flour (phc)	پلی پروپیلن (phc) Polypropylene (phc)	نانو گرافن (phc) Nano graphene	سازگارکننده (%) Compatibilizer
1	50	50	0	3
2	50	50	0.5	3
3	50	50	1	3
4	50	50	1.5	3

* phc: per hundred compounds

مورد بررسی قرار گرفت. پیش از انجام آزمونهای مکانیکی، نمونه های استاندارد به مدت دو روز در دمای 23 درجه سانتی گراد و رطوبت 50 درصد قرار داده شدند تا به دمای محیط تعادل برسند.

برای ارزیابی خواص مکانیکی، مقاومت خمشی، مدول خمشی، مقاومت به ضربه و مقاومت کششی نمونه ها اندازه گیری شد. آزمون خمش بر اساس آیین نامه D-747 استاندارد ASTM و با سرعت بارگذاری 2 میلی متر در دقیقه انجام گردید. از دستگاه اینسترون مدل 1186 برای اعمال آزمون استفاده شد. به منظور بررسی استحکام کششی نمونه ها، از آیین نامه D-638-M-89 استاندارد ASTM بهره گرفته شد. نمونه ها به صورت M-I و دمبلی تهیه گردیدند و آزمون کشش نیز با استفاده از دستگاه اینسترون مدل 1186 انجام شد.

برای ارزیابی مقاومت به ضربه، آزمون فاق دار آیزود بر روی نمونه ها طبق آیین نامه D-256 استاندارد ASTM اجرا گردید و دستگاه آزمایشگر مقاومت به ضربه مدل Zwick برای این منظور انتخاب شد.

ساخت نمونه های آزمونی استاندارد: به منظور ساخت نمونه های آزمونی استاندارد، گرانول ها به دستگاه قالب گیر تزریقی² تزریق می گردد. برای این کار از دستگاه تزریق نیمه صنعتی ساخت شرکت ایمن ماشین تهران موجود در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران استفاده شد. دمای سیلندر تزریق در هر سه ناحیه به ترتیب 160، 155 و 145 درجه سانتی گراد، دمای قالب 40°C فشار تزریق 80 Mpa و زمان دوره تزریق کم تر از 20 ثانیه در نظر گرفته شد. عملیات خنک کردن قالب با آب سرد انجام شد و نمونه ها جهت آزمون های کشش، خمش و ضربه پس از 2 دقیقه از قالب بیرون آورده شدند.

اندازه گیری خواص مکانیکی و حرارتی: خواص مکانیکی شامل مقاومت خمشی، مدول خمشی، مقاومت به ضربه و مقاومت کششی و همچنین خواص آمیزه، با استفاده از آزمون های گرماسنجی روبشی تفاضلی بر روی نانو چندسازه های تهیه شده،

1- Dr. Collien

2- Injection Molding

جهت انجام گرماسنجی روبشی تفاضلی، نمونه‌هایی با وزن بین 5 تا 7 میلی گرم تهیه و در دستگاه TGA مدل (TGA Q50) ساخت شرکت TA ایالات متحده آمریکا قرار داده شدند. این آزمایش با استفاده از دستگاه موجود در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران صورت گرفت و مطابق با استاندارد ASTM E1131 انجام شد.

برای آزمون شاخص اکسیژن، نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM D2863 به ابعاد $150 \times 50 \times 4$ میلی متر تهیه شدند.

تجزیه و تحلیل نتایج: در این بررسی سطوح متفاوت نانو گرافن در چهار سطح (0، 0/5، 1 و 1/5 درصد). تعداد تکرارها برای هر تیمار برابر 3 تکرار مدنظر قرار گرفت؛ بنابراین تعداد تیمارها برابر 4 بود که شامل 4 سطح نانو گرافن بود. از آزمایش تجزیه

واریانس یک طرفه استفاده گردید. به منظور انجام تجزیه و تحلیل‌های آماری از نرم افزار SPSS استفاده شد. معنی داری میانگین تیمارها نیز بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن و در سطح احتمال 5 درصد مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

نتایج آزمون تجزیه واریانس در جدول 4 نشان داده شده است. نتایج تجزیه واریانس بیانگر این است که تأثیر نانو گرافن بر مدول کشش، مدول خمش و مقاومت به ضربه فاق دار در سطح اطمینان 95٪ معنی دار نیست. تأثیر نانو گرافن بر مقاومت کشش و مقاومت خمش و شاخص اکسیژن محدود در سطح اطمینان 95٪ معنی دار است.

جدول 4- تجزیه واریانس (مقدار F و سطح معنی داری) تأثیر نانو گرافن بر مقاومت‌ها.

Table 4. Analysis of Variance (F Value and Significance Level) of the Effect of Nano Graphene on Resistances.

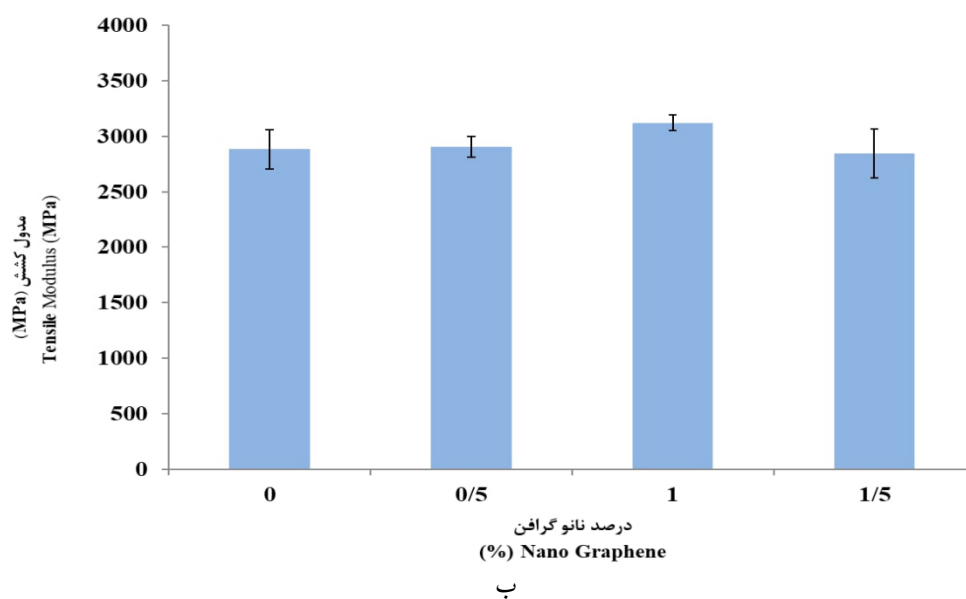
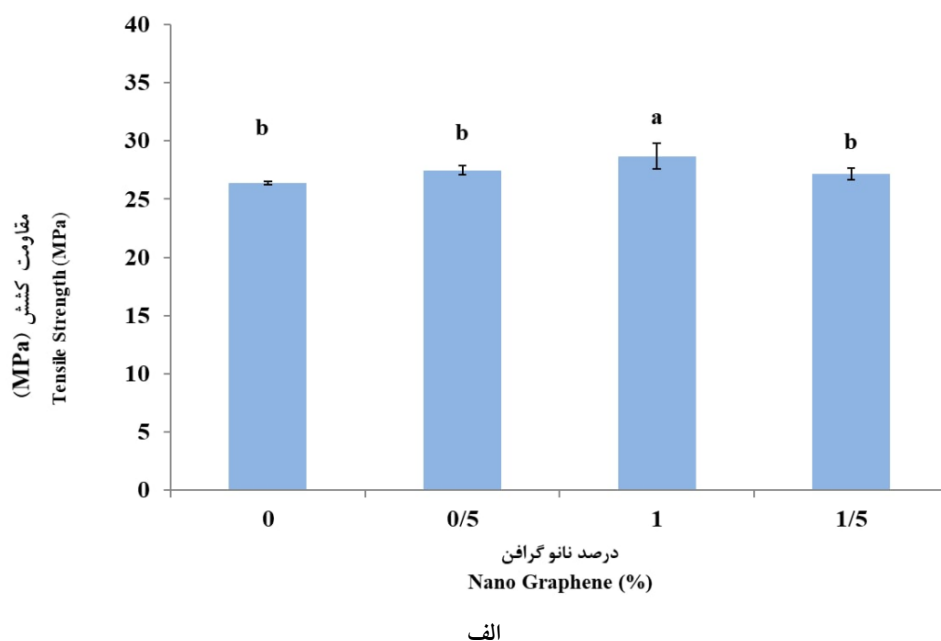
مقدار F و سطح معنی داری F value and significance level	متغیرهای ساخت Structure variable
6.672*	مقاومت کشش Tensile resistance
1.943 ^{ns}	مدول کشش Tensile modulus
26.125*	مقاومت خمش Flexural resistance
1.188 ^{ns}	مدول خمش Flexural modulus
0.997 ^{ns}	مقاومت به ضربه فاق دار Impact resistance
129.001*	شاخص اکسیژن محدود Limited oxygen index

تأثیر مقدار نانو گرافن بر مقاومت و مدول کشش: آزمون دانکن، سطوح مختلف مقادیر میانگین مقدار نانو گرافن را در دو گروه مختلف قرار داد،

همان طوری که در شکل مشاهده می شود. بیشترین مقاومت کششی مربوط به ترکیب (1 درصد نانو گرافن) برابر 28/69 مگاپاسکال و کمترین مقدار آن مربوط به

بیشترین مدول کششی مربوط به ترکیب (1 درصد نانو گرافن) برابر 3118/98 مگاپاسکال و کمترین مقدار آن مربوط به ترکیب (1/5 درصد نانو گرافن) برابر 2845/86 مگاپاسکال می باشد شکل 1 (ب).

ترکیب (0 درصد نانو گرافن) برابر 26/4 مگاپاسکال می باشد شکل 1 (الف). در این پژوهش مشاهده شد که با افزایش مقدار نانو گرافن تا 1 درصد وزنی، مقاومت کششی چندسازه افزایش می یابد و سپس با افزایش مقدار نانو گرافن تا 1/5 درصد، این مقاومت کاهش می یابد.



شکل 1- تأثیر مستقل نانو گرافن بر مقاومت کششی (الف) و مدول کششی (ب).

Figure 1. Independent effect of nanographene on tensile strength (a) and tensile modulus (b).

افزایش مقادیر نانو گرافن منجر به توزیع نامناسب آن‌ها در ماتریس زمینه و برهمکنش ضعیف میان نانو گرافن و ماتریس می‌شود که در نهایت باعث کاهش مقاومت کششی می‌گردد (8). با افزایش مقدار نانو گرافن تا $1/5$ درصد، به دلیل کلوخه شدن نانو گرافن در ماتریس پلیمری، مقاومت کششی چندسازه کاهش می‌یابد. این کلوخه شدن به دلیل تراکم بیشتر مواد و کاهش فاصله میان آن‌ها اتفاق می‌افتد (9). به نظر می‌رسد پراکندگی نانو در درصدهای پایین بهتر است، چراکه در مقادیر کم، سطح ویژه بالای نانو گرافن و چسبندگی مناسب با پلیمر موجب افزایش استحکام کششی می‌شود؛ اما در مقادیر بالاتر، توده شدن صفحات نانو گرافن منجر به کاهش استحکام کششی می‌گردد (10).

در مقادیر پایین، صفحات نانو گرافن با فاصله از هم قرار دارند، اما با افزایش مقدار گرافن، این فاصله کاهش یافته و به یک مقدار بحرانی می‌رسد. در این مرحله، افزایش بیش‌تر گرافن باعث توده شدن صفحات و لغزش آن‌ها در هنگام آزمایش کشش به دلیل نیروی ضعیف واندروالس می‌شود (11). تأثیر مواد نانو بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های پلیمری به عواملی مانند اندازه، شکل، نوع، ضریب ظاهری، مقدار و کیفیت مواد نانو و نحوه اتصال آن‌ها با پلیمر بستگی دارد (12).

افزایش مقاومت کششی چندسازه در استفاده از 1 درصد وزنی نانو گرافن به مساحت سطح ویژه بالای آن نسبت داده می‌شود. این ویژگی موجب افزایش سطح مشترک دو فاز و چسبندگی قوی بین پلیمر و چوب می‌گردد که به افزایش مقاومت چندسازه کمک می‌کند (13). نمونه‌های فاقد گرافن دارای مقاومت کششی پایین‌تری هستند که به دلیل مقاومت کششی بالای نانو گرافن است. پژوهش‌گران نشان داده‌اند که با افزایش درصد گرافن در چندسازه پلی‌پروپیلن تا

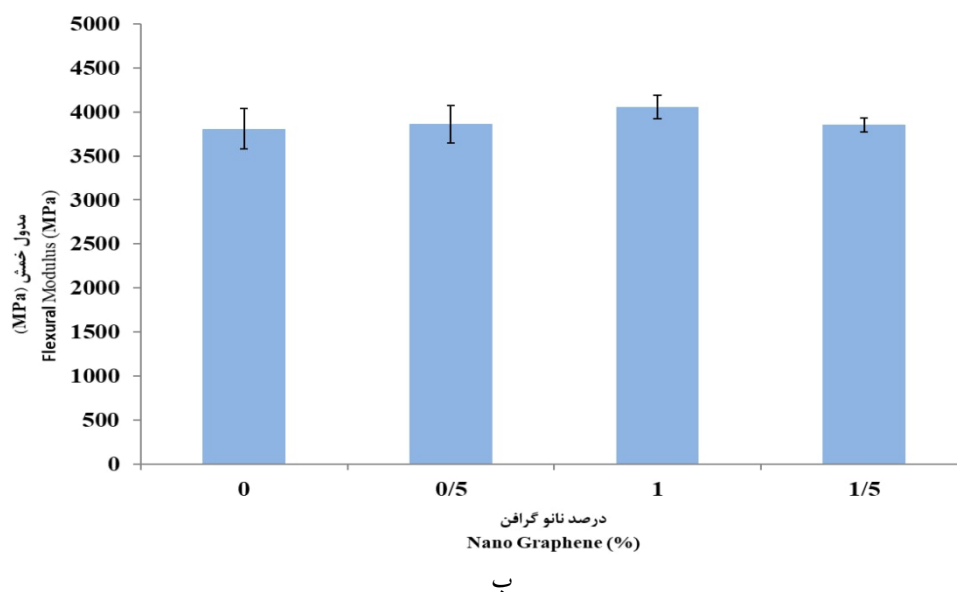
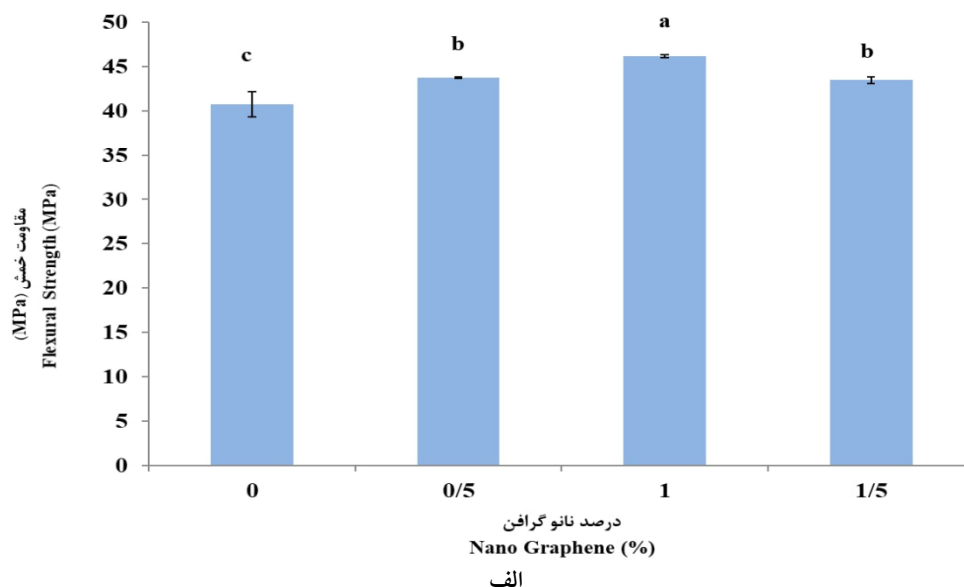
0/8 درصد، مقاومت کششی افزایش می‌یابد و پس‌از آن با افزودن گرافن تا 5 درصد، مقاومت کششی کاهش می‌یابد (14).

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش مقدار نانو گرافن تا 1 درصد وزنی، مدول کششی چندسازه افزایش می‌یابد. این افزایش به دلیل برهمکنش سطحی میان ماتریس و نانو گرافن است که منجر به کاهش تحرک زنجیره‌های پلیمری و بهبود انتقال تنش می‌شود. با این حال، با افزودن $1/5$ درصد نانو گرافن، به دلیل کلوخه شدن نانو گرافن، مدول کششی کاهش می‌یابد. در هر سیستم نانوکامپوزیتی، یک حد بهینه از مقدار نانو ذرات وجود دارد که می‌تواند بالاترین مدول و مقاومت را فراهم کند. این حد بهینه تحت تأثیر عواملی از جمله سطح ویژه ذرات، چسبندگی بین مواد نانو و ماتریس، توزیع و پراکندگی مناسب و شرایط فرآیند قرار دارد (15).

از آنجایی که نانو گرافن دارای سطح ویژه بسیار بالایی است، استفاده از این مواد در مقادیر زیاد ممکن است منجر به کلوخه شدن و کاهش مدول گردد؛ بنابراین، بهینه‌سازی مقدار نانو گرافن در کامپوزیت‌ها برای دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب، امری ضروری است و نیاز به بررسی دقیق‌تری دارد تا تعادل بین افزایش مقاومت و جلوگیری از کلوخه شدن نانو برقرار شود (16).

تأثیر مقدار نانو گرافن بر مقاومت و مدول خمشی:
آزمون دانکن، سطوح مختلف مقادیر میانگین مقدار نانو گرافن را در سه گروه مختلف قرار داد، همان‌طوری که در شکل مشاهده می‌شود بیش‌ترین مقاومت خمشی مربوط به ترکیب (1 درصد نانو گرافن) برابر $46/16$ مگاپاسکال و کم‌ترین مقدار آن مربوط به ترکیب (0 درصد نانو گرافن) برابر $40/75$ مگاپاسکال می‌باشد (شکل 2 الف).

بیشترین مدول خمشی مربوط به ترکیب 1 درصد
نانو گرافن) برابر 4057/01 مگاپاسکال و کمترین
مقدار آن مربوط به ترکیب (0 درصد نانو گرافن)
برابر 3809/1 مگاپاسکال می باشد شکل 2 (ب).



شکل 2- تأثیر مستقل نانو گرافن بر مقاومت خمشی (الف) و مدول خمشی (ب).

Figure 2. Independent effect of nanographene on flexural strength (a) and flexural modulus (b).

با افزایش مقدار نانو گرافن تا 1/5 درصد وزنی، احتمالاً به دلیل تجمع و تراکم مواد نانو و همچنین تشکیل توده های درهم رفته در نقاط شکست، مقاومت خمشی چندسازه کاهش می یابد. در ترکیب هایی با

در این پژوهش مشاهده شد که با افزایش مقدار نانو گرافن تا 1 درصد وزنی، مقاومت خمشی چندسازه چوب پلاستیک افزایش می یابد، اما با افزایش مقدار نانو گرافن به 1/5 درصد، این مقاومت کاهش می یابد.

درصد کم‌تر نانو گرافن، به دلیل اتصال بهتر ذرات نانو به یکدیگر، مقاومت خمشی افزایش می‌یابد؛ اما با افزایش درصد نانو گرافن، به دلیل احتمال افزایش کلوخه شدن، مقاومت خمشی کاهش می‌یابد. این کلوخه شدن به دلیل وجود نیروهای واندروالس میان نانوگرافن است که منجر به تشکیل نقاطی با تمرکز تنش بالا و در نهایت کاهش مقاومت خمشی می‌گردد (17).

شواهدی در زمینه افزایش خواص مکانیکی چندسازه‌ها با افزودن مواد نانو وجود دارد (8). این افزایش خواص مکانیکی در نتیجه افزودن مقادیر کمی از مواد نانو مانند گرافن قابل درک است؛ زیرا این مواد می‌توانند تنش بیشتری را منتقل کنند و به بهبود اتصال اجزای چندسازه کمک کنند (11). گرافن به دلیل داشتن خواص مکانیکی و سطح ویژه بسیار بالا، هنگامی که مقدار کمی از آن به‌طور مناسب با پلیمر ترکیب شود، می‌تواند به‌طور خاص خواص مکانیکی پلیمر را افزایش دهد.

روش افزودن و درصد وزنی گرافن تأثیر زیادی بر خواص نهایی چندسازه دارد. افزودن بیش از یک حد معین موجب تشکیل صفحات روی هم و کاهش چسبندگی بین اجزا می‌شود که در نهایت به کاهش خواص مکانیکی منجر می‌گردد. تجمع و تراکم مواد نانو به یکدیگر نیز می‌تواند افت ویژگی‌های مکانیکی را به همراه داشته باشد. استفاده از درصدهای کم گرافن در چندسازه به‌عنوان یک مزیت مطرح است، زیرا سطح آزاد صفحات گرافن و تمایل به پیوند بالا، معمولاً در درصدهای وزنی بسیار کم استفاده می‌شود تا از متراکم شدن مواد نانو جلوگیری شود (10).

ششمانی و همکاران (2013)، نشان دادند که با افزایش درصد گرافن در چندسازه پلی‌پروپیلن تا سطح 0/8 درصد، مقاومت خمشی افزایش و با افزایش بیش‌تر مقدار نانو گرافن، مقاومت خمشی

کاهش می‌یابد (14). هم‌چنین، چهارم‌حالی و همکاران (2013) به همین نتیجه رسیدند که با افزایش درصد گرافن در چندسازه پلی‌پروپیلن تا 0/1 درصد، مقاومت خمشی افزایش و با افزایش بیش‌تر مقدار نانو گرافن، این مقاومت کاهش می‌یابد (15).

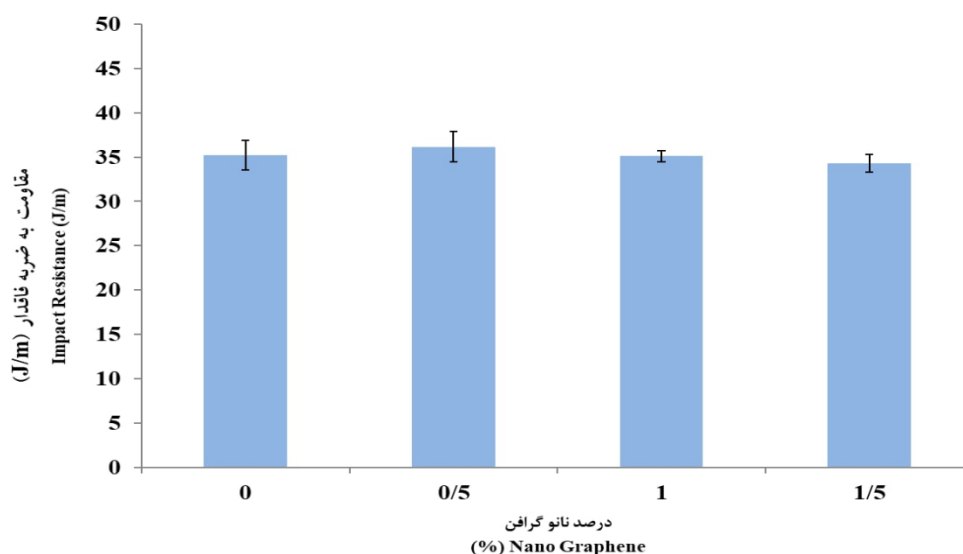
این پژوهش نشان داد که با افزایش مقدار نانو گرافن تا 1 درصد وزنی، مدول خمشی چندسازه افزایش می‌یابد و سپس با افزایش بیش‌تر نانو گرافن، این مدول کاهش می‌یابد. در پژوهشی نشان دادند که بیش‌ترین مقدار مدول الاستیسیته در سطح 0/8 درصد به‌دست آمده و در درصدهای بالاتر از این مقدار، مدول کاهش می‌یابد. مدول الاستیسیته نانوگرافن، معادل 1 تراپاسکال، به‌طور قابل‌توجهی از مدول الاستیسیته پلی‌پروپیلن و الیاف طبیعی بالاتر است؛ بنابراین، افزودن نانو گرافن به چندسازه‌های الیاف چوب می‌تواند منجر به افزایش مدول خمشی شود (14).

اما کاهش مدول الاستیسیته در درصدهای بالاتر از 1 درصد می‌تواند به توزیع نایک‌نواخت و احتمالاً کلوخه شدن نانوگرافن در چندسازه نسبت داده شود. چندین عامل بر عملکرد نانو گرافن در بهبود خواص مکانیکی نانوچندسازه‌ها مؤثر است که یکی از مهم‌ترین آن‌ها توزیع یکنواخت گرافن در ماتریس است (18). عدم رعایت این عوامل می‌تواند منجر به متراکم شدن و کاهش عرض به ضخامت لایه‌های گرافن شود که در نهایت باعث کاهش مدول خمشی خواهد شد.

چهارم‌حالی و همکاران (2013) نیز نشان دادند که با افزایش درصد گرافن در چندسازه پلی‌پروپیلن تا 0/1 درصد، مدول خمشی افزایش و با افزایش بیش‌تر مقدار نانو گرافن، مدول خمشی کاهش می‌یابد. این یافته‌ها نشان‌دهنده اهمیت مدیریت دقیق مقدار و توزیع نانو گرافن در نانوکامپوزیت‌ها برای بهینه‌سازی خواص مکانیکی آن‌ها است (15).

تأثیر مقدار نانو گرافن بر مقاومت به ضربه فاقدار: بیشترین مقاومت به ضربه فاقدار مربوط به ترکیب (0/5 درصد نانو گرافن) برابر 36/15 ژول بر متر و کمترین مقدار آن مربوط به ترکیب (1/5 درصد نانو گرافن) برابر 34/27 ژول بر متر می باشد (شکل 3).

در مجموع، بهینه سازی مقدار نانو گرافن و توجه به توزیع یکنواخت آن در ماتریس می تواند به بهبود عملکرد خمشی چندسازه های چوب پلاستیک کمک کند و از کاهش خواص مکانیکی ناشی از کلوخه شدن نانو جلوگیری نماید.



شکل 3- تأثیر مستقل نانو گرافن بر مقاومت به ضربه فاقدار.

Figure 3. Independent effect of nanographene on impact resistance.

زنجیره ها را کاهش داده و انرژی جذب شده توسط چندسازه را افزایش می دهند و نقاط پرتنش ایجاد می کنند که می تواند محل هایی برای شروع شکست و ترک باشند.

در اکثر موارد، مقاومت ضربه با پدیده خارج شدن پلیمر از روی سطح پرکننده و ترک خوردگی ریز مشخص می شود. پلیمرهای سفت و انعطاف پذیر می توانند با اضافه کردن ذرات سخت که پلیمر از روی آن ها خارج شده، به صورت چقرمه در آیند. این امر باعث افزایش انرژی ترک خوردگی ریز می شود و در کسر حجمی زیادی از نمونه اتفاق می افتد، در نتیجه انرژی بیش تری هدر رفته و چقرمگی افزایش می یابد (19).

این پژوهش نشان داد که با افزایش مقدار نانو گرافن تا 0/5 درصد وزنی، مقاومت به ضربه فاقدار چندسازه چوب پلاستیک افزایش می یابد، اما با افزایش نانوگرافن به 1/5 درصد، این مقاومت کاهش می یابد. وجود پرکننده های سخت معمولاً باعث کاهش استحکام ضربه می شود. در پلیمرهای سخت و شکننده، ترک به راحتی رشد می کند و ذرات ممکن است به عنوان آغازگر ترک عمل کرده و مقاومت به ضربه را کاهش دهند.

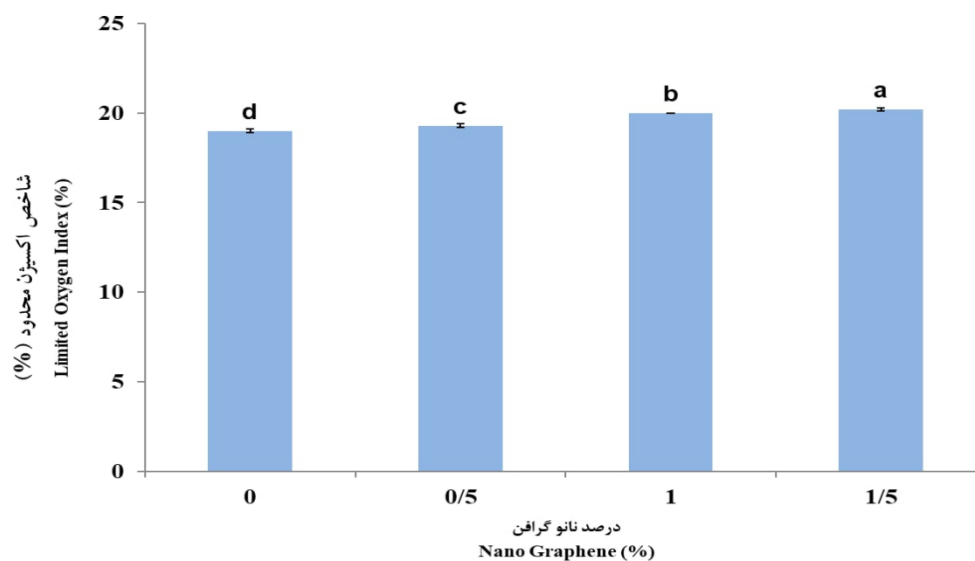
کاهش مقاومت به ضربه با اضافه شدن نانوگرافن قابل پیش بینی بود، زیرا حضور نانو گرافن سبب تردتر شدن چندسازه ها و کاهش مقاومت به ضربه آن ها می شود. مواد نانو در ماتریس پلیمری قابلیت تحرک

در نهایت، مدیریت دقیق مقدار نانو گرافن و توجه به توزیع یکنواخت آن در ماتریس می‌تواند به بهبود مقاومت به ضربه فاق‌دار چندسازه‌های چوب پلاستیک کمک کند و از کاهش خواص مکانیکی ناشی از کلوخه شدن نانو جلوگیری نماید.

تأثیر مقدار نانو گرافن بر شاخص اکسیژن محدود: نتایج تجزیه واریانس یک‌طرفه نشان داد تأثیر نانو گرافن بر شاخص اکسیژن محدود در سطح اطمینان 95% معنی‌دار است. آزمون دانکن، سطوح مختلف مقادیر نانو گرافن را در چهار گروه مختلف قرار داد (شکل 4). همان‌طوری‌که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش مقدار نانو گرافن تا 1/5 درصد وزنی، شاخص اکسیژن محدود افزایش معنی‌داری یافته است. بیش‌ترین شاخص اکسیژن محدود مربوط به استفاده از 1/5 درصد وزنی نانو گرافن برابر 20/2 درصد و کم‌ترین مقدار آن مربوط به استفاده از 0 درصد وزنی نانو گرافن برابر 19 درصد می‌باشد.

با افزایش میزان مواد نانو، استحکام به ضربه با کاهش مواجه می‌شود (20). علت این پدیده می‌تواند به کلوخه شدن مواد نانو مرتبط باشد که منجر به ایجاد تمرکز تنش‌های متعدد در ماده زمینه می‌شود. این امر به توسعه ترک‌های متعدد و کاهش استحکام ضربه‌ای منجر می‌گردد. اضافه کردن درصد‌های بالایی از نانو گرافن، قابلیت جذب انرژی وارده به ماتریس را کاهش می‌دهد و این امر منجر به ترد شدن نمونه‌هایی با درصد‌های بالاتر نانو گرافن می‌شود (17).

تنش‌های وارده در فصل مشترک میان گرافن و ماده زمینه‌ای می‌تواند منجر به جدایی فاز تقویت‌کننده از فاز زمینه شود. این رویداد سبب شکل‌گیری حفراتی می‌شود که به توسعه ترک‌های متعدد منجر خواهد شد (17). نانو گرافن، به دلیل دارا بودن نسبت منظر (ضریب لاغری) بالا، نقش بازدارنده‌ای برای ترک‌ها ایفا می‌کند و با ایجاد مسیرهای متعدد برای رشد ترک، قابلیت جذب انرژی را افزایش می‌دهد. با این حال، اضافه کردن بیش‌ازحد نانو گرافن سبب کاهش استحکام ضربه‌ای می‌شود (21).



شکل 4- تأثیر مستقل نانو گرافن بر شاخص اکسیژن محدود.

Figure 4. Independent effect of nanographene on limited oxygen index.

گرماسنجی وزنی: نتایج میزان خاکستر باقی مانده مربوط به آنالیز حرارتی در جدول 5 مشاهده می شود. با افزایش میزان نانو گرافن میزان خاکستر باقی مانده افزایش یافت. این نتایج بیانگر آن است که نانو گرافن تأثیر مثبتی بر ثبات حرارتی دارد و به افزایش میزان خاکستر باقی مانده در دماهای بالا کمک می کند (22).

جدول 5- آنالیز گرمایی کامپوزیت چوب پلاستیک.

Table 5. Thermal analysis of wood plastic composite.

وزن باقی مانده در دمای 600 درجه سانتی گراد Weight residue at 600 °C	درصد گرافن Graphene							کاهش وزن Weight loss
	90	80	60	40	20	10	5	
6.78	500	493	483	471	404	338	300	0
7.16	500	493	481	468	364	323	286	0.5
8.71	505	493	483	470	370	329	293	1
9.24	509	494	484	471	381	334	298	1.5

به عنوان یک ماده با ثبات حرارتی بالا شناخته می شود و می تواند به عنوان یک عامل مؤثر در بهبود خواص حرارتی کامپوزیت ها عمل کند. میزان خاکستر باقی مانده در نمونه های مختلف نشان می دهد که با افزایش نانو گرافن، میزان خاکستر نیز افزایش می یابد. این یافته ها نشان دهنده تأثیر مثبت نانو گرافن بر بهبود خواص حرارتی و پایداری حرارتی چندسازه های چوب پلاستیک است (24).

برای درک بهتر تأثیر نانو گرافن، مقایسه با سایر نانومواد نیز ضروری است. نانوسیلیکا به عنوان یک تقویت کننده حرارتی شناخته می شود، اما معمولاً تأثیر کمتری بر دماهای تخریب بالا دارد (25). نانو رس می توانند خواص مکانیکی و حرارتی را بهبود بخشند، اما معمولاً در مقایسه با نانو گرافن، اثرات کمتری بر استحکام مکانیکی دارند (26).

نانولوله های کربنی نیز به دلیل استحکام بالا و هدایت الکتریکی، تأثیر بیشتری بر خواص مکانیکی می گذارند، اما قیمت تولید بالاتری دارند و توزیع یکنواخت آن ها در ماتریس پلیمری دشوارتر است (27).

جدول 5 مربوط به نتایج گرماسنجی وزنی 50 درصد آرد چوب و چهار سطح 0، 0.5، 1 و 1.5 درصد نانو گرافن را نشان می دهد. نتایج بررسی گرماسنجی وزنی کامپوزیت ها نشان داد که اختلاف معنی داری بین دمای تخریب نمونه های مختلف وجود ندارد.

نتایج نشان داد در نمونه ها، سه محدوده تخریب حرارتی وجود دارد که در مرحله اول نمونه ها در دمای بالاتری شروع به تخریب می کنند. در مرحله دوم که میزان آن شدیدتر می باشد با افزایش میزان نانو گرافن نمونه ها در دمای 350 درجه سانتی گراد شروع به تخریب می کنند. در مرحله سوم تخریب با افزایش میزان نانو گرافن در دمای 386 درجه سانتی گراد تخریب ادامه پیدا می کند که در این مرحله میزان دمای تخریب کم تر از سایر نمونه ها می باشد ولی اختلاف دمای تخریب با سایر نمونه ها معنی دار نیست. از دمای 450 تا 500 درجه سانتی گراد تخریب با شدت بیش تر انجام می شود. به طور کلی در نمونه های حاوی چوب و نانو گرافن افت وزن تا محدوده دمایی 500 درجه ادامه داشته و بعد از آن در دمای کاهش وزن روند ثابتی گرفته و یا بسیار ناچیز است (23). نانو گرافن

نانوذرات اکسید فلزات مانند اکسید روی و اکسید تیتانیوم در بهبود خواص الکتریکی و حرارتی مؤثرند، اما ممکن است در دماهای بالا دچار تخریب شوند (28).

ثبات حرارتی چندسازه‌ها یکی از پارامترهای مهم برای فرآیند و کاربردهای این دسته از مواد است. تولید برخی از چندسازه‌ها نیازمند اختلاط الیاف و ماتریس در دمای بالا می‌باشد؛ بنابراین، تخریب حرارتی مواد لیگنوسلولزی می‌تواند تأثیرات نامطلوبی بر خواص چندسازه بگذارد. برای تعیین پایداری چندسازه در شرایط دمایی و بررسی روند تجزیه ناشی از حرارت، از تجزیه گرماسنجی وزنی به‌عنوان ابزاری مناسب استفاده می‌شود.

تأثیر درصد نانو گرافن بر درصد کاهش وزن چندسازه پلی‌پروپیلن/بازیافتی/آرد چوب نوئل در سطح 50 درصد در طول زمان گرمادهی (از دمای 25 تا 700 درجه سانتی‌گراد) نشان داد که در ابتدا یک کاهش وزن جزئی در کلیه نمونه‌ها در دمای کم‌تر از 130 درجه سانتی‌گراد مشاهده شد که به دلیل تبخیر تدریجی رطوبت جذب شده توسط ترکیبات طبیعی است. با افزایش درصد نانو گرافن از 0 به 1/5 درصد، میزان کاهش وزن در دماهای بالاتری (از 125 به 130 درجه سانتی‌گراد) اتفاق می‌افتد.

برای نمونه فاقد گرافن، تجزیه آرد چوب از دمای حدود 223 درجه سانتی‌گراد آغاز می‌شود و برای نمونه حاوی 1/5 درصد گرافن، این دما به حدود 226 درجه سانتی‌گراد منتقل می‌شود و تا دمای حدود 500 درجه سانتی‌گراد ادامه می‌یابد. در ناحیه اول تخریب، مشاهده می‌شود که درصد کاهش وزن یا تخریب حرارتی با افزایش درصد نانو گرافن در دماهای بالاتری اتفاق می‌افتد که نشان‌دهنده تأثیر مثبت نانو گرافن بر بهبود مقاومت حرارتی چندسازه است.

در دمای حدود 400 درجه سانتی‌گراد، ناحیه دوم تخریب آغاز می‌شود که عمدتاً مربوط به تجزیه پلی‌اتیلن می‌باشد (13). در این مرحله، فاصله بین نمودارها تا حدودی بیش‌تر می‌شود و نمونه‌های حاوی درصد‌های بالاتری از گرافن در دماهای بالاتری این تخریب را تجربه می‌کنند. نانو گرافن با ایجاد لایه زغالی، روند تخریب را کاهش داده و به‌تبع آن روند کاهش وزن نیز کم می‌شود (13)؛ بنابراین، می‌توان انتظار داشت که با افزایش مقدار نانوگرافن در چندسازه، فرآیند تشکیل لایه زغالی تسریع شده و در نتیجه عمل احتراق کم‌تر و کاهش وزن کاهش یابد.

افزودن نانو گرافن به‌طورکلی ثبات حرارتی را افزایش می‌دهد. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که افزایش درصد نانو گرافن تأثیر مثبتی بر بهبود مقاومت حرارتی چندسازه دارد. به‌طورکلی، در نمونه‌های حاوی چوب و نانو گرافن، افت وزن تا محدوده دمایی 500 درجه ادامه دارد و بعدازآن کاهش وزن روند ثابتی گرفته یا بسیار ناچیز است. در نمونه حاوی 0% نانوگرافن، 90% کاهش وزن در دمای 500 درجه سانتی‌گراد و در نمونه دارای 1/5% نانو گرافن در 509 درجه سانتی‌گراد اتفاق می‌افتد.

نتایج مربوط به میزان خاکستر باقی‌مانده (وزن باقی‌مانده) از آنالیز حرارتی نشان می‌دهد که با افزایش درصد نانو گرافن، کاهش وزن نمونه در دماهای بالاتری اتفاق می‌افتد. هم‌چنین، با افزایش میزان نانو گرافن در تیمارهای مختلف، میزان خاکستر نیز افزایش یافته است. میزان خاکستر باقی‌مانده در دمای 600 درجه سانتی‌گراد در چهار نمونه چندسازه هنگام استفاده از 0 تا 1/5 درصد نانو گرافن به ترتیب برابر با 6/87، 7/16، 8/71 و 9/24 درصد می‌باشد.

نتایج این پژوهش به‌وضوح تأکید می‌کند که برای دستیابی به خواص بهینه، مدیریت دقیق مقدار نانو گرافن و توجه به توزیع یکنواخت آن در ماتریس

می‌تواند به کلوخه شدن نانو گرافن و توزیع نامناسب آن در ماتریس نسبت داده شود. این پدیده منجر به ایجاد نقاط ضعف در ساختار ماده می‌شود که به تبع آن، عملکرد مکانیکی کاهش می‌یابد.

علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش میزان نانو گرافن، میزان خاکستر باقی‌مانده نیز افزایش یافته و ثبات حرارتی چندسازه بهبود می‌یابد. این بهبود نشان‌دهنده تأثیر مثبت نانو گرافن بر مقاومت حرارتی و کاهش نرخ تخریب حرارتی در دماهای بالا است. نانو گرافن با ایجاد لایه زغالی در دماهای بالا، روند تخریب را کاهش می‌دهد و می‌تواند به عنوان یک عامل مؤثر در افزایش ثبات حرارتی عمل کند.

از این رو، نتایج این پژوهش به وضوح تأکید می‌کند که برای دستیابی به خواص بهینه، مدیریت دقیق مقدار نانو گرافن و توجه به توزیع یکنواخت آن در ماتریس پلیمری ضروری است. استفاده از مقادیر کم نانو گرافن می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی و حرارتی کمک کند، درحالی‌که مقادیر بالاتر ممکن است منجر به تضعیف این خواص شود. به‌طورکلی، این نتایج می‌تواند به طراحی و تولید بهینه نانوچندسازه‌ها کمک کند و مسیر را برای پژوهش‌های آینده در این زمینه هموار سازد.

پلیمری ضروری است. استفاده از مقادیر کم نانو گرافن می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی و حرارتی کمک کند، درحالی‌که مقادیر بالاتر ممکن است منجر به کلوخه شدن و کاهش این خواص شود. به‌طورکلی، این یافته‌ها می‌تواند به طراحی و تولید بهینه نانوچندسازه‌ها کمک کند و مسیر را برای پژوهش‌های آینده هموار سازد (29).

نتیجه‌گیری

این پژوهش به بررسی تأثیر میزان نانو گرافن و آرد چوب بر ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و حرارتی نانو چندسازه‌های ساخته‌شده از آرد چوب نوئل و پلی‌پروپیلن بازیافتی پرداخته است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که با افزایش مقدار نانوگرافن تا 1 درصد وزنی، خواص مکانیکی شامل مقاومت کششی، خمشی، مدول خمشی و کششی و همچنین مقاومت به ضربه فاقدار چندسازه به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. این افزایش به دلیل بهبود چسبندگی بین نانو گرافن و ماتریس پلیمری است که موجب تقویت ساختار کلی و افزایش استحکام می‌شود.

بالاین‌حال، پس از افزودن 1/5 درصد وزنی نانو گرافن، این خواص کاهش می‌یابند. این کاهش

منابع

- 1.Chan, C. M., Vandi, L. J., Pratt, S., Halley, P., Richardson, D., Werker, A., & Laycock, B. (2018). Composites of wood and biodegradable thermoplastics: A Review. *Polymer Reviews*. 58 (3), 444-494.
- 2.López-Barroso, J. (2016). Graphene-based materials functionalization with natural polymeric biomolecules. *Recent Advances in Graphene Research*, 257p.
- 3.Osman, A., Elhakeem, A., Kaytbay, S., & Ahmed, A. (2022). A comprehensive review on the thermal, electrical, and mechanical properties of graphene-based multi-functional epoxy composites. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 5 (2), 547-605.
- 4.Wang, F., Drzal, L. T., Qin, Y., & Huang, Z. (2015). Mechanical properties and thermal conductivity of graphene nanoplatelet/epoxy composites. *Journal of materials science*. 50, 1082-1093.
- 5.Beigloo, J. G., Eslam, H. K., Hemmasi, A. H., Bazayr, B., & Ghasemi, I. (2017). Effect of nanographene on physical, mechanical, and thermal properties and morphology of nanocomposite made of recycled high density polyethylene and wood flour. *BioResources*, 12 (1), 1382-1394.

6. Al-Maqdasi, Z., Gong, G., Nyström, B., Emami, N., & Joffe, R. (2020). Characterization of wood and Graphene Nanoplatelets (GNPs) reinforced polymer composites. *Materials*. 13 (9), 2089.
7. Mudoi, M. P., Sinha, S., & Parthasarthy, V. (2021). Polymer composite material with nettle fiber reinforcement: a review. *Bioresource Technology Reports*. 16, 100860.
8. Huang, H. D., Ren, P. G., Chen, J., Zhang, W. Q., Ji, X., & Li, Z. M. (2012). High barrier graphene oxide nanosheet/poly (vinyl alcohol) nanocomposite films. *Journal of Membrane Science*. 409, 156-163.
9. Parveez, B., Kittur, M. I., Badruddin, I. A., Kamangar, S., Hussien, M., & Umarfarooq, M. A. (2022). Scientific advancements in composite materials for aircraft applications: a review. *Polymers*. 14 (22), 5007.
10. Mohan, V. B., Lau, K.T., Hui, D., & Bhattacharyya, D. (2018). Graphene-based materials and their composites: A review on production, applications and product limitations. *Composites Part B: Engineering*. 142, 200-220.
11. Papageorgiou, D. G., Kinloch, I. A., & Young, R. J. (2017). Mechanical properties of graphene and graphene-based nanocomposites. *Progress in materials science*. 90, 75-127.
12. Ghaje Beigloo, J., & Samariha, A. (2019). A study on composite from recycled high-density polyethylene and wood flour. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*. 16, 9-14.
13. Idumah, C. I., Hassan, A., & Bourbigot, S. (2017). Influence of exfoliated graphene nanoplatelets on flame retardancy of kenaf flour polypropylene hybrid nanocomposites. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 123, 65-72.
14. Sheshmani, S., Ashori, A., & Fashapoyeh, M. A. (2013). Wood plastic composite using graphene nanoplatelets. *International Journal of Biological Macromolecules*. 58, 1-6.
15. Chaharmahali, M., Hamzeh, Y., Ebrahimi, G., Ashori, A., & Ghasemi, I. (2014). Effects of nano-graphene on the physico-mechanical properties of bagasse/ polypropylene composites. *Polymer Bulletin*. 71, 337-349.
16. Jahromi, S. G., Andalibzade, B., & Vossough, S. (2010). Engineering properties of nanoclay modified asphalt concrete mixtures. *Arabian Journal for Science & Engineering (Springer Science & Business Media BV)*. 35p.
17. Potts, J. R., Dreyer, D. R., Bielawski, C. W., & Ruoff, R. S. (2011). Graphene-based polymer nanocomposites. *Polymer*. 52 (1), 5-25.
18. Razaq, A., Bibi, F., Zheng, X., Papadakis, R., Jafri, S. H. M., & Li, H. (2022). Review on graphene, graphene oxide, reduced graphene oxide-based flexible composites: From fabrication to applications. *Materials*. 15 (3), 1012.
19. Gupta, M. K., & Srivastava, R. K. (2016). Mechanical properties of hybrid fibers-reinforced polymer composite: A Review. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 55 (6), 626-642.
20. Martin-Gallego, M., Verdejo, R., López-Manchado, M. A., & Sangermano, M. (2011). Epoxy-graphene UV-cured nanocomposites. *Polymer*. 52 (21), 4664-4669.
21. Papageorgiou, D. G., Li, Z., Liu, M., Kinloch, I. A., & Young, R. J. (2020). Mechanisms of mechanical reinforcement by graphene and carbon nanotubes in polymer nanocomposites. *Nanoscale*. 12 (4), 2228-2267.
22. Khan, F., Hossain, N., Mim, J. J., Rahman, S. M., Iqbal, M. J., Billah, M., & Chowdhury, M. A. (2025). Advances of composite materials in automobile applications—A review. *Journal of Engineering Research*. 13 (2), 1001-1023.
23. Zhang, X., Zhang, J., & Wang, R. (2019). Thermal and mechanical behavior of wood plastic composites by addition of graphene nanoplatelets. *Polymers*. 11 (8), 1365.

24. Sang, M., Shin, J., Kim, K., & Yu, K. J. (2019). Electronic and thermal properties of graphene and recent advances in graphene based electronics applications. *Nanomaterials*. 9 (3), 374.
25. Kumar, R., Singh, S., & Singh, L. P. (2017). Studies on enhanced thermally stable high strength concrete incorporating silica nanoparticles. *Construction and Building Materials*. 153, 506-513.
26. Seaberg, J., Montazerian, H., Hossen, M. N., Bhattacharya, R., Khademhosseini, A., & Mukherjee, P. (2021). Hybrid nanosystems for biomedical applications. *ACS Nano*. 15 (2), 2099-2142.
27. Soni, S. K., Thomas, B., & Kar, V. R. (2020). A comprehensive review on CNTs and CNT-reinforced composites: syntheses, characteristics and applications. *Materials Today Communications*. 25, 101546.
28. Rami, J. M., Patel, C. D., Patel, C. M., & Patel, M. V. (2021). Thermogravimetric analysis (TGA) of some synthesized metal oxide nanoparticles. *Materials Today: Proceedings*. 43, 655-659.
29. Ramakoti, I. S., Panda, A. K., & Gouda, N. (2023). A brief review on polymer nanocomposites: current trends and prospects. *Journal of Polymer Engineering*. 43 (8), 651-679.

