

(OPEN ACCESS)

## Effect of polymer matrix recycling on the mechanical, thermal, and flammability properties of recycled polypropylene/OCC pulp/graphene nanocomposites

Jafar Ebrahimpour Kasmani<sup>\*1</sup>, Ahmad Samariha<sup>2</sup>

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

### Article Info

#### Article type:

Full Length Research Paper

#### Article history:

Received: 04.11.2026

Revised: -----

Accepted: 06.07.2026

#### Keywords:

Flammability behavior,  
Graphene nanoplatelets,  
Mechanical properties,  
Nanocomposite,  
OCC pulp,  
Recycled polypropylene  
(rPP),  
Thermal analysis

### ABSTRACT

**Background and Objectives:** The increasing consumption of polymers and the growing accumulation of plastic waste have intensified the need to utilize recycled polymers and develop sustainable composite materials. Incorporating cellulosic fibers into polymer matrices represents an effective approach to reducing the consumption of virgin polymers. However, the deterioration of mechanical properties caused by repeated recycling limits the broader application of such materials. Graphene nanoplatelets, as two-dimensional nanofillers with exceptional mechanical and thermal characteristics, offer considerable potential for compensating for these property losses. This study aimed to investigate the combined effects of polypropylene condition (virgin vs. three-times recycled) and graphene nanoplatelet content on the mechanical performance, thermal stability, and flammability behavior of polypropylene-based nanocomposites reinforced with recycled cellulosic fibers.

**Materials and Methods:** A factorial experimental design ( $2 \times 3$ ) was employed to manufacture recycled polypropylene (rPP)/old corrugated container (OCC) nanocomposites. Polypropylene was considered at two levels (virgin and three-times recycled), while graphene nanoplatelets were incorporated at three loading levels (0, 0.5, and 1 wt%) as the main experimental variables. The contents of OCC pulp (50 wt%) and maleic anhydride-grafted polypropylene (MAPP) compatibilizer (3 wt%) were kept constant across all formulations. Compounding was performed using a co-rotating twin-screw extruder, and test specimens were subsequently produced through injection molding. Mechanical characterization included tensile, flexural, and notched impact tests conducted according to relevant ASTM standards. Flammability behavior was evaluated using the Limiting Oxygen Index (LOI) test, while thermal stability was assessed through thermogravimetric analysis (TGA). Statistical analyses were performed using analysis of variance (ANOVA) and mean comparison tests at a 95% confidence level.

---

**Results:** The results demonstrated that graphene nanoplatelets significantly influenced most of the mechanical properties and the flammability behavior of the nanocomposites. Increasing graphene content to 1 wt% enhanced tensile strength and tensile modulus by 9.9% and 7.3%, respectively. Similarly, flexural strength and flexural modulus increased by 9.8% and 7.7%, respectively, while notched impact strength improved by approximately 2%. Furthermore, the incorporation of 1 wt% graphene increased the Limiting Oxygen Index by approximately 5.7%, indicating improved flame resistance. Thermogravimetric analysis revealed that graphene promoted higher degradation temperatures and greater char residue, thereby enhancing the thermal stability of the composites. Conversely, recycling polypropylene three times adversely affected the mechanical performance of the materials. Tensile strength and tensile modulus decreased by 4.9% and 21.9%, respectively, while flexural strength and flexural modulus declined by 5.23% and 22.92%, respectively. In addition, notched impact strength decreased by 11.7%. The effect of polypropylene recycling on the Limiting Oxygen Index was not statistically significant, with only a marginal increase of approximately 0.3% observed. Moreover, the use of recycled polypropylene reduced char residue formation and resulted in lower thermal stability. TGA results confirmed that graphene increased both degradation temperature and residual mass, thereby improving thermal performance, whereas recycled polypropylene exhibited comparatively poorer thermal behavior.

**Conclusion:** The findings of this study indicate that graphene nanoplatelets act as an effective reinforcing nanofiller capable of significantly enhancing the mechanical properties, flame resistance, and thermal stability of polypropylene-based composites. The incorporation of graphene up to an optimum level of 1 wt% successfully improved the overall performance of the composites and partially compensated for the property deterioration associated with recycled polypropylene. These results suggest that combining recycled polypropylene, recycled OCC cellulosic fibers, and graphene nanoplatelets provides a promising strategy for developing high-performance, environmentally sustainable composite materials.

---

Cite this article: Ebrahimpour Kasmani, Jafar, Samariha, Ahmad. 2026. Effect of polymer matrix recycling on the mechanical, thermal, and flammability properties of recycled polypropylene/OCC pulp/graphene nanocomposites. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 33 (1), 131-148.



© The Author(s).

DOI:

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

---

## تأثیر اثر بازیافت ماتریس پلیمری بر خواص مکانیکی، حرارتی و رفتار آتش‌گیری نانوکامپوزیت پلی‌پروپیلن بازیافتی/خمیر OCC/نانوگرافن

جعفر ابراهیم پور کاسمانی<sup>۱\*</sup>، احمد شمربها<sup>۲</sup>

۱. نویسنده مسئول، دانشیار گروه چوب و کاغذ، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران. رایانامه: [kasmani@iau.ac.ir](mailto:kasmani@iau.ac.ir)

۲. استادیار گروه علوم مهندسی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران. رایانامه: [asamariha@tvu.ac.ir](mailto:asamariha@tvu.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: افزایش مصرف پلیمرها و رشد پسماندهای پلاستیکی، ضرورت استفاده از پلیمرهای بازیافتی و توسعه مواد کامپوزیتی پایدار را افزایش داده است. در این میان، استفاده از الیاف سلولزی در ماتریس‌های پلیمری روشی مؤثر برای کاهش مصرف پلیمرهای بکر است، اما افت خواص مکانیکی ناشی از بازیافت، کاربرد این مواد را محدود می‌کند. نانوگرافن به‌عنوان یک نانوفیلر دوبعدی با خواص مکانیکی و حرارتی ممتاز، می‌تواند این افت خواص را جبران کند. هدف از این پژوهش، بررسی اثر هم‌زمان وضعیت پلی‌پروپیلن (بکر و سه‌بار بازیافتی) و نانوگرافن بر خواص مکانیکی، حرارتی و رفتار آتش‌گیری نانوکامپوزیت‌های پایه پلی‌پروپیلن و الیاف سلولزی بازیافتی است.
واژه‌های کلیدی: آنالیز حرارتی، پلی‌پروپیلن بازیافتی، خمیر کاغذ OCC، خواص مکانیکی، رفتار آتش‌گیری، نانوکامپوزیت، نانوگرافن	مواد و روش‌ها: در این پژوهش، نانوکامپوزیت‌های IPP/OCC بر اساس طرح آزمایشی فاکتوریل ۳×۲ تهیه شدند. پلی‌پروپیلن در دو سطح بکر و سه‌بار بازیافتی و نانوگرافن در سه سطح ۰، ۰/۵ و ۱ درصد وزنی به‌عنوان متغیرهای اصلی در نظر گرفته شدند. مقدار OCC (۵۰ درصد وزنی) و عامل سازگارکننده MAPP (۳ درصد وزنی) در تمامی تیمارها ثابت بود. اختلاط مواد با استفاده از اکسترودر دو ماردرانه انجام شد و نمونه‌های آزمون به روش قالب‌گیری تزریقی تهیه گردیدند. آزمون‌های مکانیکی شامل کشش، خمش و ضربه فاقدار مطابق استانداردهای ASTM انجام شد. رفتار آتش‌گیری با آزمون شاخص اکسیژن محدود و پایداری حرارتی با آنالیز گرماسنجی وزنی بررسی گردید. تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از آزمون تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد انجام شد.
	یافته‌ها: نتایج نشان داد که افزودن نانوگرافن اثر معنی‌داری بر اغلب خواص مکانیکی و رفتار آتش‌گیری نانوکامپوزیت‌ها دارد. با افزایش مقدار نانوگرافن تا ۱ درصد وزنی، مقاومت و مدول

کششی به ترتیب ۹/۹ و ۷/۳ درصد، مقاومت و مدول خمشی ۹/۸ و ۷/۷ درصد و مقاومت به ضربه فاقدار حدود ۲ درصد افزایش یافت. هم‌چنین شاخص اکسیژن محدود با افزودن ۱ درصد نانوگرافن حدود ۵/۷ درصد افزایش پیدا کرد که بیانگر بهبود رفتار آتش‌گیری است. نتایج گرماسنجی وزنی نشان داد که حضور نانوگرافن موجب افزایش دمای تخریب و میزان خاکستر باقی‌مانده‌شده و پایداری حرارتی کامپوزیت‌ها را بهبود می‌بخشد. در مقابل، بازیافت پلی‌پروپیلن تا سه مرتبه منجر به کاهش خواص مکانیکی شد، به طوری که مقاومت و مدول کششی به ترتیب ۹/۴ و ۹/۲۱ درصد، مقاومت و مدول خمشی ۲۳/۵ و ۲۲/۹۲ درصد و مقاومت به ضربه فاقدار ۱۱/۷ درصد کاهش یافت. اثر بازیافت پلی‌پروپیلن بر شاخص اکسیژن محدود از نظر آماری معنی‌دار نبود و تنها افزایش جزئی حدود ۰/۳ درصد مشاهده شد. هم‌چنین استفاده از پلی‌پروپیلن بازیافتی موجب کاهش میزان خاکستر باقیمانده و افت پایداری حرارتی گردید. TGA نشان داد نانوگرافن دمای تخریب و میزان باقی‌مانده وزنی را افزایش داده و پایداری حرارتی را بهبود می‌دهد، درحالی‌که پلیمر بازیافتی عملکرد حرارتی ضعیف‌تری نشان داد.

**نتیجه‌گیری:** براساس نتایج این پژوهش، نانوگرافن به‌عنوان یک تقویت‌کننده مؤثر می‌تواند نقش مهمی در بهبود خواص مکانیکی، افزایش مقاومت در برابر آتش‌گیری و ارتقای پایداری حرارتی کامپوزیت‌های پایه پلی‌پروپیلن ایفا کند. افزودن نانوگرافن تا سطح بهینه ۱ درصد وزنی، ضمن بهبود عملکرد کلی کامپوزیت، توانست بخشی از افت خواص ناشی از استفاده از پلی‌پروپیلن بازیافتی را جبران نماید. این یافته‌ها نشان می‌دهد که ترکیب پلی‌پروپیلن بازیافتی، الیاف سلولزی بازیافتی و نانوگرافن می‌تواند رویکردی مناسب برای تولید کامپوزیت‌های با عملکرد بالاتر و سازگارتر با محیط‌زیست باشد.

استناد: ابراهیم‌پور کاسمانی، جعفر، ثمریها، احمد (۱۴۰۵). تأثیر اثر بازیافت ماتریس پلیمری بر خواص مکانیکی، حرارتی و رفتار آتش‌گیری نانوکامپوزیت پلی‌پروپیلن بازیافتی/اکمیر OCC/نانوگرافن. *نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل*، ۳۳ (۱)، ۱۴۸-۱۳۱.

DOI:



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

## مقدمه

یکی از راهکارهای مؤثر برای مصرف حجمی پلیمرهای بازیافتی و افزایش ارزش افزوده آنها، استفاده در کامپوزیت‌های چوب-پلاستیک<sup>۲</sup> است (۸). در این مواد، الیاف لیگنوسلولزی به‌عنوان فاز تقویت‌کننده یا پرکننده در یک ماتریس پلیمری پراکنده می‌شوند و ترکیبی از مزایای چوب (تجدیدپذیری، استحکام ویژه بالا) و پلاستیک (فرآیندپذیری و دوام) را ارائه می‌دهند (۹). در سال‌های اخیر، استفاده از الیاف سلولزی بازیافتی حاصل از کاغذ و مقوا، به‌ویژه مقوای کنگره‌ای کهنه<sup>۳</sup>، به‌عنوان جایگزینی کم‌هزینه و پایدار برای آرد چوب مورد توجه قرار گرفته است (۱۰). با این حال، ناسازگاری ذاتی بین ماهیت آب‌دوست الیاف سلولزی و ماتریس آب‌گریز پلی‌پروپیلن، چسبندگی بین‌فازی را محدود می‌کند که معمولاً با استفاده از عوامل جفت‌کننده‌ای مانند پلی‌پروپیلن پیوندشده با انیدرید مالئیک<sup>۴</sup> بهبود می‌یابد (۱۱).

در کنار راهبردهای مختلف بهبود عملکرد پلیمرهای بازیافتی، فناوری نانو به‌عنوان رویکردی مؤثر برای جبران افت خواص ناشی از فرآیند بازیافت مورد توجه قرار گرفته است (۱۲). در این میان، نانوگرافن و مشتقات آن به دلیل ساختار دوبعدی، نسبت ابعادی بالا و مجموعه‌ای از خواص مکانیکی، حرارتی و الکتریکی ممتاز، جایگاه ویژه‌ای در توسعه نانوکامپوزیت‌های پلیمری یافته‌اند. این نانوساختار کربنی دارای استحکام کششی نظری در حدود ۱۳۰ گیگاپاسکال، مدول یانگ نزدیک به ۱ تراپاسکال، سطح ویژه بسیار بالا (حدود ۲۶۳۰ مترمربع بر گرم) و هدایت حرارتی قابل توجه است که آن را به یکی از مؤثرترین نانوپرکننده‌ها برای تقویت پلیمرها تبدیل کرده است (۱۳).

رشد شتابان صنعت پلیمر طی دهه‌های اخیر، اگرچه نقشی اساسی در توسعه فناوری و بهبود کیفیت زندگی ایفا کرده است، هم‌زمان به بحران فزاینده پسماندهای پلاستیکی و فشار بی‌سابقه بر منابع طبیعی منجر شده است. تولید جهانی پلاستیک از حدود ۲ میلیون تن در سال ۱۹۵۰ به بیش از ۴۰۰ میلیون تن در سال‌های اخیر افزایش یافته است، درحالی‌که تنها بخش محدودی از این مواد به‌طور مؤثر بازیافت می‌شوند (۱). انباشت گسترده پسماندهای پلیمری در محیط‌زیست، پیامدهای مخربی برای اکوسیستم‌های آبی و خاکی، سلامت موجودات زنده و زنجیره غذایی انسان به‌همراه داشته است (۲). در پاسخ به این چالش‌ها، مفهوم اقتصاد چرخشی به‌عنوان یک رویکرد پایدار، بر کاهش مصرف منابع اولیه، افزایش طول عمر مواد و بازیابی ارزش آنها در پایان چرخه عمر تأکید دارد (۳).

در میان ترموپلاستیک‌های پرمصرف، پلی‌پروپیلن به دلیل خواص مکانیکی مناسب، مقاومت شیمیایی بالا، نقطه ذوب نسبتاً زیاد و هزینه تولید پایین، دومین پلیمر پرمصرف جهان پس از پلی‌اتیلن محسوب می‌شود (۴). کاربرد گسترده پلی‌پروپیلن در صنایع بسته‌بندی، خودروسازی، ساختمان و کالاهای مصرفی، آن را به یکی از اجزای اصلی جریان پسماندهای پلاستیکی تبدیل کرده است (۵). با این حال، استفاده از پلی‌پروپیلن بازیافتی با چالش‌هایی همراه است. فرآیندهای مکرر ذوب و شکل‌دهی منجر به تخریب حرارتی، شکست زنجیره‌های پلیمری، کاهش وزن مولکولی و افزایش شاخص جریان مذاب<sup>۱</sup> می‌شود (۶). این تغییرات به افت قابل توجه خواص مکانیکی، به‌ویژه استحکام و چقرمگی ضربه، منجر شده و دامنه کاربرد پلی‌پروپیلن بازیافتی را محدود می‌کند (۷).

2- Wood-Plastic Composites: WPCs  
3- Old Corrugated Containers: OCC  
4- Maleic anhydride-grafted polypropylene (MAPP)

1- Melt Flow Index (MFI)

مطالعات اخیر نشان داده‌اند که افزودن مقادیر کم نانوگرافن به ماتریس‌های پلیمری می‌تواند موجب بهبود چشمگیر خواص مکانیکی، حرارتی، الکتریکی و سدگری شود. این بهبودها عمدتاً ناشی از برهم‌کنش قوی بین نانوگرافن و زنجیره‌های پلیمری، انتقال مؤثر تنش در فصل مشترک، محدود شدن تحرک زنجیره‌های پلیمری و ایجاد شبکه‌های پیوسته نانوپرکننده در ساختار کامپوزیت است (۱۴). هم‌چنین حضور نانوگرافن می‌تواند از رشد و انتشار ترک‌ها جلوگیری کرده و مقاومت ماده در برابر تخریب مکانیکی را افزایش دهد (۱۵).

علاوه بر بهبود خواص مکانیکی، نانوگرافن نقش مؤثری در ارتقای پایداری حرارتی و کاهش اشتعال‌پذیری کامپوزیت‌های پلیمری ایفا می‌کند. در هنگام احتراق، تشکیل یک لایه زغالی متراکم و پایدار در سطح ماده، به‌عنوان مانعی فیزیکی در برابر انتقال حرارت و نفوذ اکسیژن عمل کرده و موجب کاهش نرخ آزادسازی حرارت و انتشار محصولات فرار قابل‌اشتعال می‌شود (۱۶).

با وجود این مزایا، افزودن نانوگرافن می‌تواند رفتار رئولوژیکی مذاب را نیز تحت‌تأثیر قرار دهد. شاخص جریان مذاب (MFI) که به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی فرآیندپذیری پلیمرها شناخته می‌شود، تحت‌تأثیر نوع، مقدار و کیفیت پراکنش نانوگرافن قرار می‌گیرد (۱۷). در پلیمرهای بازیافتی، کاهش وزن مولکولی ناشی از تخریب حرارتی و مکانیکی طی چرخه‌های بازیافت معمولاً با افزایش MFI همراه است. این موضوع می‌تواند بر نحوه توزیع و پراکنش نانوگرافن در ماتریس پلیمری اثر گذاشته و در برخی موارد منجر به تجمع نانوذرات و کاهش کارایی تقویت‌کنندگی آن‌ها شود (۱۸).

اگرچه پژوهش‌های گسترده‌ای درباره نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر گرافن انجام شده است، بخش عمده این

مطالعات بر پلیمرهای بکر متمرکز بوده‌اند. در مقابل، پژوهش‌های انجام‌شده بر پلیمرهای بازیافتی هنوز محدود است و به‌ویژه بررسی اثر هم‌زمان نانوگرافن بر خواص مکانیکی، حرارتی، رئولوژیکی و فرآیندپذیری این مواد نیازمند مطالعات بیش‌تری است. نتایج پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که استفاده هدفمند از نانوگرافن می‌تواند راهکاری مؤثر برای بازیابی بخشی از خواص ازدست‌رفته پلیمرهای بازیافتی و توسعه مواد پایدار با عملکرد مهندسی مناسب باشد (۱۹).

به‌ویژه، اثر هم‌زمان تغییرات MFI ناشی از بازیافت پلیمر و افزودن نانوگرافن بر خواص نانوکامپوزیت‌های هیبریدی سه‌جزئی متشکل از پلی‌پروپیلن بازیافتی، خمیرکاغذ OCC و نانوگرافن، به‌صورت نظام‌مند مورد بررسی قرار نگرفته است.

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف بررسی جامع اثر شاخص جریان مذاب ماتریس پلیمری و سطوح مختلف نانوگرافن بر ریزساختار، خواص مکانیکی، پایداری حرارتی و رفتار آتش‌گیری نانوکامپوزیت‌های PP/OCC طراحی شده است.

با وجود مطالعات متعدد درباره نانوکامپوزیت‌های پلی‌پروپیلن/نانوگرافن، اطلاعات محدودی درباره اثر نانوگرافن در سامانه‌های حاوی پلی‌پروپیلن چندبار بازیافتی و الیاف سلولزی بازیافتی به‌صورت هم‌زمان وجود دارد. هم‌چنین نقش نانوگرافن در جبران افت خواص ناشی از بازیافت چندبار پلی‌پروپیلن و تأثیر آن بر خواص مکانیکی، رفتار آتش‌گیری و پایداری حرارتی چنین سامانه‌هایی کم‌تر مورد بررسی قرار گرفته است. از این رو، پژوهش حاضر با تمرکز بر این خلأ علمی، به بررسی اثر نانوگرافن در کامپوزیت‌های حاوی پلی‌پروپیلن بکر و سه‌بار بازیافتی و الیاف سلولزی بازیافتی پرداخته است.

## مواد و روش‌ها

**پلی پروپیلن:** پلی پروپیلن گرید V30S با دانسیته ۰/۹۵۲ گرم بر سانتی متر مکعب و شاخص جریان مذاب ۱۸ گرم در ۱۰ دقیقه از شرکت پتروشیمی اراک تهیه شد. به منظور تهیه پلی پروپیلن بازیافتی، گرانول‌های پلی پروپیلن بکر تحت سه چرخه متوالی ذوب- فرآوری در اکسترودر دو ماردونه و در شرایط فرآیندی ثابت (دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت ماردونه ۱۰۰ دور بر دقیقه) قرار گرفتند. پس از هر چرخه، مواد دانه‌بندی و مجدداً وارد چرخه بعدی شدند.

**خمیر کاغذ OCC:** الیاف سلولزی مورد استفاده از مقوای کنگره‌ای کهنه تهیه شد. پس از آسیاب مکانیکی، خمیر حاصل از الک با مش ۶۰ عبور داده شد. به منظور کاهش اثر رطوبت، خمیر کاغذ OCC پیش از اختلاط به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای  $100 \pm 3$  درجه سانتی‌گراد خشک شدند تا میزان رطوبت آن‌ها به کم‌تر از ۲ درصد وزنی برسد.

**نانوگرافن:** نانوگرافن مورد استفاده از نوع AO-4 با خلوص ۹۸/۵ درصد از شرکت Graphene Supermarket (ایالات متحده) تهیه شد. بر اساس اطلاعات سازنده، ضخامت متوسط صفحات حدود ۶۰ نانومتر، قطر جانبی در محدوده ۳ تا ۷ میکرون و سطح ویژه بیش از ۱۵ مترمربع بر گرم گزارش شده است. در این پژوهش، نانوگرافن در سطوح ۰، ۰/۵ و ۱ درصد وزنی به فرمولاسیون کامپوزیت افزوده شد. سطوح ۰/۵ و ۱ درصد وزنی نانوگرافن با استناد به مطالعات

پیشین و با توجه به گزارش اثربخشی این محدوده در بهبود خواص کامپوزیت‌های پلیمری و جلوگیری از تجمع نانوذرات انتخاب شدند.

**عامل سازگارکننده:** برای بهبود چسبندگی بین فاز پلی پروپیلنی و الیاف سلولزی، پلی پروپیلن پیوندخورده با انیدرید مالئیک با دانسیته ۰/۹۶۵ گرم بر سانتی متر مکعب، شاخص جریان مذاب ۷ گرم در ۱۰ دقیقه و مقدار انیدرید مالئیک پیوند خورده ۱ درصد به‌عنوان عامل سازگارکننده استفاده شد. مقدار عامل سازگارکننده MAPP در تمامی تیمارها ثابت نگه داشته شد تا اثر نانوگرافن و وضعیت بازیافت پلی پروپیلن به‌عنوان متغیرهای اصلی پژوهش به‌طور مستقل ارزیابی شود. مقدار انتخاب شده بر اساس مقادیر متداول گزارش شده در منابع برای کامپوزیت‌های پایه پلی پروپیلن و الیاف سلولزی تعیین شد.

**تهیه نانوکامپوزیت‌ها:** نانوکامپوزیت‌ها بر اساس یک طرح آزمایشی فاکتوریل  $3 \times 2$  در قالب طرح کاملاً تصادفی تهیه شدند. در این طرح، سطح نانوگرافن به‌عنوان فاکتور اول در سه سطح ۰، ۰/۵ و ۱ درصد وزنی و وضعیت پلی پروپیلن به‌عنوان فاکتور دوم در دو سطح پلی پروپیلن بکر و پلی پروپیلن سه بار بازیافتی در نظر گرفته شد. درصد خمیر کاغذ OCC (۵۰ درصد وزنی) و عامل سازگارکننده MAPP (۳ درصد وزنی) برای تمامی تیمارها ثابت نگه داشته شد. فرمولاسیون نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- درصد اجزای نانوکامپوزیت در تیمارهای مختلف.

**Table 1. Percentage of Nanocomposite Parts in Different Treatments.**

شماره تیمار Treatment Number	OCC (phc) Old Courugated Countainer (phr)	پلی پروپیلن (phc) Polypropylene (phr)	نانوگرافن (phr) Nanographene	سازگارکننده (phr) Compatibilizer	بازیافت پلیمر Polymer Recycling
1	50	50	0	3	virgin
2	50	50	0.5	3	virgin
3	50	50	1	3	virgin
4	50	50	0	3	3 <sup>rd</sup> recycling
5	50	50	0.5	3	3 <sup>rd</sup> recycling
6	50	50	1	3	3 <sup>rd</sup> recycling

phc: per hundred resin

آزمون کشش مطابق استاندارد ASTM D638 با استفاده از دستگاه آزمون اینسترون (مدل ۴۴۸۶) و با سرعت کشش ۲ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. آزمون خمش سه نقطه‌ای: مطابق استاندارد ASTM D790 و با سرعت بارگذاری ۲ میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت. آزمون ضربه فاقدار ایزود: مطابق استاندارد ASTM D256 با استفاده از دستگاه Zwick (مدل ۵۱۰۲) انجام شد.

رفتار آتش‌گیری: شاخص اکسیژن محدود<sup>۳</sup> مطابق استاندارد ASTM D2863 اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها با ابعاد ۱۵۰×۵۰×۴ میلی‌متر تهیه و آزمون در شرایط محیطی کنترل شده انجام گرفت.

آنالیز حرارتی: پایداری حرارتی نمونه‌ها با استفاده از آنالیز گرماسنجی وزنی در اتمسفر نیتروژن بررسی شد. حدود ۵ تا ۷ میلی‌گرم از هر نمونه از دمای محیط تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد با نرخ گرمایش ۲۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه حرارت داده شد.

تجزیه و تحلیل آماری: داده‌های تجربی با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۲ و در قالب طرح فاکتوریل مورد تحلیل واریانس دوطرفه قرار گرفتند. پیش از انجام تحلیل واریانس دوطرفه، نرمال بودن توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک در سطح

ابتدا مواد اولیه مطابق با فرمولاسیون هر تیمار به‌طور دقیق توزین و به‌صورت دستی پیش‌مخلوط شدند. سپس مخلوط‌ها به اکسترودر دو ماردونه (دو مارپیچه)<sup>۱</sup> تغذیه شدند. پروفیل دمایی اکسترودر برای تمامی تیمارها ثابت و از ناحیه تغذیه تا قالب<sup>۲</sup> به‌ترتیب ۱۵۵، ۱۶۰، ۱۶۵ و ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد. سرعت دورانی ماردونه‌ها ۷۰ دور بر دقیقه بود. مواد خروجی پس از عبور از حمام آب سرد، توسط دستگاه خردکن نیمه‌صنعتی Wieser مدل WG-Ls 200 ساخت کشور آلمان خرد شده و به گرانول تبدیل شدند. گرانول‌های حاصل به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد خشک شدند.

نمونه‌های آزمون با استفاده از دستگاه قالب‌گیری تزریقی نیمه‌صنعتی تولید شدند. دمای سیلندر تزریق در سه ناحیه به ترتیب ۱۴۵، ۱۵۵ و ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد، دمای قالب ۴۰ درجه سانتی‌گراد، فشار تزریق ۸۰ مگاپاسکال و زمان چرخه کمتر از ۲۰ ثانیه تنظیم شد.

آزمون‌های مکانیکی: کلیه نمونه‌ها پیش از انجام آزمون‌ها به مدت ۴۸ ساعت در شرایط استاندارد (دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵۰ درصد) مشروط‌سازی شدند.

1- Dr. Collien

2- Die

3- Limited Oxygen Index (LOI)

## نتایج

خواص مکانیکی: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی هر دو فاکتور نانوگرافن و وضعیت پلیمر بر همه خواص مکانیکی (به جز مقاومت ضربه) در سطح خطا ۰/۰۵ معنی دار بود. اثر متقابل این دو فاکتور بر هیچ یک از خواص معنی دار نبود (جدول ۲).

معنی داری ۰/۰۵ بررسی شد. نتایج نشان داد که برای همه تیمارها توزیع تمام داده‌ها نرمال است. به غیر از آزمون TGA برای هر تیمار، تعداد تکرارها برابر با ۳ در نظر گرفته شد، مقایسه میانگین‌ها با آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح اطمینان ۹۵ درصد انجام شد.

جدول ۲- تجزیه واریانس (مقدار F و سطح معنی داری) تأثیر نانوگرافن بر مقاومت‌ها.

Table 2. Analysis of Variance (F Value and Significance Level) of the Effect of Nano Graphene on Resistances.

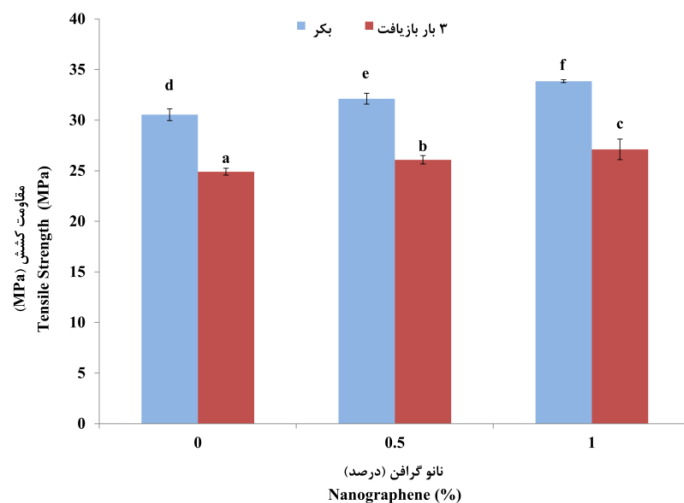
مقدار F و سطح معنی داری شاخص اکسیژن محدود F-value and significance level of Limited Oxygen Index	مقدار F و سطح معنی داری مقاومت به ضربه فاق دار F-value and significance level of Impact Resistance	مقدار F و سطح معنی داری مدول خمشی F-value and significance level of Flexural modulus	مقدار F و سطح معنی داری مقاومت خمشی F-value and significance level of Flexural strength	مقدار F و سطح معنی داری مدول کشش F-value and significance level of tensile modulus	مقدار F و سطح معنی داری مقاومت کشش F-value and significance level of tensile strength	متغیرهای ساخت Structural Variables
1.923 <sup>ns</sup>	32.618*	53.393*	100.390*	103.429*	522.806*	بازیافت پلیمر Polymer Recycling (PR)
0.191	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	سطح معنی داری Sig.
243.923*	0.435 <sup>ns</sup>	2.652 <sup>ns</sup>	37.469*	4.630*	35.170*	نانوگرافن Nanographene (NG)
0.000	0.657	0.111	0.000	0.032	0.000	سطح معنی داری Sig.
0.077 <sup>ns</sup>	0.939 <sup>ns</sup>	0.027 <sup>ns</sup>	0.764 <sup>ns</sup>	0.062 <sup>ns</sup>	1.435 <sup>ns</sup>	بازیافت پلیمر * نانوگرافن (PR*NG)
0.926	0.418	0.974	0.487	0.940	0.276	سطح معنی داری Sig.
Polymer Recycling (PR)						
Nanographene (NG)						
Polymer Recycling × Nanographene (PR*NG)						

پلی پروپیلن بازیافتی فاقد نانوگرافن (تیمار ۴) به ۲۴/۹۱ مگاپاسکال کاهش یافت. افزودن ۱٪ نانوگرافن به پلی پروپیلن بازیافتی (تیمار ۶) مقاومت کششی را به ۲۷/۱۱ مگاپاسکال بهبود بخشید.

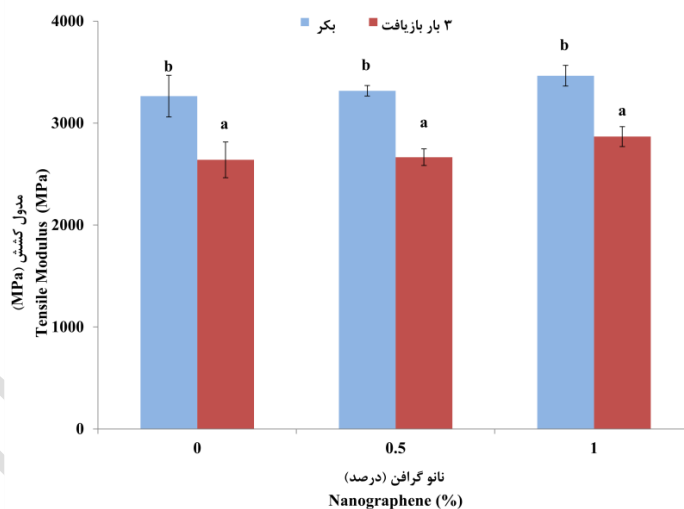
مقاومت و مدول کششی: با افزایش نانوگرافن از ۰ به ۱٪، مقاومت کششی نانوکامپوزیت‌های حاوی پلی پروپیلن بکر از ۳۰/۵۳ به ۳۳/۸۴ مگاپاسکال و مدول کششی از ۳۲۶۳ به ۳۴۶۵ مگاپاسکال افزایش یافت. در مقابل، مقاومت کششی نمونه‌های حاوی

در همه شکل‌ها، Error bar نشان‌دهنده انحراف معیار داده‌ها بر اساس تکرارهای آزمایش هستند.

مدول کششی نمونه‌های حاوی پلی‌پروپیلن بازیافتی فاقد نانوگرافن به ۲۶۳۹ مگاپاسکال کاهش یافت. افزودن ۱٪ نانوگرافن به پلی‌پروپیلن بازیافتی مدول کششی را به ۲۸۶۷ مگاپاسکال افزایش یافت (شکل ۱، الف و ب).



(الف)



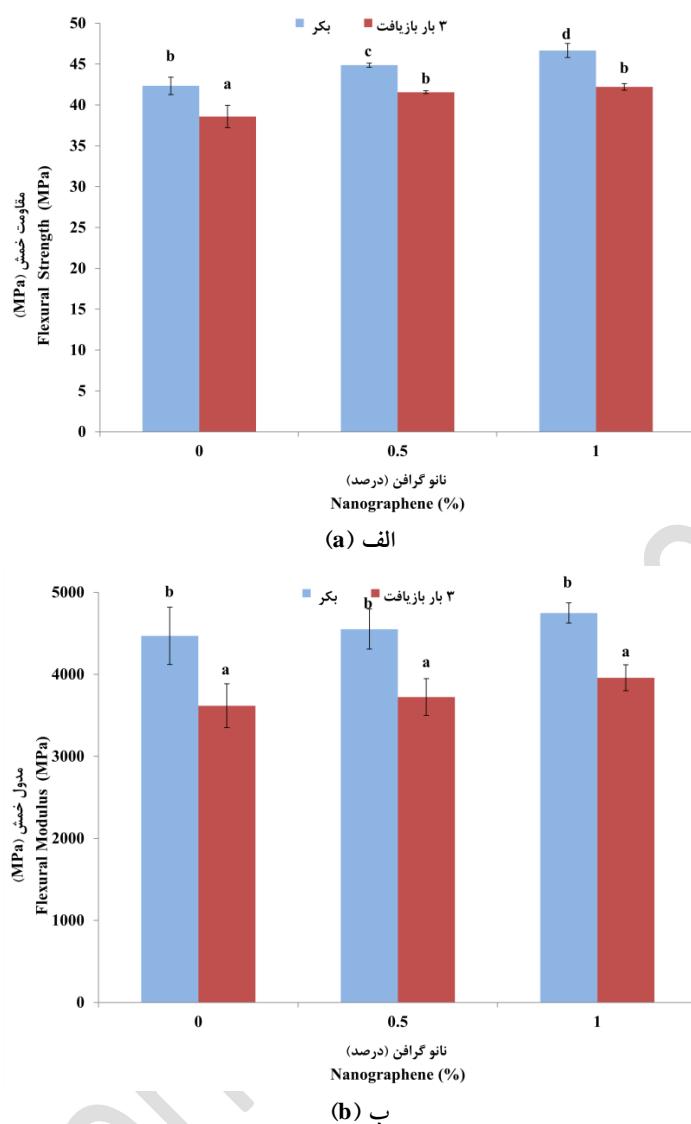
(ب)

شکل ۱- تأثیر مستقل نانوگرافن بر مقاومت کششی (الف) و مدول کششی (ب).

Figure 1. Independent Effect of Nanographene on Tensile Strength (a) and Tensile Modulus (b).

شد مقاومت و مدول خمشی در نمونه‌های فاقد نانوگرافن به ۳۸/۵۹ و ۳۶۱۷ مگاپاسکال کاهش یابد (شکل ۲، الف و ب).

مقاومت و مدول خمشی: افزودن ۱٪ نانوگرافن به پلی‌پروپیلن بکر، مقاومت خمشی را از ۴۲/۳۳ به ۴۶/۶۶ مگاپاسکال و مدول خمشی را از ۴۴۶۹ به ۴۷۴۷ مگاپاسکال افزایش داد. بازیافت پلیمر باعث

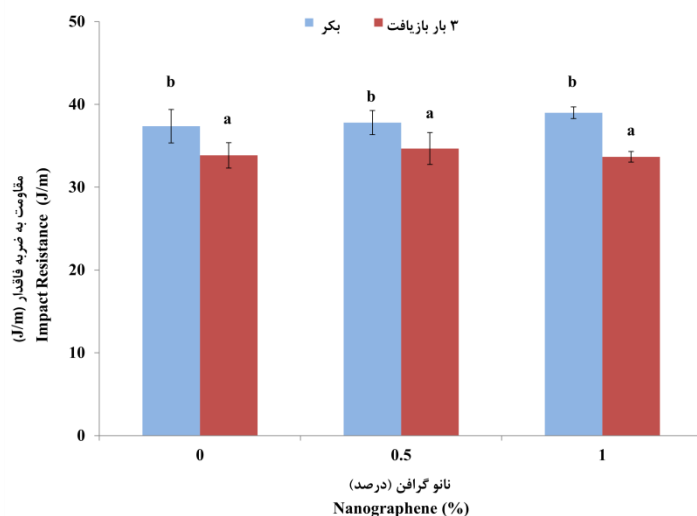


شکل ۲- تأثیر مستقل نانوگرافن بر مقاومت خمش (الف) و مدول خمش (ب).

Figure 2. Independent Effect of Nanographene on Flexural Strength (a) and Flexural Modulus (b).

مقاومت به ضربه فاقدار: اثر اصلی نانوگرافن بر مقاومت ضربه از نظر آماری معنی دار نبود. باین حال، بازیافت پلیمر منجر به کاهش مقاومت ضربه از ۳۷/۳۵ به ۳۳/۸۴ ژول بر متر در نمونه های فاقد نانوگرافن شد (شکل ۳).

مقاومت ضربه فاقدار: اثر اصلی نانوگرافن بر مقاومت ضربه از نظر آماری معنی دار نبود. باین حال، بازیافت پلیمر منجر به کاهش مقاومت ضربه از ۳۷/۳۵ به ۳۳/۸۴ ژول بر متر در نمونه های فاقد نانوگرافن شد (شکل ۳).



شکل ۳- تأثیر مستقل نانوگرافن بر مقاومت به ضربه فاقدار.

Figure 3. Independent Effect of Nanographene on Impact Resistance.

بالاتر شده است. در نمونه‌های بکر، افزایش مقدار نانوگرافن از صفر به ۱ درصد وزنی موجب افزایش دماهای مشخصه تخریب و بهبود پایداری حرارتی گردید. روند مشابهی در نمونه‌های بازیافتی مشاهده شد، هرچند مقادیر مشخصه حرارتی در تمامی سطوح نانوگرافن اندکی کمتر از نمونه‌های بکر بود.

منحنی‌های DTG تنها یک پیک اصلی تخریب را برای تمامی نمونه‌ها نشان دادند که بیانگر حاکم بودن یک مکانیزم غالب تخریب حرارتی است. با این حال، موقعیت پیک DTG تحت تأثیر مقدار نانوگرافن و تعداد دفعات بازیافت قرار گرفت. دمای بیشینه نرخ تخریب (Tmax) از حدود ۴۷۸ درجه سانتی‌گراد در نمونه ۰ درصد نانوگرافن و پلیمر خالص به حدود ۴۹۱ درجه سانتی‌گراد در نمونه ۱ درصد نانوگرافن افزایش یافت. در نمونه‌های بازیافتی نیز Tmax از حدود ۴۷۰ درجه سانتی‌گراد به ۴۸۵ درجه سانتی‌گراد افزایش پیدا کرد.

انتقال پیک DTG به سمت دماهای بالاتر نشان می‌دهد که حضور نانوگرافن موجب افزایش مقاومت حرارتی ساختار پلیمری شده و انرژی بیشتری برای

رفتار آتش‌گیری (شاخص اکسیژن محدود): نتایج آزمون شاخص اکسیژن محدود در جدول ۳ ارائه شده است. افزودن نانوگرافن شاخص اکسیژن محدود را به‌طور معنی‌داری افزایش داد. شاخص اکسیژن محدود نمونه‌های حاوی پلی‌پروپیلن بکر از ۱۹/۰۰ درصد (بدون نانوگرافن) به ۲۰/۰۷ درصد (با ۱٪ نانوگرافن) رسید. اثر بازیافت پلیمر بر شاخص اکسیژن محدود از نظر آماری معنی‌دار نبود.

نتایج گرم‌اوزن‌سنجی (TGA) و مشتق گرم‌اوزن‌سنجی (DTG): داده‌های کمی حاصل از آنالیز گرم‌اوزن‌سنجی وزنی در جدول ۳ خلاصه شده است. به‌منظور ارزیابی اثر نانوگرافن و فرآیند بازیافت بر پایداری حرارتی نمونه‌ها، آزمون‌های TGA و DTG انجام شد. منحنی‌های TGA نشان دادند که تمامی نمونه‌ها تا محدوده حدود ۲۸۰ تا ۳۲۰ درجه سانتی‌گراد پایداری حرارتی مناسبی داشته و کاهش جرم محسوسی مشاهده نمی‌شود. پس‌ازاین محدوده، فرآیند تخریب حرارتی آغاز شده و با افزایش دما شدت می‌یابد.

مقایسه منحنی‌های TGA نشان داد که افزودن نانوگرافن موجب انتقال فرآیند تخریب به دماهای

تخریب‌های ساختاری می‌شود، اما حضور نانوگرافن قادر است بخش قابل‌توجهی از این اثرات را جبران کند. به‌ویژه نمونه بازیافتی حاوی ۱ درصد وزنی نانوگرافن هم‌چنان پایداری حرارتی بسیار مطلوبی از خود نشان داد که این موضوع ظرفیت بالای نانوگرافن را برای توسعه مواد پلیمری پایدار و قابل بازیافت تأیید می‌کند.

در مجموع، نتایج TGA و DTG نشان دادند که نانوگرافن از طریق ایجاد اثر مانعی، محدودسازی انتقال جرم و حرارت و افزایش تشکیل ساختارهای کربنی پایدار، موجب بهبود قابل‌توجه پایداری حرارتی کامپوزیت‌ها می‌شود. هم‌چنین استفاده از نانوگرافن می‌تواند افت خواص ناشی از بازیافت چندباره را تا حد زیادی جبران کرده و امکان استفاده مجدد از مواد پلیمری را بدون کاهش چشمگیر عملکرد حرارتی فراهم سازد.

وقوع تخریب حرارتی مورد نیاز است. علاوه بر این، کاهش جزئی Tmax در نمونه‌های بازیافتی نسبت به نمونه‌های بکر را می‌توان به کاهش وزن مولکولی، شکست زنجیرهای پلیمری و ایجاد نواقص ساختاری ناشی از فرآیندهای مکرر ذوب و فراورش نسبت داد.

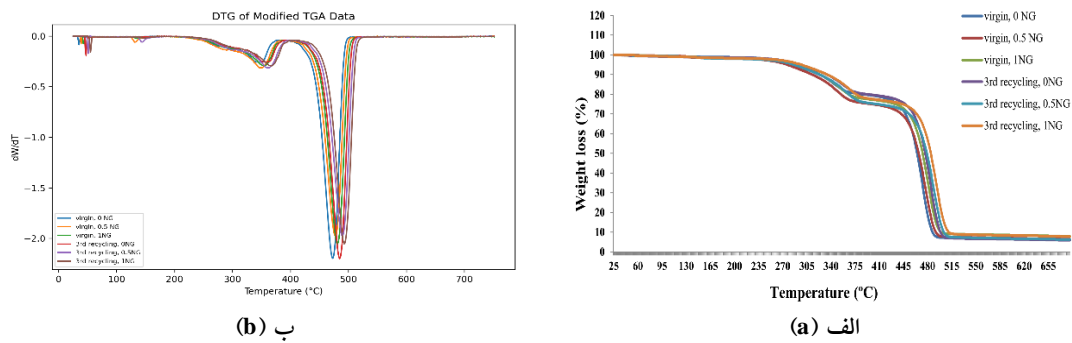
بررسی باقی‌مانده کربنی در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز نشان داد که مقدار ذغال باقی‌مانده با افزایش محتوای نانوگرافن افزایش می‌یابد. نمونه‌های حاوی ۱ درصد وزنی نانوگرافن بیش‌ترین مقدار ذغال باقی‌مانده را نشان دادند که بیانگر نقش نانوگرافن در تسهیل تشکیل لایه‌های کربنی پایدار در طی فرآیند تخریب است. این لایه کربنی به‌عنوان یک مانع حرارتی عمل کرده و از انتقال حرارت و خروج محصولات فرار جلوگیری می‌کند.

کاهش محدود پایداری حرارتی در نمونه‌های بازیافتی در مقایسه با نمونه‌های بکر نشان می‌دهد که اگرچه فرآیند بازیافت منجر به بروز برخی

جدول ۳- آنالیز گرمایی کامپوزیت چوب پلاستیک.

Table 3. Thermal Analysis of Wood Plastic Composite.

LOI (%)	وزن باقی‌مانده در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد برحسب درصد وزنی Weight Residue at 600 °C (wt%)	دمای تخریب در درصد کاهش وزن (°C)								درصد گرافن Graphene	پلیمر Polymer
		Tmax	90	80	60	40	20	10	5		
19	6.61	478	496	488	479	468	395	333	294	0	virgin
19.5	6.94	484	496	489	478	464	359	318	281	0.5	virgin
20.07	8.52	491	500	489	479	466	366	324	288	1	virgin
19.03	6.4	470	495	488	479	468	389	330	294	0	3 <sup>rd</sup> recycling
19.57	6.78	477	496	488	478	464	359	315	279	0.5	3 <sup>rd</sup> recycling
20.13	8.37	485	499	489	479	466	365	323	285	1	3 <sup>rd</sup> recycling



شکل ۴- تأثیر نانوگرافن بر گرماسنجی وزنی، الف (TGA، ب) DTG  
**Figure 4. Effect of Graphene Nanoparticles on the Thermogravimetric Behavior of the Samples: (a) TGA Curves and (b) DTG Curves.**

### بحث

سطح ویژه بالای نانوگرافن و نسبت ابعادی زیاد آن احتمالاً در افزایش مقاومت و مدول کششی نقش داشته است (۲۰).

مدول یانگ بسیار بالای نانوگرافن که در محدوده تراپاسکال گزارش شده است، احتمالاً یکی از عوامل مؤثر در افزایش مدول کشسانی کامپوزیت‌های حاوی این نانوماده است. حضور صفحات گرافنی صلب در ماتریس پلیمری می‌تواند حرکت زنجیره‌های پلیمر را محدود کرده و در نتیجه سختی کلی سیستم را افزایش دهد. مطالعات رفیعی و همکاران (۲۰۱۰) نشان داده‌اند که افزودن مقادیر کم نانوگرافن (حدود ۱ درصد وزنی) می‌تواند افزایش چشمگیری در مدول الاستیسیته ایجاد کند که این موضوع با نتایج گزارش شده در پژوهش‌های مرتبط با کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با نانوگرافن هم‌خوانی دارد (۲۱).

ساختار صفحه‌ای و نسبت ابعاد بالای نانوگرافن نیز احتمالاً نقش مهمی در بهبود خواص مکانیکی ایفا می‌کند. این ساختار می‌تواند سطح تماس بین نانوذره و ماتریس را افزایش داده و بر نحوه توزیع تنش در کامپوزیت اثرگذار باشد. در نتیجه، تنش‌های اعمال‌شده ممکن است به‌طور یکنواخت‌تری در کل کامپوزیت توزیع شوند. با این حال، تأیید دقیق این

مکانیسم نیازمند بررسی‌های تکمیلی ریزساختاری و بین سطحی است (۲۲).

بهبود خواص خمشی در نمونه‌های حاوی نانوگرافن نیز احتمالاً با همان عوامل مؤثر بر خواص کششی مرتبط است. علاوه بر این، استحکام و سختی بالای نانوگرافن احتمالاً در افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل خمشی مؤثر بوده است (۲۳).

در خصوص مقاومت به ضربه فاقدار، افزایش جزئی مقادیر مشاهده شد، اما این تغییر از نظر آماری معنی‌دار نبود.

با توجه به معنی‌دار نبودن تغییرات مقاومت ضربه، نمی‌توان با قطعیت درباره نقش چسبندگی بین نانوگرافن و ماتریس در بهبود عملکرد ضربه‌ای اظهار نظر کرد. با این حال، بر اساس مطالعات پیشین، چنین برهم‌کنش‌هایی می‌توانند در رفتار ضربه‌ای کامپوزیت‌ها مؤثر باشند (۲۴).

**تحلیل عدم وجود اثر متقابل معنی‌دار بین بازیافت پلیمر و نانوگرافن:** نتایج جدول ۲ نشان داد که اثر متقابل بین وضعیت پلی‌پروپیلن (بکر در مقابل سه‌بار بازیافتی) و میزان نانوگرافن بر هیچ‌یک از خواص مکانیکی، رفتار آتش‌گیری و پایداری حرارتی معنی‌دار نبوده است. برای تمامی ویژگی‌ها این یافته از نظر علمی دارای اهمیت است و می‌تواند چند معنا داشته باشد:

است و بنابراین کاربرد نانوگرافن برای ارتقای خواص پلی پروپیلن بازیافتی به همان اندازه مؤثر است که برای پلی پروپیلن بکر.

افزایش شاخص اکسیژن محدود و بهبود پایداری حرارتی در نمونه‌های حاوی نانوگرافن نشان می‌دهد که این نانوذرات می‌توانند در کاهش قابلیت اشتعال کامپوزیت مؤثر باشند. این رفتار احتمالاً ناشی از اثر سدکنندگی ساختار لایه‌ای نانوگرافن در برابر انتقال حرارت و نفوذ اکسیژن است. همچنین بر اساس گزارش‌های پیشین، نانوگرافن می‌تواند در تشکیل ساختار زغالی محافظ در طی فرایند تخریب حرارتی نقش داشته باشد، هرچند تأیید مستقیم این مکانیسم نیازمند آزمون‌های تکمیلی است (۲۶). این مکانیسم‌ها می‌توانند در کاهش قابلیت آتش‌گیری کامپوزیت مؤثر باشند.

در طی فرآیند بازیافت، زنجیره‌های پلیمری ممکن است تحت تأثیر حرارت و تنش‌های برشی دچار شکست شوند. در نتیجه، کاهش احتمالی وزن مولکولی پلیمر می‌تواند یکی از عوامل مؤثر در افت مقاومت کششی و خمشی مشاهده شده باشد (۲۷).

همچنین، تغییر در ساختار بلوری پلیمر و تجمع ناخالصی‌ها و آلاینده‌ها در پلیمر بازیافتی، پیوستگی زنجیره‌ها و چسبندگی بین الیاف سلولزی و ماتریس را تضعیف می‌کند (۲۸). پراکندگی نامناسب ذرات چوب در ماتریس بازیافتی نیز موجب کاهش انتقال تنش و افت بیش‌تر خواص مکانیکی می‌شود (۲۹).

نتایج TGA و DTG نشان داد که افزودن نانوگرافن موجب بهبود پایداری حرارتی کامپوزیت‌های مورد مطالعه شده است. انتقال تدریجی مقادیر  $T_{max}$  به دماهای بالاتر و افزایش میزان ذغال باقیمانده در نمونه‌های حاوی نانوگرافن بیانگر نقش مؤثر این نانوفیلر در تأخیر فرآیند تخریب حرارتی است. این رفتار را می‌توان به اثر مانعی صفحات نانوگرافن

اولاً، عدم وجود اثر متقابل معنی‌دار نشان می‌دهد که مکانیسم تقویت‌کنندگی نانوگرافن در هر دو ماتریس بکر و بازیافتی به‌طور مشابه عمل می‌کند. به‌عبارت‌دیگر، نانوگرافن صرف‌نظر از این‌که ماتریس پلیمری دچار تخریب زنجیره‌ای ناشی از بازیافت شده باشد یا نه توانسته است به‌طور مؤثر با ماتریس برهمکنش کرده و خواص را بهبود بخشد. این موضوع را می‌توان به ماهیت فیزیکی برهمکنش‌های نانوگرافن با زنجیره‌های پلی پروپیلن نسبت داد که عمدتاً از نوع نیروهای واندروالسی است و وابستگی چندانی به وزن مولکولی پلیمر ندارد (۲۵).

ثانیاً، این یافته نشان می‌دهد که بازیافت پلی پروپیلن مانع اثرگذاری نانوگرافن بر خواص مورد بررسی نشده است. از آن‌جاکه اثر متقابل بین دو عامل معنی‌دار نبود، به نظر می‌رسد روند تغییرات ناشی از افزودن نانوگرافن در هر دو نوع ماتریس بکر و بازیافتی مشابه بوده است. با این‌حال، ارزیابی دقیق نحوه پراکنش نانوگرافن و رفتار مذاب سیستم نیازمند آزمون‌های تکمیلی رئولوژیکی و ریزساختاری است که در این پژوهش انجام نشد.

ثالثاً، از منظر آماری، عدم معنی‌داری اثر متقابل به این معناست که اثر هر یک از دو فاکتور (بازیافت و نانوگرافن) بر خواص نهایی، مستقل از سطح فاکتور دیگر است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افت خواص ناشی از بازیافت پلیمر و بهبود خواص ناشی از افزودن نانوگرافن دو پدیده قابل جمع هستند و یکدیگر را خنثی یا تشدید نمی‌کنند. این موضوع از نظر مهندسی مواد دارای اهمیت است، زیرا نشان می‌دهد که می‌توان به‌طور هم‌زمان از پلیمر بازیافتی (به دلایل اقتصادی و زیست‌محیطی) و نانوگرافن (به دلایل عملکردی) استفاده کرد بدون آنکه تداخل منفی بین این دو رخ دهد.

در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که اثر نانوگرافن در هر دو نوع ماتریس بکر و بازیافتی روند مشابهی داشته

### نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که افزودن نانوگرافن تا سطح ۱ درصد وزنی موجب بهبود خواص مکانیکی، رفتار آتش‌گیری و پایداری حرارتی کامپوزیت‌ها شد. با افزایش نانوگرافن تا این سطح، مقاومت و مدول کششی به ترتیب ۹/۹ و ۷/۳ درصد، مقاومت و مدول خمشی ۹/۸ و ۷/۷ درصد و مقاومت به ضربه فاقدار حدود ۲ درصد افزایش یافت. این بهبود به ساختار صفحه‌ای نانوگرافن، سطح ویژه بالا و توانایی آن در انتقال مؤثر تنش و محدود کردن حرکت زنجیره‌های پلیمری نسبت داده می‌شود.

افزودن نانوگرافن هم‌چنین موجب بهبود رفتار آتش‌گیری کامپوزیت‌ها شد، به طوری که شاخص اکسیژن محدود با افزایش نانوگرافن تا ۱ درصد، حدود ۵/۷ درصد افزایش یافت. این پدیده ناشی از ایجاد سد فیزیکی در برابر نفوذ اکسیژن و حرارت و نیز تشکیل لایه زغالی پایدار در حین سوختن است. علاوه بر این، حضور نانوگرافن باعث افزایش میزان خاکستر باقی‌مانده و بهبود پایداری حرارتی نمونه‌ها گردید.

در مقابل، بازیافت پلی‌پروپیلن تا سه مرتبه منجر به افت قابل توجه خواص مکانیکی شد؛ به طوری که مقاومت و مدول کششی به ترتیب ۹/۴ و ۹/۲۱ درصد، مقاومت و مدول خمشی ۲۳/۵ و ۲۲/۹۲ درصد و مقاومت به ضربه فاقدار ۱۱/۷ درصد کاهش یافت. این کاهش عمدتاً به شکست زنجیره‌های پلیمری و کاهش وزن مولکولی در طی فرآیند بازیافت نسبت داده می‌شود. با این حال، بازیافت پلی‌پروپیلن تنها باعث افزایش جزئی شاخص اکسیژن محدود (حدود ۰/۳ درصد) شد، در حالی که میزان خاکستر باقی‌مانده و پایداری حرارتی کاهش یافت.

نسبت داد که با افزایش مسیر نفوذ حرارت و محصولات فرار، سرعت تخریب زنجیره‌های پلیمری را کاهش می‌دهند.

در مقابل، نمونه‌های بازیافتی کاهش جزئی در Tmax نسبت به نمونه‌های بکر نشان دادند که احتمالاً ناشی از کاهش وزن مولکولی و ایجاد شکست‌های زنجیری در طی فرآیندهای مکرر بازیافت است. با این وجود، حضور نانوگرافن توانست بخش عمده این افت را جبران کند و موجب حفظ پایداری حرارتی در سطوح قابل قبول شود.

افزایش باقی‌مانده کربنی در نمونه‌های حاوی نانوگرافن نیز نشان می‌دهد که این نانوذره در تشکیل یک لایه کربنی پایدار در حین تخریب نقش دارد. این لایه محافظ از انتقال حرارت به بخش‌های داخلی ماده جلوگیری کرده و در نتیجه موجب کاهش نرخ تخریب می‌شود؛ بنابراین، بهبود هم‌زمان Tmax و ذغال باقی‌مانده نشان می‌دهد که نانوگرافن علاوه بر تقویت ساختار پلیمری، کارایی حرارتی مواد بازیافتی را نیز ارتقا می‌دهد.

به طور کلی، نتایج حاصل از TGA و DTG تأیید می‌کنند که استفاده از نانوگرافن راهکاری مؤثر برای جبران بخشی از افت خواص ناشی از بازیافت بوده و می‌تواند پایداری حرارتی کامپوزیت‌های پلیمری را در کاربردهای دمای بالا بهبود بخشد.

در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که نانوگرافن می‌تواند به عنوان یک تقویت‌کننده بسیار کارآمد در این کامپوزیت‌ها عمل کرده و ضمن بهبود خواص مکانیکی و مقاومت در برابر آتش‌گیری، بخشی از افت خواص ناشی از استفاده از پلیمر بازیافتی را نیز جبران کند. این ویژگی، نانوگرافن را به گزینه‌ای مناسب برای تولید کامپوزیت‌های با عملکرد بالاتر و رویکردی پایدارتر تبدیل می‌کند.

مکانیسم تقویت‌کنندگی نانوگرافن در هر دو ماتریس بکر و بازیافتی به‌طور مشابه عمل می‌کند. این یافته از منظر کاربردی دارای اهمیت است، زیرا بیانگر آن است که افزودن نانوگرافن به پلی‌پروپیلن بازیافتی می‌تواند با همان کارایی افزودن آن به پلی‌پروپیلن بکر، خواص را بهبود بخشد.

در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانوگرافن می‌تواند راهکاری مؤثر برای بهبود عملکرد این کامپوزیت‌ها و جبران نسبی اثرات منفی ناشی از بازیافت پلی‌پروپیلن باشد و امکان استفاده پایدارتر از پلیمرهای بازیافتی را فراهم کند.

هم‌چنین، عدم وجود اثر متقابل معنی‌دار بین فاکتورهای بازیافت پلیمر و نانوگرافن نشان داد که

### منابع

- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782.
- MacLeod, M., Arp, H. P. H., Tekman, M. B., & Jahnke, A. (2021). The global threat from plastic pollution. *Science*, 373(6550), 61-65.
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221-232.
- Kaiser, K., Schmid, M., & Schlummer, M. (2017). Recycling of polymer-based multilayer packaging: A review. *Recycling*, 3(1), 1.
- Eriksen, M. K., Pivnenko, K., Olsson, M. E., & Astrup, T. F. (2018). Contamination in plastic recycling: Influence of metals on the quality of reprocessed plastic. *Waste management*, 79, 595-606.
- Accinelli, C., Saccà, M. L., Mencarelli, M., & Vicari, A. (2012). Deterioration of bioplastic carrier bags in the environment and assessment of a new recycling alternative. *Chemosphere*, 89(2), 136-143.
- Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69, 24-58.
- Sommerhuber, P. F., Welling, J., & Krause, A. (2015). Substitution potentials of recycled HDPE and wood particles from post-consumer packaging waste in Wood-Plastic Composites. *Waste Management*, 46, 76-85.
- Clemons, C. (2002). Wood-plastic composites in the United States: The interfacing of two industries. *Forest Products Journal*, 52(6), 10-18.
- Abanga, S., Latibati, A. J., Sepidehdam, S. J., Roohnia, M., & Hossein, M. A. (2012). Investigation on the properties of polypropylene/old corrugated container fibers composites with added foaming agents.
- Bengtsson, M., & Oksman, K. (2006). Silane crosslinked wood plastic composites: Processing and properties. *Composites Science and Technology*, 66(13), 2177-2186.
- Gobena, S. T., & Woldeyannes, A. D. (2024). A review of synthesis methods, and characterization techniques of polymer nanocomposites for diverse applications. *Discover Materials*, 4(1), 52.
- Narayan, J., & Bezborah, K. (2024). Recent advances in the functionalization, substitutional doping and applications of graphene/graphene composite nanomaterials. *RSC Advances*, 14(19), 13413-13444.
- Tarhini, A., & Tehrani-Bagha, A. R. (2023). Advances in preparation methods and conductivity properties of graphene-based polymer composites. *Applied Composite Materials*, 30(6), 1737-1762.
- Ali, Z., Yaqoob, S., Yu, J., D'Amore, A., & Fakhar-e-Alam, M. (2024). A

- comparative review of processing methods for graphene-based hybrid filler polymer composites and enhanced mechanical, thermal, and electrical properties. *Journal of King Saud University-Science*. 36(10), 103457.
16. Zhu, P. J., Yan, Y. N., Zhou, Y., Qi, Z. J., Li, Y. F., & Chen, C. M. (2024). Thermal properties of graphene and graphene-based nanocomposites: A review. *ACS Applied Nano Materials*. 7(8), 8445-8463.
  17. Zeinedini, A., & Shokrieh, M. M. (2024). Agglomeration phenomenon in graphene/polymer nanocomposites: Reasons, roles, and remedies. *Applied Physics Reviews*. 11(4).
  18. Sharma, H., Arora, G., Singh, M. K., Rangappa, S. M., Bhowmik, P., Kumar, R., ... & Siengchin, S. (2025). From composition to performance: structural insights into polymer composites. *Next Materials*. 8, 100852.
  19. Kharmoudi, H., Lamtai, A., Elkoun, S., Robert, M., & Diez, C. (2024). Effect of graphene on the mechanical properties of recycled high-density and high-molecular-weight polyethylene blends. *Materials*. 17(19), 4733.
  20. Wan, Y. J., Tang, L. C., Gong, L. X., Yan, D., Li, Y. B., Wu, L. B., ... & Lai, G. Q. (2014). Grafting of epoxy chains onto graphene oxide for epoxy composites with improved mechanical and thermal properties. *Carbon*. 69, 467-480.
  21. Rafiee, M. A., Rafiee, J., Srivastava, I., Wang, Z., Song, H., Yu, Z. Z., & Koratkar, N. (2010). Fracture and fatigue in graphene nanocomposites. *Small*. 6(2), 179.
  22. Kim, H., Miura, Y., & Macosko, C. W. (2010). Graphene/polyurethane nanocomposites for improved gas barrier and electrical conductivity. *Chemistry of Materials*. 22(11), 3441-3450.
  23. Kim, H., & Macosko, C.W. (2009). Processing-property relationships of polycarbonate/graphene composites. *Polymer*. 50(15), 3797-3809.
  24. Chandrasekaran, S., Sato, N., Tölle, F., Mülhaupt, R., Fiedler, B., & Schulte, K. (2014). Fracture toughness and failure mechanism of graphene-based epoxy composites. *Composites Science and Technology*. 97, 90-99.
  25. Kumar, S. K., & Krishnamoorti, R. (2010). Nanocomposites: structure, phase behavior, and properties. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*. 1, 37-58.
  26. Kashiwagi, T., Du, F., Douglas, J. F., Winey, K. I., Harris Jr, R. H., & Shields, J. R. (2005). Nanoparticle networks reduce the flammability of polymer nanocomposites. *Nature Materials*. 4(12), 928-933.
  27. Vilaplana, F., & Karlsson, S. (2008). Quality concepts for the improved use of recycled polymeric materials: a review. *Macromolecular Materials and Engineering*. 293(4), 274-297.
  28. Farah, S., Anderson, D.G., & Langer, R. (2016). Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications-A comprehensive review. *Advanced Drug Delivery Reviews*. 107, 367-392.
  29. Mengeloglu, F., & Karakus, K. (2008). Some properties of eucalyptus wood flour filled recycled high density polyethylene polymer-composites. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 32(6), 537-546.