



Investigating the Impact of Three Recycling Cycles on the Thermal and Mechanical Properties of Composites Made from Aspen Wood Flour and Recycled Polyethylene for Packaging Applications

Jafar Ebrahimpour Kasmani^{*1} , Ahmad Samariha²

1. Associate professor, Department of Wood and Paper, Sava.C., Islamic Azad University, Savadkooh, Iran
2. Assistant professor, Department of Engineering Sciences, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

Abstract

This article investigates the impact of recycling on the thermal and mechanical properties of composites made from ash wood flour and recycled polyethylene. Given the growing concerns about environmental pollution and the necessity of material reuse, this research analyzes the effects of recycling on the physical and functional characteristics of these composites in packaging applications. Samples were prepared with varying ratios of wood flour and polyethylene, and thermal properties such as glass transition temperature, along with mechanical properties including tensile strength and hardness, were measured. The results indicated that an increase in the number of recycling cycles negatively affected tensile strength, tensile and flexural elastic modulus, and impact resistance, showing reductions of 21.9%, 25.4%, 30.3%, 27.9%, and 23.1%, respectively. However, thermal stability remained relatively unchanged, with residual charcoal content measured at 9.96%, 9.36%, 8.16%, and 7.76%. This study could contribute to the development of environmentally friendly packaging materials and provide new opportunities for utilizing recycled materials in various industries. The findings underscore the need to balance the benefits of recycling with its negative impacts on mechanical properties, serving as a guide for designing sustainable packaging materials in the future.

Keywords

Recycling
thermal properties
recycled polyethylene
packaging

Received: 24.03.2025

Revised: 15.05.2025

Accepted: 20.05.2025

*Corresponding Author

Jafar Ebrahimpour Kasmani

Email

kasmani@iau.ac.ir

1- Introduction

In recent years, public awareness regarding the environmental issues caused by the widespread use of plastics has significantly increased. Due to their durability and long-lasting presence in the environment, plastics have resulted in substantial waste and pollution. This situation has led to global efforts aimed at reducing plastic consumption and replacing it with sustainable and biodegradable materials [2].

One of the innovative measures in this area is the development of new composites that can serve as alternatives to traditional plastics. These composites are typically made from a combination of natural and biodegradable materials such as starch, cellulose, and plant fibers, along with other substances. Such combinations can provide desirable mechanical and physical properties while also being capable of naturally decomposing in the environment [4].

How to Cite this Article:

[1] J. E. Kasmani and A. Samariha, "Investigating the impact of three recycling cycles on the thermal and mechanical properties of composites made from aspen wood flour and recycled polyethylene for packaging applications," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 93–105, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.513808.1113> (in Persian)



©2025 the authors. Published by Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

E-ISSN: 2981-2232

The use of such packaging not only contributes to the reduction of plastic waste but also provides good mechanical and physical properties. Furthermore, these materials can help decrease reliance on petroleum resources and reduce environmental pollution. Statistics indicate that millions of tons of plastic enter the environment each year, a significant portion of which reaches seas and oceans, resulting in irreversible consequences for marine life and ecosystems [1].

Recycling is recognized as a key strategy for reducing waste and conserving natural resources. Through recycling, existing materials can be reused, thereby decreasing the demand for new raw materials [3].

Wood flour combined with polyethylene is recognized as a sustainable option in the packaging industry. Wood flour, particularly from species such as aspen, possesses desirable mechanical and thermal properties that can enhance the performance of polyethylene [5].

This research focuses on optimizing the combination of wood flour with polyethylene and its impact on the thermal and mechanical properties of the composites. The use of innovative methods can significantly enhance the mechanical and thermal properties of these composites while increasing their recyclability [6].

However, there are challenges as well, including the variability in the properties of wood flour, which can negatively affect the final performance of the composites [7].

The results of this research could contribute to the development of sustainable and environmentally friendly packaging materials, examining the effects of various mixing ratios and recycling processes on the performance of these materials.

2- Research Methods

This research examines the challenges of managing urban waste and the lack of information regarding the raw materials of disposable containers. Due to inadequate waste segregation and insufficient

information from suppliers, it was decided to produce recycled polyethylene in the laboratory instead of collecting used milk bottles. Heavy polyethylene with a density of 0.956 g.cm^{-3} was sourced from Arak Petrochemical Company and was melted and granulated using a twin-screw extruder at a temperature of $180 \text{ }^\circ\text{C}$ and a speed of 100 rpm. This process was repeated three times to obtain the recycled sample, after which its melt flow index was measured.

Ash wood flour was used as a powdered reinforcement in the polymer matrix. The wood flour was sourced from a furniture manufacturer and was sifted with mesh sizes of 60 and 70. It was then placed in an oven at $100 \text{ }^\circ\text{C}$ for 24 hours to reduce moisture content to 2%. Additionally, maleic anhydride grafted polyethylene (MAPE) with a purity of 98% was utilized as a compatibilizing agent.

The mixing of polyethylene, wood flour, and the compatibilizer was conducted in specified weight ratios at the Polymer and Petrochemical Research Institute of Iran. After exiting the extruder, the materials were cooled and converted into granules using a grinding machine. To prepare standard test samples, the granules were transferred to an injection molding machine. Various temperatures were set for the injection cylinder and mold, with an injection pressure of 80 MPa. After cooling the mold, the samples were prepared for tensile, flexural, and impact tests.

Mechanical properties, including flexural strength, impact resistance, and tensile strength, were examined using laboratory equipment in accordance with ASTM standards. The samples were conditioned for two days at $23 \text{ }^\circ\text{C}$ and 50% humidity before testing. In this study, different levels of recycled polyethylene were investigated at four levels (0, 1, 2, and 3 times recycling). Each treatment was executed with three replicates, and a factorial design within a completely randomized layout was employed. Statistical analyses were conducted using SPSS version 16, and the significance of the treatment means was assessed

using Duncan's multiple range test at a 95% confidence level.



Figure 1: Manufactured Test Samples

3- Results

This research investigated the effect of the number of recycling cycles of polyethylene on the mechanical and thermal properties of wood-plastic composites. The results indicated that the melt flow index of polyethylene increased from 20 g/10 min for virgin polymer to 21.54, 22.22, and 22.76 g/10 min after one, two, and three recycling cycles, respectively. The analysis of variance results also demonstrated a significant impact of the number of recycling cycles on tensile strength, tensile elastic modulus, flexural strength, and flexural modulus.

With an increase in the number of recycling cycles up to three times, both tensile strength and tensile elastic modulus significantly decreased. The highest tensile strength was observed in virgin polyethylene (32.63 MPa), while the lowest value was noted after three recycling cycles (26.77 MPa). This reduction is attributed to the degradation of chemical bonds and a decrease in molecular weight during the recycling processes. Additionally, impurities and additives present in the polymer also contribute to weakening the structure and reducing tensile strength.

The effect of the number of recycling cycles on flexural strength follows a similar trend. As the number of recycling cycles increases, both flexural strength and modulus significantly decrease. The highest flexural strength was recorded for pure

polyethylene (36.45 MPa), while the lowest was observed after three recycling cycles (27.97 MPa). This decline is due to damage to the molecular structure and a reduction in the length of polymer chains during the recycling processes.

The results indicate a negative impact of the number of recycling cycles on the impact resistance of notched specimens. As the number of recycling cycles increases, the impact resistance significantly decreases. The highest impact resistance was recorded for pure polyethylene (37.46 j.m⁻¹), while the lowest was observed after three recycling cycles (30.42 j.m⁻¹). This reduction is due to damage to the polymer structure and weakness in the bonding between wood particles and the polymer. Regarding the limited oxygen index, the analysis of variance showed that the effect of the number of recycling cycles is not significant at a 95% confidence level. However, as the number of recycling cycles increases, the limited oxygen index decreases, which is attributed to the degradation of the polymer structure and reduced fire resistance.

Thermogravimetric analysis showed that as the number of recycling cycles increases, the residual ash content decreases. In this study, no significant differences were observed in the degradation temperatures of the different samples. The residual ash content in the samples was 9.96%, 9.36%, 8.16%, and 8.76%, respectively.

The results of this research indicate that with an increase in the number of recycling cycles, both the mechanical and thermal properties of wood-plastic composites decline. This should be taken into account in recycling processes and the reuse of recycled polymers. To maintain desirable properties, there is a need for additives and appropriate methods to reinforce the structure of recycled polymers.

Table 1: Analysis of Variance (F-value and Significance Level) for the Effect of Structural Variables on Resistances

Structural Variables	F-value and Significance Level
Tensile Strength	75.879*
Tensile Elastic Modulus	57.665*
Flexural Strength	53.312*
Flexural Modulus	27.197*
Impact Resistance	51.476*
Limited Oxygen Index	2.823 ^{ns}

4- Conclusion

This research examined the impact of recycling on the thermal and mechanical properties of aspen wood flour and polyethylene composites. The results indicate that with an increase in the number of recycling cycles, the mechanical properties of these composites significantly decrease, with reductions in tensile and flexural strength and impact resistance by 21.9%, 25.4%, 30.3%, 27.9%, and 23.1%, respectively. Meanwhile, thermal stability remains relatively unchanged, and the residual charcoal content in the samples indicates a relative thermal stability. Thermogravimetric analysis showed no significant differences in the degradation temperatures of the samples. The findings highlight the importance of optimizing recycling processes to maintain the quality of recycled materials and enhance their performance, underscoring the need for further research in this area.

5- References

[1] J. R. Jambeck et al., "Plastic waste inputs from land into the ocean," *Science*, vol. 347, no. 6223, pp. 768–771, 2015, doi: [10.1126/science.1260352](https://doi.org/10.1126/science.1260352).

[2] S. Pourabbasi and A. Samariha, "Evaluation of the physical and mechanical properties of polyethylene/corn stalk fiber composites used in the packaging industry," *Packaging Sci. Art*, vol. 15, no. 57, pp. 13–19, 2024. [Online]. Available: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22286675.1403.15.57.2.1> (in Persian).

[3] A. K. Singh, R. Bedi, and B. S. Kaith, "Composite materials based on recycled polyethylene terephthalate and their properties – A comprehensive review," *Compos. B Eng.*, vol. 219, p. 108928, 2021, doi: [10.1016/j.compositesb.2021.108928](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108928).

[4] J. Ebrahimpour Kasmani and A. Samariha, "Investigating the characteristics of composite made of wood flour, recycled PVC and nano silica for packaging purposes," *Packaging Sci. Art*, vol. 15, no. 59, pp. 1–8, 2024. [Online]. Available: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22286675.1403.15.59.1.4> (in Persian).

[5] J. Zhang, H. Wang, R. Ou, and Q. Wang, "The properties of flax fiber reinforced wood flour/high density polyethylene composites," *J. Forestry Res.*, vol. 29, no. 2, pp. 533–540, 2018, doi: [10.1007/s11676-017-0461-0](https://doi.org/10.1007/s11676-017-0461-0).

[6] M. Rabnawaz, I. Wyman, R. Auras, and S. Cheng, "A roadmap towards green packaging: the current status and future outlook for polyesters in the packaging industry," *Green Chem.*, vol. 19, no. 20, pp. 4737–4753, 2017, doi: [10.1039/c7gc02521a](https://doi.org/10.1039/c7gc02521a).

[7] J. Deng et al., "Overview of renewable polysaccharide-based composites for biodegradable food packaging applications," *Green Chem.*, vol. 24, no. 2, pp. 480–492, 2022, doi: [10.1039/d1gc03898b](https://doi.org/10.1039/d1gc03898b).



بررسی تأثیر سه بار بازیافت بر خواص حرارتی و مکانیکی چندسازه حاصل از آرد چوب

زبان گنجشک و پلی اتیلن جهت مصارف بسته بندی

جعفر ابراهیم پور کاسمانی^{1*}، احمد ثمریها²

1- دانشیار، گروه چوب و کاغذ، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران

2- استادیار، گروه علوم مهندسی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

چکیده

این مقاله به بررسی تأثیر بازیافت بر خواص حرارتی و مکانیکی چندسازه‌های حاصل از ترکیب آرد چوب زبان گنجشک و پلی اتیلن بازیافتی می‌پردازد. با توجه به نگرانی‌های فزاینده در مورد آلودگی محیط زیست و ضرورت استفاده مجدد از مواد، این تحقیق به تحلیل اثرات بازیافت بر ویژگی‌های فیزیکی و عملکردی این چندسازه‌ها در کاربردهای بسته بندی می‌پردازد. نمونه‌ها با نسبت‌های مختلف آرد چوب و پلی اتیلن تهیه و خواص حرارتی مانند دمای انتقال شیشه و خواص مکانیکی از جمله استحکام کششی و سختی آن‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد افزایش تعداد دفعات بازیافت، تأثیر منفی بر مقاومت و مدول کششی و خمشی و مقاومت به ضربه داشت و به ترتیب کاهش‌هایی برابر 21/9، 25/4، 30/3 و 27/9 درصد را نشان داد. باین حال، ثبات حرارتی در برابر تغییرات، تغییر قابل توجهی نداشت و میزان زغال باقی مانده به ترتیب برابر با 9/96، 7/76 و 8/16 درصد بود. این مطالعه می‌تواند به توسعه مواد بسته بندی دوستدار محیط زیست کمک کند و فرصت‌های جدیدی برای استفاده از مواد بازیافتی در صنایع مختلف فراهم آورد. یافته‌های این تحقیق بر لزوم توجه به تعادل بین مزایای بازیافت و تأثیرات منفی آن بر خواص مکانیکی تأکید می‌کند و می‌تواند راهنمایی برای طراحی مواد بسته بندی پایدار در آینده باشد.

کلمات کلیدی

بازیافت

خواص حرارتی

پلی اتیلن بازیافتی

بسته بندی

دریافت مقاله: 1404/01/04

بازنگری مقاله: 1404/02/25

پذیرش مقاله: 1404/02/30

*نویسنده مسئول

جعفر ابراهیم پور کاسمانی

ایمیل

kasmani@iau.ac.ir

1- مقدمه

در سال‌های اخیر، آگاهی عمومی درباره مشکلات زیست محیطی ناشی از استفاده گسترده از پلاستیک افزایش یافته است. پلاستیک‌ها نه تنها در بسته بندی مواد غذایی و محصولات مصرفی به کار می‌روند، بلکه سال‌ها در محیط زیست باقی می‌مانند. به همین دلیل، تلاش‌های جهانی برای کاهش مصرف پلاستیک و جایگزینی آن با مواد پایدار و زیست تجزیه پذیر در حال افزایش است.

پلاستیک‌های سنتی استفاده شوند. این کامپوزیت‌ها معمولاً از ترکیب مواد طبیعی و تجزیه پذیر مانند نشاسته، سلولز و الیاف گیاهی با دیگر مواد ساخته می‌شوند. این ترکیب‌ها می‌توانند خواص مکانیکی و فیزیکی مطلوبی را ارائه دهند و در عین حال به طور طبیعی در محیط زیست تجزیه شوند [1].

این نوع بسته بندی‌ها نه تنها به کاهش زباله‌های پلاستیکی کمک می‌کنند، بلکه خواص مکانیکی و فیزیکی مطلوبی را نیز ارائه می‌دهند. استفاده از این مواد می‌تواند به کاهش وابستگی به منابع نفتی و کاهش آلودگی‌های زیست محیطی کمک کند [2].

به منظور کاهش استفاده از پلاستیک در بسته بندی‌ها و تأثیرات مخرب آن بر محیط زیست، یکی از اقدامات نوآورانه در این زمینه، تولید کامپوزیت‌های جدید است که می‌توانند به عنوان جایگزینی برای

How to Cite this Article:

[1] J. E. Kasmani and A. Samariha, "Investigating the impact of three recycling cycles on the thermal and mechanical properties of composites made from aspen wood flour and recycled polyethylene for packaging applications," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 93-105, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.513808.1113> (in Persian)



©2025 the authors. Published by Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

شاپای الکترونیکی: 2232-2232-2232

نیز تحت تأثیر بازیافت قرار می‌گیرد که می‌تواند قابلیت استفاده آن‌ها در کاربردهای مختلف بسته‌بندی را افزایش دهد.

از دیگر مزایای استفاده از مواد بازیافتی می‌توان به کاهش هزینه‌های تولید و افزایش قابلیت رقابتی در بازار اشاره کرد. با توجه به افزایش تقاضا برای محصولات پایدار، استفاده از مواد بازیافتی نه تنها به حفظ محیط‌زیست کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به افزایش سودآوری شرکت‌ها نیز منجر شود [9].

با این حال، چالش‌هایی نیز در مسیر استفاده از آرد چوب و پلی‌اتیلن وجود دارد. یکی از این چالش‌ها، عدم یکنواختی در خواص آرد چوب است که می‌تواند تأثیر منفی بر عملکرد نهایی کامپوزیت‌ها داشته باشد [10]. همچنین، فرآیندهای بازیافت ممکن است به تغییر خواص فیزیکی و شیمیایی مواد منجر شوند که این موضوع نیاز به بررسی دقیق‌تری دارد.

در نهایت، این مقاله به بررسی تأثیر بازیافت بر خواص حرارتی و مکانیکی کامپوزیت‌های حاصل از آرد چوب زبان‌گنجشک و پلی‌اتیلن می‌پردازد.

با توجه به اهمیت روزافزون استفاده از مواد پایدار و بازیافتی در صنعت بسته‌بندی، نتایج این تحقیق می‌تواند به توسعه مواد بسته‌بندی دوستدار محیط‌زیست و پایدار کمک کند. در این مطالعه، تأثیرات مختلف نسبت‌های ترکیبی و فرآیندهای بازیافت بر عملکرد این مواد در کاربردهای بسته‌بندی به‌دقت مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مواد

این پژوهش به بررسی چالش‌های مدیریت مواد زائد شهری در کشور و کمبود اطلاعات در مورد مواد اولیه ظروف یک‌بار مصرف می‌پردازد. از آنجا که تفکیک مواد زائد به‌طور منظم انجام نمی‌شود و فروشندگان ظروف یک‌بارمصرف اطلاعات کافی ندارند، تصمیم گرفته شد به‌جای جمع‌آوری بطری‌های شیر مستعمل، پلی‌اتیلن بازیافتی به‌طور آزمایشگاهی تهیه شود.

پلی‌اتیلن سنگین با دانسیته 0/956 گرم بر سانتی‌متر مکعب 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 ذوب و گرانول شد. این عمل سه بار انجام شد تا نمونه بازیافتی تهیه گردد. سپس شاخص جریان مذاب آن اندازه‌گیری شد.

افزایش آگاهی عمومی نسبت به مشکلات زیست‌محیطی ناشی از استفاده بی‌رویه از پلاستیک و مواد بسته‌بندی غیرقابل تجزیه، منجر به جستجوی راهکارهای پایدارتر در صنعت بسته‌بندی شده است. بر اساس آمارهای جهانی، میلیون‌ها تن پلاستیک هر ساله به محیط‌زیست وارد می‌شود که بسیاری از آن‌ها به دریاها و اقیانوس‌ها ختم می‌شوند و عواقب جبران‌ناپذیری برای حیات دریایی و اکوسیستم‌ها به همراه دارند [3]. این وضعیت ضرورت استفاده از مواد بسته‌بندی تجدیدپذیر و قابل بازیافت را بیش از پیش نمایان می‌سازد. بازیافت یکی از راهکارهای کلیدی در کاهش ضایعات و مصرف منابع طبیعی است. با بازیافت، می‌توان از مواد موجود دوباره استفاده کرده و در عین حال به کاهش نیاز به مواد اولیه جدید کمک کرد [4]. در این راستا، ترکیب آرد چوب و پلی‌اتیلن به‌عنوان گزینه‌ای پایدار و مؤثر در صنعت بسته‌بندی به حساب می‌آید. آرد چوب به‌عنوان یک منبع طبیعی و تجدیدپذیر می‌تواند به‌عنوان پرکننده‌ای برای پلی‌اتیلن استفاده شود و خواص آن را بهبود بخشد [5].

آرد چوب، به‌ویژه از گونه‌هایی مانند زبان‌گنجشک، دارای خواص مکانیکی و حرارتی مطلوبی است که می‌تواند به بهبود عملکرد پلی‌اتیلن کمک کند. پلی‌اتیلن، یکی از پرکاربردترین مواد پلاستیکی در صنعت بسته‌بندی است که به دلیل خواص مکانیکی خوب، سبکی و مقاومت در برابر رطوبت، مورد توجه قرار گرفته است [6]. با این حال، استفاده از پلی‌اتیلن به‌تنهایی می‌تواند به مشکلات زیست‌محیطی منجر شود. ترکیب پلی‌اتیلن با آرد چوب نه تنها می‌تواند خواص مکانیکی و حرارتی آن را بهبود بخشد، بلکه به کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی ناشی از استفاده از پلاستیک‌های خالص کمک می‌کند [7].

نوآوری این تحقیق در بررسی بهینه‌سازی ترکیب آرد چوب زبان‌گنجشک با پلی‌اتیلن و تأثیرات آن بر خواص حرارتی و مکانیکی کامپوزیت‌ها است. این مطالعه بر روی تکنیک‌های جدید فرآوری و بازیافت این ترکیب‌ها تمرکز دارد که می‌تواند به افزایش کارایی و کاهش اثرات زیست‌محیطی کمک کند. به‌طوری‌که با استفاده از روش‌های نوین، خواص مکانیکی و حرارتی این کامپوزیت‌ها به طرز قابل توجهی بهبود یابد و قابلیت استفاده مجدد از این مواد نیز افزایش یابد.

بازیافت این ترکیب می‌تواند به بهبود خواص حرارتی و مکانیکی آن کمک کند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که بازسازی پلی‌اتیلن و ترکیب آن با آرد چوب می‌تواند خواص مکانیکی مانند استحکام کششی و سختی را بهبود بخشد [8]. به‌علاوه، خواص حرارتی این کامپوزیت‌های



شکل 3: گرانول‌های آماده‌شده با استفاده از دستگاه خردکن

جدول 1: درصد اجزای کامپوزیت در تیمارهای مختلف

ردیف	تعداد بازیافت	آرد چوب (phc)	پلی-اتیلن (phc)	سازگارکننده (phc)
1	0	50	50	3
2	1	50	50	3
3	2	50	50	3
4	3	50	50	3

phc: per hundred compounds

۲-۲-۱- ساخت نمونه‌های آزمایشی استاندارد

به منظور ساخت نمونه‌های آزمایشی استاندارد، گرانول‌ها به دستگاه قالب‌گیر تزریقی^۳ تزریق می‌شوند. برای این کار از دستگاه تزریق نیمه‌صنعتی ساخت شرکت ایمن ماشین تهران (شکل 4)، موجود در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، استفاده شد. دمای سیلندر تزریق در هر سه ناحیه به ترتیب 160، 155 و 145 درجه سانتی‌گراد، دمای قالب 40°C درجه سانتی‌گراد تنظیم شد. فشار تزریق 80 مگاپاسکال و زمان دوره تزریق کمتر از 20 ثانیه در نظر گرفته شد. عملیات خنک‌کردن قالب با آب سرد انجام شد و نمونه‌ها جهت آزمون‌های کشش، خمشی و ضربه پس از 2 دقیقه از قالب بیرون آورده شدند (شکل 5).



شکل 4: دستگاه قالب‌گیری تزریقی

آرد زبان‌گنجشک به‌عنوان تقویت‌کننده پودری در ماتریس پلیمری مورد استفاده قرار گرفت. آرد چوب از یک شرکت تولیدکننده میلمان تأمین و پس از طبقه‌بندی با دستگاه الک ارتعاشی، با مش 60 و مش 70 آماده شد. نمونه‌ها به مدت 24 ساعت در دمای 100 درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند تا رطوبت آن‌ها به 2 درصد برسد. همچنین، مالئیک آنیدرید پیوند خورده با پلی‌اتیلن (MAPE¹) به‌عنوان عامل سازگارکننده با خلوص 98 درصد مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۲-۲- روش‌ها

درصد وزنی اجزای کامپوزیت‌های ساخته‌شده برای هر تیمار در جدول 1 آورده شده است.

اختلاط پلی‌اتیلن ضایعاتی، آرد چوب و سازگارکننده به‌صورت نسبت وزنی مشخص، توسط دستگاه اکسترودر دو ماردون^۲ (دو مارپیچه) با دمای ساخت 160 درجه سانتی‌گراد و سرعت ماردون 70 دور در دقیقه که جهت حرکت ماردون‌های آن خلاف هم بود، در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران انجام شد (شکل 1).

مواد پس از خروج از دستگاه مخلوط‌کن خنک و سخت شده سپس با استفاده از دستگاه خردکن نیمه‌صنعتی ویزر مدل WG-LS 200 به گرانول تبدیل شد (شکل 2). گرانول‌های آماده‌شده را نشان داده است (شکل 3).



شکل 1: دستگاه اکسترودر دو ماردونه



شکل 2: دستگاه خردکن نیمه‌صنعتی

³ Injection Molding

¹ Maleic Anhydride Polyethylene

² Dr. Collien

دستگاه Instron مدل 1186 برای انجام این آزمون بهره‌گیری گردید. برای بررسی استحکام کششی نمونه‌ها، از آیین‌نامه D-638-M-89 استاندارد ASTM استفاده شد. نمونه‌ها به صورت M-I و دمبلی تهیه گردیدند و سپس از دستگاه Instron مدل 1186 برای آزمون کشش استفاده شد. جهت بررسی و آزمون ضربه فاق‌دار آیزود روی نمونه‌ها، از آیین‌نامه D-256 استاندارد ASTM بهره گرفته شد و دستگاه آزمایشگر مقاومت به ضربه مدل Zwick انتخاب گردید.

برای انجام گرماسنجی روبشی تفاضلی، نمونه‌هایی با وزن بین 5 تا 7 میلی‌گرم 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. آزمون مورد نظر مطابق استاندارد ASTM E1131 صورت پذیرفت.

۳-۲- تجزیه و تحلیل نتایج

در این بررسی، سطوح متفاوت بازیافت پلی‌اتیلن در چهار سطح (0، 1، 2 و 3 بار بازیافت) مورد مطالعه قرار گرفت. تعداد تکرارها برای هر تیمار برابر 3 تکرار در نظر گرفته شد. از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی استفاده گردید. به منظور انجام تجزیه و تحلیل‌های آماری، از نرم‌افزار SPSS نسخه 16 بهره‌گیری شد. معنی‌داری میانگین تیمارها نیز بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن و در سطح اطمینان 95 درصد مورد بررسی قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

شاخص جریان مذاب به نوعی میزان سیالیت پلیمر را نشان می‌دهد و تغییر آن نمایانگر بروز تغییرات در ساختار پلیمر است. نتایج نشان داد که شاخص جریان مذاب پلی‌اتیلن بعد از یک، دو و سه بار بازیافت، از 20 g/10min برای پلیمر بکر به ترتیب به 21/54، 22/22 و 22/76 g/10min افزایش یافت. نتایج آزمون تجزیه واریانس در جدول 2 نشان داده شده است.

جدول 2: تجزیه واریانس (مقدار F و سطح معنی‌داری) اثر متغیرهای ساخت بر مقاومت‌ها

متغیرهای ساخت	مقدار F و سطح معنی‌داری
استحکام کششی	*75/879
ضریب الاستیک کشش	*57/665
مقاومت خمشی	*53/312
مدول خمشی	*27/197
مقاومت به ضربه فاق‌دار	*51/476
شاخص اکسیژن محدود	ns2/823



شکل 5: نمونه‌های آزمونی ساخته شده

۲-۲- اندازه‌گیری خواص فیزیکی، مکانیکی و حرارتی

خواص مکانیکی شامل مقاومت و مدول خمشی (شکل 6-الف)، مقاومت به ضربه (شکل 6-ب) و مقاومت و ضریب الاستیک کشش (شکل 6-ج) و خواص آمیزه شامل آزمون‌های گرماسنجی روبشی تفاضلی (شکل 6-د) کامپوزیت‌های تهیه شده آزمون گردید. قبل از استفاده از نمونه‌های استاندارد برای انجام آزمون مکانیکی، آن‌ها به مدت دو روز در دمای 23 درجه سانتی‌گراد و رطوبت 50 درصد قرار داده شدند تا با دمای محیط به تعادل برسند.



شکل 6: (الف) دستگاه Instron جهت آزمون خمش، (ب) دستگاه Instron جهت آزمون کشش، (ج) دستگاه آزمون ضربه Zwick، (د) دستگاه آنالیز حرارتی

خواص مکانیکی شامل مقاومت خمشی، مدول خمشی، مقاومت به ضربه و استحکام کششی و خواص آمیزه شامل آزمون‌های گرماسنجی روبشی تفاضلی کامپوزیت‌های تهیه شده آزمون گردید. قبل از استفاده از نمونه‌های استاندارد برای انجام آزمون مکانیکی، آن‌ها به مدت دو روز در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۵۰ درصد قرار داده شدند تا با دمای محیط به تعادل برسند.

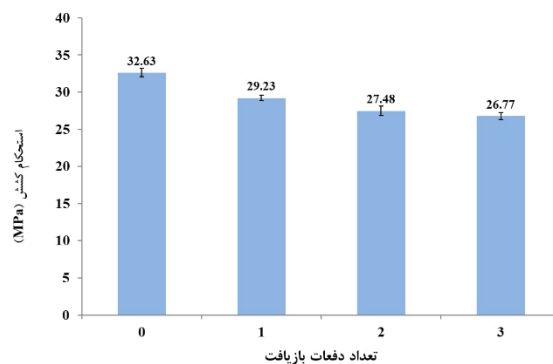
به منظور بررسی آزمون خمش نمونه‌ها از آیین‌نامه D-747 استاندارد¹ ASTM و با سرعت بارگذاری 2 mm/min استفاده شد. از

² Thermal Gravimetric Analysis

¹ American Society for Testing and Materials

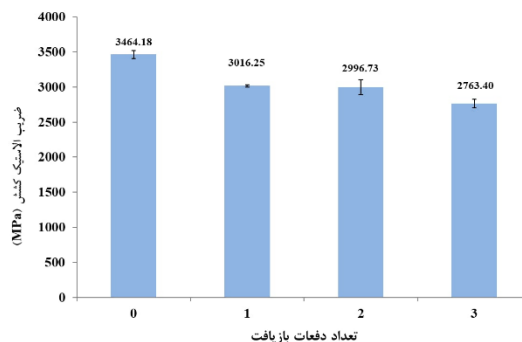
۱-۳- تأثیر تعداد دفعات بازیافت بر مقاومت و ضریب الاستیک کشش

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر تعداد دفعات بازیافت بر مقاومت و ضریب الاستیک کشش در سطح اطمینان 95 درصد دارای اختلاف معنی دار است. همان طوری که در شکل 7 و شکل 8 مشاهده می شود، با افزایش تعداد بازیافت تا 3 بار، مقاومت و ضریب الاستیک کشش کاهش معنی داری می یابد. بیشترین استحکام کششی مربوط به پلی اتیلن بکر برابر 32/63 مگاپاسکال و کمترین مقدار آن مربوط به سه بار بازیافت برابر 26/77 مگاپاسکال است. همچنین، بیشترین استحکام کششی مربوط به پلی اتیلن بکر برابر 3464/18 مگاپاسکال و کمترین مقدار آن مربوط به سه بار بازیافت برابر 2763/39 مگاپاسکال می باشد.



شکل 7: تأثیر تعداد دفعات بازیافت پلیمر بر استحکام کششی

با هر بار بازیافت، تخریب پیوندهای شیمیایی افزایش می یابد که منجر به کاهش وزن مولکولی و در نتیجه کاهش استحکام کششی می شود [11]. با افزایش دفعات بازیافت، ناخالصی ها و افزودنی های موجود در پلیمر تجمع یافته و باعث تضعیف ساختار و کاهش استحکام کششی می شوند [12]. طی فرآیندهای بازیافت مکرر، ساختار مولکولی پلیمر تغییر کرده و ویژگی های مکانیکی از جمله استحکام کششی پلیمر کاهش می یابد [13].



شکل 8: تأثیر تعداد دفعات بازیافت پلیمر بر ضریب الاستیک کشش

کاهش استحکام کششی از یک طرف بر عملکرد و کاربرد نهایی چوب پلاستیک تأثیر منفی می گذارد و از طرف دیگر، محدودیت هایی را در استفاده مجدد از پلیمرهای بازیافت شده ایجاد می کند. لذا در طراحی و توسعه محصولات چوب پلاستیکی بازیافتی، باید این موضوع را در نظر گرفت و در صورت نیاز به حفظ استحکام کششی، از افزودنی ها و روش های مناسب برای تقویت ساختار پلیمر بازیافت شده استفاده کرد.

با هر بار بازیافت، تخریب و شکستن زنجیرهای پلیمری رخ می دهد که منجر به کاهش وزن مولکولی پلیمر می شود. این کاهش وزن مولکولی باعث کاهش ضریب الاستیک کشش و استحکام چوب پلاستیک می گردد [14]. این کاهش به دلیل تخریب و شکست زنجیرهای پلیمری در طی فرآیندهای بازیافت مکرر است. با هر بار بازیافت، طول زنجیرهای پلیمری کوتاه تر شده و در نتیجه ضریب الاستیک کشش کامپوزیت کاهش می یابد.

پلیمرهای ترموپلاستیک مانند پلی اتیلن و پلی پروپیلن به دلیل قابلیت ذوب و باز شکل دهی بیشتر، تأثیر بازیافت بر آن ها بیشتر است. با افزودن الیاف طبیعی مانند چوب، سلولز یا شیشه به چوب پلاستیک بازیافتی، می توان تا حدی ضریب الاستیک کشش را بهبود بخشید [15]. همچنین، استفاده از سایر افزودنی ها مانند عوامل جفت کننده نیز می تواند به افزایش ضریب الاستیک کشش کمک کند.

۲-۳- تأثیر تعداد دفعات بازیافت بر مقاومت و مدول خمشی

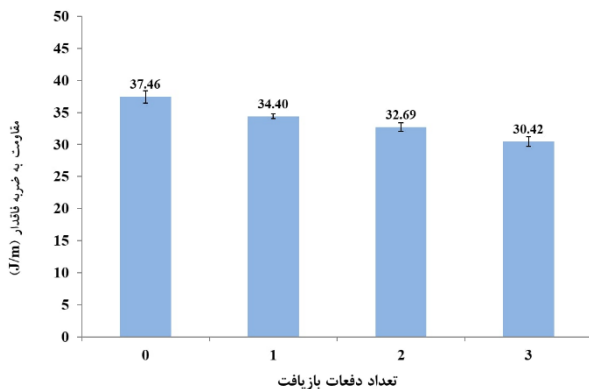
نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر تعداد دفعات بازیافت بر مقاومت و مدول خمشی در سطح اطمینان 95 درصد دارای اختلاف معنی دار است. همان طوری که در شکل 9 و شکل 10 مشاهده می شود، با افزایش تعداد بازیافت تا 3 بار، مقاومت و مدول خمشی کاهش معنی داری می یابد. بیشترین مقاومت خمشی مربوط به پلی اتیلن خالص برابر 36/45 مگاپاسکال و کمترین مقدار آن مربوط به سه بار بازیافت برابر 27/97 مگاپاسکال است. همچنین، بیشترین مدول خمشی مربوط به پلی اتیلن خالص برابر 3074/28 مگاپاسکال و کمترین مقدار آن مربوط به سه بار بازیافت برابر 2402/63 مگاپاسکال می باشد.

آسیب‌دیدگی ساختار چوبی در طی فرآیندهای بازیافت متعدد است [11].

علاوه بر این، در مطالعه‌ای دیگر نشان داده شد که با افزایش دفعات بازیافت پلی‌اتیلن در کامپوزیت‌های چوب-پلاستیک، مدول خمشی به دلیل کاهش میزان چسبندگی بین الباف چوب و ماتریس پلیمری کاهش می‌یابد [18]؛ بنابراین، مطابق با این مطالعات، با افزایش تعداد دفعات بازیافت پلیمر در کامپوزیت‌های چوب-پلاستیک، مدول خمشی به‌طور پیوسته کاهش می‌یابد. این امر به دلیل تخریب تدریجی ساختار مولکولی پلیمر، آسیب‌دیدگی ساختار چوبی و کاهش چسبندگی بین اجزای کامپوزیت است.

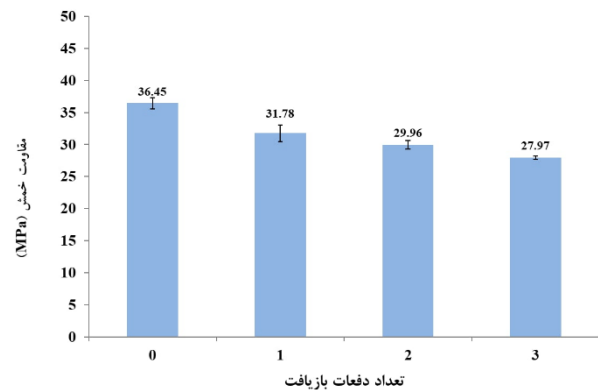
۳-۳- تأثیر تعداد دفعات بازیافت بر مقاومت به ضربه فاق‌دار

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر تعداد دفعات بازیافت بر مقاومت به ضربه فاق‌دار در سطح اطمینان 95 درصد دارای اختلاف معنی‌دار است. همان‌طوری‌که در شکل 11 مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد بازیافت تا 3 بار، مقاومت به ضربه فاق‌دار کاهش معنی‌داری می‌یابد. بیش‌ترین مقاومت به ضربه فاق‌دار مربوط به پلی‌اتیلن خالص برابر 37/46 ژول بر متر و کمترین مقدار آن مربوط به سه بار بازیافت برابر 30/42 ژول بر متر می‌باشد.

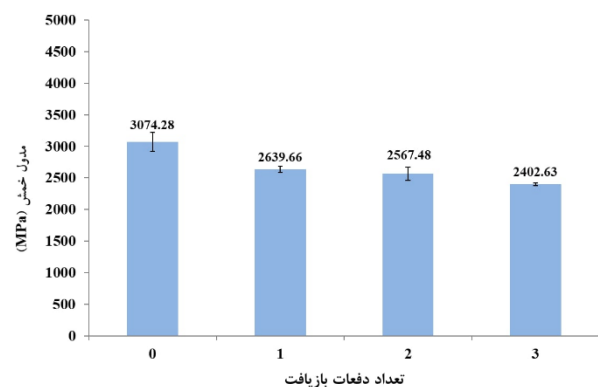


شکل 11: تأثیر تعداد دفعات بازیافت پلیمر بر مقاومت به ضربه فاق‌دار

مطالعات نشان داده‌اند که با افزایش تعداد دفعات بازیافت پلیمر، مقاومت به ضربه فاق‌دار کامپوزیت‌ها به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. در طول فرآیند بازیافت، ساختار پلیمر دچار آسیب و تخریب می‌شود و همچنین اتصال بین ذرات چوب و پلیمر نیز ضعیف می‌گردد. این عوامل باعث کاهش توانایی کامپوزیت در جذب انرژی ضربه و در نتیجه کاهش مقاومت به ضربه فاق‌دار می‌شوند [19]. هر چه تعداد دفعات بازیافت پلیمر بیشتر باشد، آسیب‌های وارد شده به ساختار پلیمر و اتصال بین فازها بیشتر شده و در نتیجه مقاومت به ضربه فاق‌دار



شکل 9: تأثیر تعداد دفعات بازیافت پلیمر بر مقاومت خمشی



شکل 10: تأثیر تعداد دفعات بازیافت پلیمر بر مدول خمشی

مقاومت خمشی چوب پلاستیک با افزایش تعداد دفعات بازیافت پلیمر به تدریج کاهش می‌یابد. این کاهش مقاومت خمشی مشابه با کاهش خواص کششی است و به دلیل تخریب و شکست زنجیره‌های پلیمری در طی فرآیندهای بازیافت مکرر رخ می‌دهد [16]. با هر بار بازیافت، طول زنجیره‌های پلیمری کوتاه‌تر شده و در نتیجه مقاومت خمشی کامپوزیت کاهش می‌یابد. همچنین، افزایش ناخالصی‌ها و آلودگی‌های موجود در پلیمر بازیافت شده نیز می‌تواند بر کاهش مقاومت خمشی تأثیرگذار باشد [17].

مطالعات نشان داده‌اند که با افزایش دفعات بازیافت پلی‌اتیلن در کامپوزیت‌های چوب-پلاستیک، مدول خمشی به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. مطالعات نشان داده‌اند که با افزایش دفعات بازیافت پلی‌اتیلن در کامپوزیت‌های چوب-پلاستیک، مدول خمشی به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد [16]. این امر به دلیل تخریب تدریجی ساختار مولکولی و کاهش وزن مولکولی پلی‌اتیلن در طول فرآیندهای بازیافت متعدد است. همچنین گزارش شده است که مدول خمشی کامپوزیت‌های چوب-پلاستیک حاوی پلی‌اتیلن بازیافتی به‌طور مداوم با افزایش تعداد دفعات بازیافت کاهش می‌یابد که این کاهش به دلیل

نمونه‌ها، سه محدوده تخریب حرارتی مشاهده می‌شود که در مرحله اول، نمونه‌ها در دمای بالاتری شروع به تخریب می‌کنند. در مرحله دوم که میزان آن شدیدتر است، افت وزن تا محدوده دمایی 500 درجه سانتی‌گراد ادامه یافته و پس از آن، با افزایش دما، کاهش وزن روند ثابتی به خود می‌گیرد یا بسیار ناچیز می‌شود. میزان خاکستر باقیمانده در چهار نمونه کامپوزیت به ترتیب برابر است با 8/16، 9/36، 9/96 و 8/76 درصد می‌باشد.

جدول 3: آنالیز گرمایی کامپوزیت چوب پلاستیک

وزن باقیمانده در دمای 600°C	دمای تخریب (DT ²) در درصدهای مختلف کاهش وزن				T _g (°C)	T _d (°C)
	80%	60%	40%	20%		
9/96	497	484	462	360	0	1
9/36	497	484	462	357	1	2
8/16	496	482	460	353	2	3
8/76	497	482	461	356	3	4

در این تحقیق ملاحظه گردید که با افزایش تعداد دفعات بازیافت پلی‌اتیلن، گرماسنجی وزنی کامپوزیت‌ها کاهش می‌یابد، اما این کاهش معنی‌دار نیست. با هر بار بازیافت، تخریب پیوندهای شیمیایی در ساختار پلیمر افزایش می‌یابد که این امر باعث کاهش وزن مولکولی و در نتیجه کاهش گرماسنجی وزنی پلیمر می‌شود. همچنین، با افزایش تعداد دفعات بازیافت، ناخالصی‌ها و افزودنی‌های موجود در پلیمر تجمع یافته و غلظت آن‌ها افزایش می‌یابد که این امر نیز باعث کاهش گرماسنجی وزنی پلیمر می‌شود؛ بنابراین، با افزایش تعداد دفعات بازیافت پلیمر، گرماسنجی وزنی پلیمر بازیافت شده به‌طور معمول کاهش می‌یابد. این موضوع باید در فرآیندهای بازیافت و استفاده مجدد از پلیمرهای بازیافت شده مدنظر قرار گیرد [23].

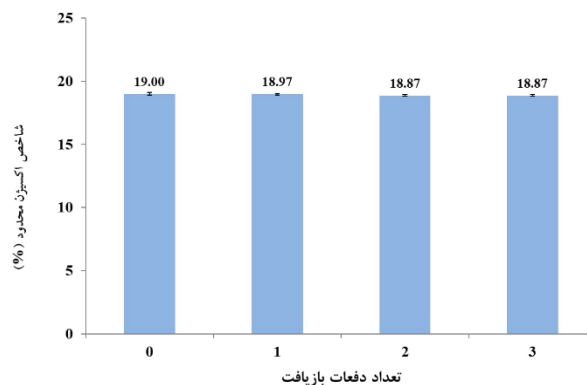
۴- نتیجه‌گیری

این تحقیق به بررسی تأثیر بازیافت بر خواص حرارتی و مکانیکی کامپوزیت‌های حاصل از آرد چوب زبان‌گنجشک و پلی‌اتیلن پرداخته است. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که با افزایش تعداد

کاهش بیشتری می‌یابد؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش تعداد دفعات بازیافت پلیمر در کامپوزیت‌های چوب-پلاستیک به‌طور منفی بر مقاومت به ضربه فاق‌دار این مواد تأثیر گذاشته و باعث کاهش این ویژگی مکانیکی می‌شود [20].

۳-۴- تأثیر تعداد دفعات بازیافت بر شاخص اکسیژن محدود

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر تعداد دفعات بازیافت بر شاخص اکسیژن محدود در سطح اطمینان 95 درصد دارای اختلاف معنی‌دار نیست. همان‌طوری که در شکل 12 مشاهده می‌شود با افزایش تعداد دفعات بازیافت تا 3 بار، شاخص اکسیژن محدود کاهش می‌یابد، اما این کاهش معنی‌دار نیست. بیش‌ترین شاخص اکسیژن محدود مربوط به پلی‌اتیلن خالص برابر 19 درصد و کمترین مقدار آن مربوط به سه بار بازیافت برابر 18/87 درصد می‌باشد.



شکل 12: تأثیر تعداد دفعات بازیافت پلیمر بر شاخص اکسیژن محدود

علت این کاهش را می‌توان به تخریب ساختار پلیمر و کاهش مقاومت در برابر آتش‌سوزی نسبت داد [21]. محققان دریافته‌اند که این کاهش LOI¹ به دلیل کاهش پایداری حرارتی و افزایش قابلیت اشتعال‌پذیری مواد بازیافت شده است [22].

۳-۵- گرماسنجی وزنی

نتایج میزان خاکستر باقیمانده مربوط به آنالیز حرارتی در جدول 3 مشاهده می‌شود. با افزایش میزان دفعات بازیافت میزان خاکستر باقیمانده کاهش یافت.

جدول 3 مربوط به نتایج گرماسنجی وزنی 50 درصد آرد چوب و چهار سطح بازیافت پلیمر (بکر، یک‌بار، دو بار و سه بار) را نشان می‌دهد. نتایج بررسی گرماسنجی وزنی کامپوزیت‌ها نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین دمای تخریب نمونه‌های مختلف وجود ندارد. در

¹ Limiting Oxygen Index² Destruction temperature

[2] J. Ebrahimpour Kasmani and A. Samariha, "Investigating the characteristics of composite made of wood flour, recycled PVC and nano silica for packaging purposes," *Packaging Sci. Art*, vol. 15, no. 59, pp. 1–8, 2024. [Online]. Available: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22286675.1403.15.59.1.4> (in Persian)

[3] J. R. Jambeck et al., "Plastic waste inputs from land into the ocean," *Science*, vol. 347, no. 6223, pp. 768–771, 2015, doi: [10.1126/science.1260352](https://doi.org/10.1126/science.1260352).

[4] A. K. Singh, R. Bedi, and B. S. Kaith, "Composite materials based on recycled polyethylene terephthalate and their properties – A comprehensive review," *Compos. B Eng.*, vol. 219, p. 108928, 2021, doi: [10.1016/j.compositesb.2021.108928](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108928).

[5] A. K. Bledzki and J. Gassan, "Composites reinforced with cellulose based fibres," *Prog. Polym. Sci.*, vol. 24, no. 2, pp. 221–274, 1999, doi: [10.1016/S0079-6700\(98\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(98)00018-5).

[6] J. Zhang, H. Wang, R. Ou, and Q. Wang, "The properties of flax fiber reinforced wood flour/high density polyethylene composites," *J. Forestry Res.*, vol. 29, no. 2, pp. 533–540, 2018, doi: [10.1007/s11676-017-0461-0](https://doi.org/10.1007/s11676-017-0461-0).

[7] M. Rabnawaz, I. Wyman, R. Auras, and S. Cheng, "A roadmap towards green packaging: the current status and future outlook for polyesters in the packaging industry," *Green Chem.*, vol. 19, no. 20, pp. 4737–4753, 2017, doi: [10.1039/c7gc02521a](https://doi.org/10.1039/c7gc02521a).

[8] A. K. Mohanty, M. Misra, and L. T. Drzal, Eds., *Natural fibers, biopolymers, and biocomposites*. CRC Press, 2005, doi: [10.1201/9780203508206](https://doi.org/10.1201/9780203508206).

[9] R. C. Thompson et al., "Lost at sea: where is all the plastic?," *Science*, vol. 304, no. 5672, pp. 838–838, 2004, doi: [10.1126/science.1094559](https://doi.org/10.1126/science.1094559).

[10] J. Deng et al., "Overview of renewable polysaccharide-based composites for biodegradable food packaging applications," *Green Chem.*, vol. 24, no. 2, pp. 480–492, 2022, doi: [10.1039/d1gc03898b](https://doi.org/10.1039/d1gc03898b).

[11] K. B. Adhikary, S. Pang, and M. P. Staiger, "Dimensional stability and mechanical behaviour of wood–plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE),"

دفعات بازیافت، خواص مکانیکی این کامپوزیت‌ها به‌وضوح کاهش می‌یابد. به‌طور خاص، مقاومت و ضریب الاستیک کشش و خمشی و همچنین مقاومت به ضربه فاق‌دار به ترتیب 21/9، 25/4، 30/3 و 27/9 و 23/1 درصد کاهش یافته است. این کاهش قابل‌توجه نشان‌دهنده تأثیر منفی فرآیند بازیافت بر ساختار و کارایی مواد است.

درعین‌حال، نتایج مربوط به ثبات حرارتی نشان داد که باوجود افزایش تعداد دفعات بازیافت، تغییر چندانی در این خصوص مشاهده نمی‌شود. میزان زغال باقی‌مانده در نمونه‌ها نیز در چهار سطح بازیافت به ترتیب برابر با ۹/۹۶، ۹/۳۶، ۸/۱۶ و ۷/۷۶ درصد بوده که نشان‌دهنده پایداری حرارتی نسبی این کامپوزیت‌ها در شرایط مختلف است.

بررسی‌های گرماسنجی وزنی نیز نشان داد که دمای تخریب نمونه‌ها تفاوت معناداری ندارد و در هر چهار سطح بازیافت، سه محدوده تخریب حرارتی شناسایی شد. این نتایج حاکی از این است که با افزایش تعداد دفعات بازیافت، تخریب پیوندهای شیمیایی در ساختار پلیمر بیشتر می‌شود که این امر منجر به کاهش وزن مولکولی و در نهایت کاهش گرماسنجی وزنی پلیمر می‌گردد. همچنین، تجمع ناخالصی‌ها و افزودنی‌ها در طی فرآیند بازیافت، غلظت آن‌ها را افزایش می‌دهد و این موضوع به کاهش خواص مکانیکی و حرارتی کمک می‌کند.

بنابراین، نتایج این تحقیق به اهمیت توجه به تأثیرات منفی ممکن بر خواص مکانیکی و حرارتی در فرآیندهای بازیافت پلیمرها اشاره دارد. این یافته‌ها ضرورت بهینه‌سازی فرآیندهای بازیافت را برای حفظ کیفیت مواد بازیافت‌شده و ارتقاء کارایی آن‌ها، به‌ویژه در استفاده از کامپوزیت‌های چوب-پلاستیک، مورد تأکید قرار می‌دهد. با توجه به نتایج، پیشنهاد می‌شود که در آینده، تحقیقات بیشتری در زمینه شناسایی روش‌های بهینه بازیافت و کاهش اثرات منفی آن بر خواص مواد انجام شود. این امر می‌تواند به توسعه پایدار و بهبود عملکرد محصولات حاصل از بازیافت کمک شایانی کند.

5- منابع

[1] S. Pourabbasi and A. Samariha, "Evaluation of the physical and mechanical properties of polyethylene/corn stalk fiber composites used in the packaging industry," *Packaging Sci. Art*, vol. 15, no. 57, pp. 13–19, 2024. [Online]. Available: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22286675.1403.15.57.2.1> (in Persian)

- pp. 227–233, 2007, doi: [10.1016/j.compositesa.2006.05.005](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2006.05.005).
- [18] M. G. Salemane, and A. S. Luyt, Thermal and mechanical properties of polypropylene–wood powder composites. *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 100, no. 5, 4173–4180, 2006, doi: [https://doi: 10.1002/app.23521](https://doi.org/10.1002/app.23521).
- [19] G. Zhuo, X. Zhang, Y. Liu, and M. Wang, "Effect of multiple recycling on properties of poplar fiber reinforced high density polyethylene wood-plastic composites," *Mater. Res. Express*, vol. 6, no. 12, p. 125514, 2019, doi: [10.1088/2053-1591/ab5742](https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab5742).
- [20] A. Delviawan, S. Suzuki, Y. Kojima, and H. Kobori, "The influence of filler characteristics on the physical and mechanical properties of wood plastic composite(s)," *Rev. Agric. Sci.*, vol. 7, pp. 1–9, 2019, doi: [10.7831/ras.7.1](https://doi.org/10.7831/ras.7.1).
- [21] I. Turku, T. Kärki, and A. Puurtinen, "Flammability of wood plastic composites prepared from plastic waste," *Fire Mater.*, vol. 42, no. 2, pp. 198–201, 2018, doi: [10.1002/fam.2480](https://doi.org/10.1002/fam.2480).
- [22] E. Jayamani and V. Balakrishnan, "Thermal Properties and Flammability of Wood Plastic Composites," in *Wood Polymer Composites: Recent Advancements and Applications*, Singapore: Springer, 2021, pp. 161–178, doi: [10.1007/978-981-16-1606-8_8](https://doi.org/10.1007/978-981-16-1606-8_8).
- [23] Y. Guo, S. Zhu, Y. Chen, and D. Li, "Thermal properties of wood-plastic composites with different compositions," *Materials*, vol. 12, no. 6, p. 881, 2019, doi: [10.3390/ma12060881](https://doi.org/10.3390/ma12060881).
- Compos. B Eng.*, vol. 39, no. 5, pp. 807–815, 2008, doi: [10.1016/j.compositesb.2007.10.005](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2007.10.005).
- [12] O. Faruk, A. K. Bledzki, H. P. Fink, and M. Sain, "Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010," *Prog. Polym. Sci.*, vol. 37, no. 11, pp. 1552–1596, 2012, doi: [10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003](https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003).
- [13] M. Sain and S. Panthapulakkal, "Bioprocess preparation of wheat straw fibers and their characterization," *Ind. Crops Prod.*, vol. 23, no. 1, pp. 1–8, 2006, doi: [10.1016/j.indcrop.2005.01.006](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2005.01.006).
- [14] Q. T. Shubhra, A. M. Alam, and M. A. Quaiyyum, "Mechanical properties of polypropylene composites: A review," *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, vol. 26, no. 3, pp. 362–391, 2013, doi: [10.1177/0892705711428659](https://doi.org/10.1177/0892705711428659).
- [15] M. Bengtsson, M. Le Baillif, and K. Oksman, "Extrusion and mechanical properties of highly filled cellulose fibre–polypropylene composites," *Compos. A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 38, no. 8, pp. 1922–1931, 2007, doi: [10.1016/j.compositesa.2007.03.004](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.03.004).
- [16] S. K. Najafi, E. Hamidinia, and M. Tajvidi, "Mechanical properties of composites from sawdust and recycled plastics," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 100, no. 5, pp. 3641–3645, 2006, doi: [10.1002/app.23159](https://doi.org/10.1002/app.23159).
- [17] A. Karmarkar, S. S. Chauhan, J. M. Modak, and M. Chanda, "Mechanical properties of wood–fiber reinforced polypropylene composites: Effect of a novel compatibilizer with isocyanate functional group," *Compos. A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 38, no. 2,