



## Reinforcement Effect of Nanosilica on the Mechanical and Thermal Performance of Pine Wood Flour/Recycled Polypropylene Hybrid Composites

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

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 study examines the influence of nanosilica incorporation on the mechanical and thermal performance of hybrid biocomposites composed of pine wood flour and recycled polypropylene. Composite formulations containing 50 wt% polypropylene, 50 wt% pine wood flour, nanosilica at four loadings (0, 3, 6, and 9 wt%), and 3 wt% maleic anhydride grafted polypropylene were compounded using a twin-screw extruder. Standardized test specimens were subsequently manufactured by injection molding. Mechanical properties—tensile and flexural strength and modulus, as well as notched Izod impact strength—alongside thermal behavior and flammability characteristics were evaluated. Increasing nanosilica content to 9 wt% resulted in reductions of 12.98% and 5.16% in tensile strength and tensile modulus, respectively. Flexural strength, flexural modulus, and notched impact strength also declined by 6.1%, 5.02%, and 10.92%, respectively. Conversely, the limiting oxygen index exhibited a 12.4% increase at the highest nanosilica loading, accompanied by higher residual char and improved thermal stability. Morphological analyses further showed fewer interfacial voids in specimens containing 3 wt% nanosilica, indicating superior fiber–matrix adhesion and reduced fiber pullout. Overall, nanosilica demonstrated a favorable contribution to the thermal performance of the composites, though excessive loading adversely affected mechanical properties due to nanoparticle agglomeration. The findings highlight the importance of optimizing nanosilica content to achieve a balanced enhancement of mechanical and thermal functionalities in bio-based polymer composites.

### Keywords

Pine wood flour  
recycled polypropylene  
flexural strength  
flexural modulus  
nanosilica  
residual char

Received: 30.08.2025

Revised: 02.11.2025

Accepted: 22.11.2025

### \*Corresponding Author

Jafar Ebrahimpour Kasmani

Email

[kasmani@iau.ac.ir](mailto:kasmani@iau.ac.ir)

## 1- Introduction

Polymer composites, comprising two or more distinct phases, have been widely adopted across numerous industrial sectors due to their superior mechanical and thermal performance compared with monolithic materials [1]. In recent years, the utilization of natural fibers and fillers—particularly wood flour—in polymer matrices has gained momentum owing to their cost-effectiveness, biodegradability, and renewability [2]. Although pine wood flour is commonly used in wood–plastic composites, its incorporation often leads to

diminished mechanical and thermal performance, thus necessitating the introduction of reinforcing additives such as nanomaterials [3].

Nanosilica, characterized by its high specific surface area, exceptional thermal stability, and strong potential for interfacial bonding, has been widely reported as an effective reinforcement agent in polymer-based composites [4]. Prior studies have demonstrated that nanosilica can enhance strength, toughness, crystallinity, and thermal resistance in wood–polymer composites [5], and its role as a

How to Cite this Article:

[1] J. E. Kasmani and A. Samariha, "Reinforcement Effect of Nanosilica on the Mechanical and Thermal Performance of Pine Wood Flour/Recycled Polypropylene Hybrid Composites," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 241–255, 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.543980.1163> (in Persian)



©2026 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

thermal enhancer contributes to elevated degradation temperatures and improved performance in industrial applications [6].

Despite these advantages, achieving uniform nanoparticle dispersion remains a major challenge, as agglomeration can diminish the reinforcing efficiency. Moreover, environmental considerations and processing costs associated with nanomaterials must be carefully evaluated.

The present study aims to systematically assess the effect of varying nanosilica concentrations on the mechanical and thermal properties of pine wood flour/recycled polypropylene composites.

## 2- Materials and Methods

### 2.1 Materials

Recycled polypropylene was prepared by reprocessing virgin polypropylene (density: 0.952 g/cm<sup>3</sup>) supplied by Arak Petrochemical Trading Company. The polymer was melt-compounded twice using a twin-screw extruder at 180 °C and 100 rpm to obtain uniform recycled PP granules. Pine wood flour, sourced from a furniture manufacturer, was sieved (passed through 60 mesh and retained on 70 mesh) and oven-dried at 100 °C for 24 h. Maleic anhydride grafted polypropylene (98% purity) served as a coupling agent. Nanosilica (Degussa, Germany) was employed as the nanofiller.

### 2.2 Methods

Formulations used in this study are shown in Table 1. All components were compounded in a counter-rotating twin-screw extruder at 160 °C and 70 rpm. The high mixing efficiency of this system ensured improved homogeneity and nanosilica dispersion, which is critical for tailoring composite performance.

**Table 1: Percentage Composition of the Composite in Different Treatments**

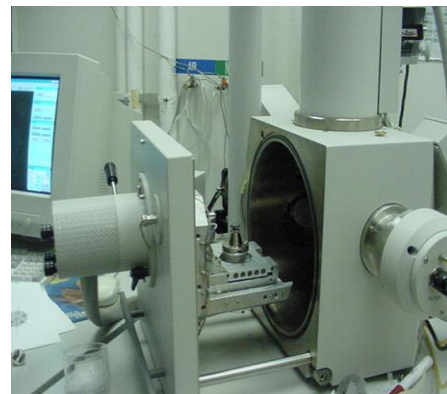
No	Nanosilica (phc)	Wood Flour (phc)	Polypropylene (phc)	Compatibilizer (phc)
1	0	50	50	3
2	3	50	50	3
3	6	50	50	3
4	9	50	50	3

### 2.2.1 Preparation of Standard Test Specimens

The compounded granules were shaped into standardized specimens using a semi-industrial injection molding machine. Injection parameters were optimized to ensure acceptable surface quality and consistent mechanical performance. Specimens were conditioned before testing.

### 2.2.2 Mechanical and Thermal Properties

Tensile and flexural properties were evaluated following ASTM D638 and ASTM D747, respectively, using an Instron 1186 machine. Notched Izod impact strength was measured in accordance with ASTM D256 using a Zwick impact tester. Thermogravimetric analysis (TGA) was conducted on 5–7 mg samples using a TGA Q50 analyzer following ASTM E1131. Limiting oxygen index (LOI) was measured per ASTM D2863. Morphological observations were conducted using a JEOL JXA-840 scanning electron microscope.



**Figure 1: JXA-840 Scanning Electron Microscope (SEM)**

### 2.3 Statistical Analysis

A one-way ANOVA (three replicates per treatment) was carried out using SPSS, followed by Duncan's multiple range test at a 95% confidence level.

## 3- Results and Discussion

The results indicated that nanosilica had a significant effect on tensile strength and the limiting oxygen index; however, it did not exert a statistically meaningful influence on tensile modulus, flexural strength, flexural modulus, or notched impact resistance. These findings suggest that while nanosilica effectively enhances certain key properties, it does not produce a substantial

improvement in other mechanical characteristics of the composite.

**Table 2: Analysis of Variance (F-Value and Significance Level) of Processing Variables on Mechanical and Thermal Properties**

Property / Variable	F-Value & Significance
Tensile Strength	6.791 *
Tensile Modulus	0.583 ns
Flexural Strength	2.526 ns
Flexural Modulus	1.604 ns
Notched Impact Strength	2.696 ns
Limiting Oxygen Index (LOI)	272.902 *

**Notes:** \*Significant at  $p < 0.05$ ; ns = not significant.

### 3.1 Tensile Properties

Nanosilica exhibited a significant effect on tensile strength but not on tensile modulus. At higher loadings, poor nanoparticle dispersion and agglomeration hindered interfacial adhesion, resulting in reduced tensile performance. Moderate nanosilica incorporation, however, contributed to enhanced interfacial stress transfer [7–10].

### 3.2 Flexural Properties

Nanosilica loading influenced flexural response in a similar manner. Optimal concentrations strengthened the composite structure, whereas excessive nanosilica disrupted fiber–matrix interactions and impaired flexural strength and stiffness [11, 12].

### 3.3 Impact Strength

Nanosilica decreased notched impact strength, attributed to increased brittleness, reduced polymer chain mobility, and the presence of nanoparticle clusters acting as crack initiators [13].

### 3.4 Thermal Stability and Flammability

Nanosilica increased residual char yield and delayed thermal degradation. LOI enhancement was attributed to the formation of silica-derived insulating layers, which impede heat transfer and restrict volatile release from the matrix [14]. These results confirm the beneficial role of nanosilica in improving fire resistance and thermal performance.

## 3.5 Morphological Analysis

SEM micrographs revealed poor interfacial bonding and noticeable voids in nanosilica-free composites. In contrast, nanosilica-containing samples exhibited improved interfacial adhesion, reduced porosity, and more coherent failure patterns, demonstrating effective stress transfer and superior morphological integrity [15].

## 4- Conclusion

This study demonstrated that nanosilica exerts a dual effect on wood flour/recycled polypropylene composites. While excessive nanosilica loadings negatively influenced tensile, flexural, and impact strengths due to nanoparticle agglomeration and decreased interfacial compatibility, nanosilica significantly enhanced thermal stability, residual char formation, and fire resistance.

SEM analyses confirmed improved interfacial adhesion in nanosilica-modified composites. These findings emphasize the importance of optimizing nanosilica dispersion and loading levels to obtain a desirable balance between mechanical and thermal performance, thereby advancing the development of durable and high-performance bio-based composites for industrial applications.

## 5- References

- [1] A. Babazadeh, M. Hadad, and M. Safarabadi, “Investigation of the effect of graphene nanoplatelets and carbon nanotubes on improving the mechanical properties of aluminum matrix nanocomposites,” *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 7, No. 4, pp. 1197–1206, 2021 (in Persian).
- [2] A. Montazeri and M. Safarabadi, “A comparative study on adding chopped kenaf fibers to the core of glass/epoxy laminates under quasi-static indentation: Experimental and numerical approaches,” *Journal of Composite Materials*, Vol. 56, No. 25, pp. 3821–3833, 2022, doi: [10.1177/00219983221112861](https://doi.org/10.1177/00219983221112861).
- [3] M. Farsi, “Effect of nano-SiO<sub>2</sub> and bark flour content on the physical and mechanical properties of wood–plastic composites,” *Journal of Polymers*

and the Environment, Vol. 25, No. 2, pp. 308–314, 2017, doi: [10.1007/s10924-016-0797-9](https://doi.org/10.1007/s10924-016-0797-9).

[4] P. Jagadeesh, M. Puttegowda, S. M. Rangappa, and S. Siengchin, “Influence of nanofillers on biodegradable composites: A comprehensive review,” *Polymer Composites*, Vol. 42, No. 11, pp. 5691–5711, 2021, doi: [10.1002/pc.26235](https://doi.org/10.1002/pc.26235)

[5] M. Hadad, A. Babazadeh, and M. Safarabadi, “Investigation and comparison of the effect of graphene nanoplatelets and carbon nanotubes on improving mechanical properties in the stir casting process of aluminum matrix nanocomposites,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 109, No. 9, pp. 2535–2547, 2020, doi: [10.1007/s00170-020-05829-7](https://doi.org/10.1007/s00170-020-05829-7).

[6] M. Ghorbani, P. Biparva, and S. Hosseinzadeh, “Effect of colloidal silica nanoparticles extracted from agricultural waste on physical, mechanical and antifungal properties of wood polymer composite,” *European Journal of Wood and Wood Products*, Vol. 76, No. 2, pp. 749–757, 2018, doi: [10.1007/s00107-017-1254-6](https://doi.org/10.1007/s00107-017-1254-6).

[7] S. Sheykhnazari, T. Tabarsa, A. Ashori, and A. Ghanbari, “Bacterial cellulose composites loaded with SiO<sub>2</sub> nanoparticles: Dynamic-mechanical and thermal properties,” *International Journal of Biological Macromolecules*, Vol. 93, pp. 672–677, 2016, doi: [10.1016/j.ijbiomac.2016.09.012](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.09.012).

[8] S. R. Mousavi *et al.*, “Mechanical properties of bamboo fiber-reinforced polymer composites: A review of recent case studies,” *Journal of Materials Science*, Vol. 57, No. 5, pp. 3143–3167, 2022, doi: [10.1007/s10853-021-06854-6](https://doi.org/10.1007/s10853-021-06854-6).

[9] O. Faruk, A. K. Bledzki, H. P. Fink, and M. Sain, “Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010,” *Progress in Polymer Science*, 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).

[10] B. K. Deka, M. Mandal, and T. K. Maji, “Plant fibre reinforced polymer blend/clay

[11] I. Alameri and M. Oltulu, “Mechanical properties of polymer composites reinforced by silica-based materials of various sizes,” *Applied Nanoscience*, Vol. 10, No. 11, pp. 4087–4102, 2020, doi: [10.1007/s13204-020-01530-8](https://doi.org/10.1007/s13204-020-01530-8).

[12] M. Farsi, “Effect of nano-SiO<sub>2</sub> and bark flour content on the physical and mechanical properties of wood–plastic composites,” *Journal of Polymers and the Environment*, Vol. 25, No. 2, pp. 308–314, 2017, doi: [10.1007/s10924-016-0797-9](https://doi.org/10.1007/s10924-016-0797-9).

[13] R. Kumar, A. Ganguly, and R. Purohit, “Properties and applications of bamboo and bamboo fibre composites,” *Materials Today: Proceedings*, 2023, doi: [10.1016/j.matpr.2023.02.189](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.189).

[14] M. Kiaei, H. Amiri, A. Samariha, and N. Amani, “Effect of nanosilica on thermal, flammability, and morphological properties of WF/RPS-based nanocomposites,” *Cerme*, Vol. 24, No. 1, pp. 59–66, 2018, doi: [10.1590/01047760201824012502](https://doi.org/10.1590/01047760201824012502).

[15] S. S. Ray and M. Okamoto, “Polymer/layered silicate nanocomposites: A review from preparation to processing,” *Progress in Polymer Science*, Vol. 28, No. 11, pp. 1539–1641, 2003, doi: [10.1016/j.progpolymsci.2003.08.002](https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2003.08.002).





## تأثیر تقویت‌کنندگی نانوسیلیس بر خواص مکانیکی و حرارتی چندسازه‌های آرد چوب کاج و پلی‌پروپیلن بازیافتی

جعفر ابراهیم‌پور کاسمانی<sup>۱</sup>، احمد ثمریها<sup>۲</sup>

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

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

### چکیده

این تحقیق با هدف بررسی تأثیر نانوسیلیس بر خواص مکانیکی و حرارتی چندسازه حاصل از آرد چوب کاج و پلی‌پروپیلن ضایعاتی انجام شد. برای این منظور، ترکیبی از پلی‌پروپیلن (در سطح ثابت ۵۰ درصد) و آرد چوب کاج (در سطح ثابت ۵۰ درصد) به همراه نانوسیلیس در چهار سطح (۰، ۳، ۶ و ۹ درصد) و انیدرید مالئیک پیوند داده‌شده با پلی‌پروپیلن (در سطح ثابت ۳ درصد) به وسیله اکسترودر دو ماردون مخلوط شدند. نمونه‌های آزمایشی استاندارد با استفاده از روش قالب‌گیری تزریقی تهیه گردید. خواص مکانیکی شامل مقاومت کششی و خمشی، مدول کششی و خمشی و مقاومت به ضربه فاق‌دار و همچنین خواص حرارتی و آتش‌گیری نمونه‌ها اندازه‌گیری و ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که با افزایش نانوسیلیس تا سطح ۹ درصد، مقاومت و مدول کششی به ترتیب ۱۲/۹۸ و ۵/۱۶ درصد کاهش یافت. همچنین، مقاومت و مدول خمشی و مقاومت به ضربه فاق‌دار نیز به ترتیب ۶/۱، ۵/۰۲ و ۱۰/۹۲ درصد کاهش نشان دادند. علاوه بر این، با افزایش نانوسیلیس تا سطح ۹ درصد، شاخص اکسیژن محدود ۱۲/۴ درصد افزایش یافت که نشان‌دهنده بهبود مقاومت حرارتی است. همچنین، میزان خاکستر باقیمانده و ثبات حرارتی نیز با افزایش میزان نانوسیلیس افزایش یافت. این نتایج حاکی از تأثیر مثبت نانوسیلیس بر ویژگی‌های حرارتی و مکانیکی چندسازه‌های ساخته‌شده از آرد چوب کاج و پلی‌پروپیلن ضایعاتی است و می‌تواند به بهبود عملکرد این مواد در کاربردهای مختلف کمک کند. در نمونه‌های حاوی ۳ درصد نانوسیلیس، فضاهای خالی کمتری مشاهده شد که نشان‌دهنده اتصال خوب الیاف با ماتریس و جلوگیری از جدایی آن‌ها در زمان شکست است.

### کلمات کلیدی

آرد چوب کاج  
پلی‌پروپیلن بازیافتی  
مقاومت خمشی  
مدول خمشی  
نانوسیلیس  
خاکستر باقیمانده

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۰۷

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۱۱

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۰۱

### \*نویسنده مسئول

جعفر ابراهیم‌پور کاسمانی

ایمیل

[kasmani@iau.ac.ir](mailto:kasmani@iau.ac.ir)

### ۱- مقدمه

زیست‌سازگاری و هزینه پایین، به‌ویژه در کاربردهای زیست‌محیطی، مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱]. چندسازه‌ها، از جمله مواد مهندسی هستند که به دلیل دارا بودن خواص مهمی نظیر نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به خوردگی و دامنه گسترده تغییر در خواص فیزیکی و مکانیکی، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند [۲].

چندسازه‌ها به‌عنوان مواد ترکیبی که از دو یا چند فاز مختلف تشکیل شده‌اند، به‌طور گسترده‌ای در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مواد به دلیل داشتن خواص مکانیکی و حرارتی برتر نسبت به مواد خالص، در دهه‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. یکی از انواع متداول این چندسازه‌ها، از ترکیب آرد چوب و پلی‌پروپیلن ساخته‌شده است. این چندسازه‌ها به دلیل ویژگی‌های

How to Cite this Article:

[1] J. E. Kasmani and A. Samariha, "Reinforcement Effect of Nanosilica on the Mechanical and Thermal Performance of Pine Wood Flour/Recycled Polypropylene Hybrid Composites," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 241-255, 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.543980.1163> (in Persian)



©2026 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: ۲۲۳۲-۲۹۸۱

مؤثری بارهای اعمال شده را توزیع کرده و منجر به افزایش استحکام مکانیکی شوند.

ابراهیم پور کاسمانی و ثمریها (۲۰۲۵) به بررسی تأثیر سه بار بازیافت بر خواص حرارتی و مکانیکی کامپوزیت حاصل از آرد چوب زبان گنجشک و پلی اتیلن بازیافتی جهت مصارف بسته بندی پرداختند. نتایج نشان داد افزایش تعداد دفعات بازیافت، تأثیر منفی بر استحکام کشش و ضریب الاستیک کشش و خمشی و مقاومت به ضربه داشت [۱۰].

الله<sup>۵</sup> (۲۰۲۰) به بررسی اثر مقادیر مختلف نانوسیلیس بر خواص مکانیکی پرداخته و تأکید کرده که نانوسیلیس می تواند به عنوان عامل تقویتی در پلیمرهای گرمانرم عمل کند [۱۱]. سایر محققین نیز به بهبود خواص حرارتی و مکانیکی با افزودن نانوسیلیس اشاره کرده اند. این نتایج نشان می دهد که نانوسیلیس می تواند به عنوان یک تقویت کننده مؤثر در چندسازه های آرد چوب و پلی پروپیلن عمل کند [۱۲ و ۱۳].

علاوه بر این، نانوسیلیس به عنوان یک عامل بهبوددهنده حرارتی، نقش مهمی در افزایش پایداری حرارتی چندسازه ها ایفا می کند. تحقیقات نشان داده اند که وجود نانوسیلیس می تواند دمای تخریب حرارتی چندسازه ها را افزایش دهد و از این طریق، پایداری حرارتی آن ها را بهبود بخشد [۱۴].

نانوسیلیس با ایجاد یک شبکه محکم در ماده زمینه پلیمری، می تواند انتقال حرارت را بهبود بخشد و از تجزیه زودهنگام مواد جلوگیری کند. این امر به خصوص در کاربردهای صنعتی که نیاز به دوام و پایداری حرارتی بالایی دارند، بسیار حیاتی است.

با وجود مزایای نانوسیلیس، چالش هایی نیز در استفاده از آن وجود دارد. یکی از چالش های اصلی، توزیع یکنواخت نانوسیلیس در ماده زمینه پلیمری است. تجمع نانو ذرات می تواند منجر به کاهش خواص مکانیکی و حرارتی شود؛ بنابراین، انتخاب روش های مناسب برای ترکیب و پراکندگی نانوسیلیس در ماده زمینه پلیمری اهمیت دارد.

به علاوه، هزینه تولید نانوسیلیس و مسائل زیست محیطی مرتبط با تولید و استفاده از نانو مواد نیز باید در نظر گرفته شود. با این حال، با توجه به مزایای قابل توجه نانوسیلیس و پیشرفت های فناوری، می توان راهکارهایی را برای حل این چالش ها ارائه داد.

استفاده از الیاف طبیعی در مواد چندسازه، توجه قابل ملاحظه ای از سوی بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است [۳]. آرد چوب کاج به عنوان یک منبع طبیعی و تجدیدپذیر، به سبب وزن کم و قابلیت جذب رطوبت، در تولید چندسازه های پلیمری استفاده می شود. با این حال، استفاده از آرد چوب به تنهایی می تواند منجر به کاهش خواص مکانیکی و حرارتی این چندسازه ها شود. به همین دلیل، نانوسیلیس به عنوان یک ماده تقویت کننده می تواند به بهبود این خواص کمک کند [۴].

نانوسیلیس به دلیل نسبت سطح به حجم بالا، خواص مکانیکی عالی و پایداری حرارتی مناسب، می تواند به طور مؤثری خواص چندسازه های پلیمری را بهبود بخشد. تحقیقات نشان داده اند که افزودن نانوسیلیس به ماده زمینه<sup>۱</sup> پلی پروپیلن می تواند منجر به افزایش استحکام کششی و مدول الاستیسیته این چندسازه ها شود [۵].

علاوه بر این، نانوسیلیس می تواند به عنوان یک عامل بهبوددهنده حرارتی عمل کند و دمای تخریب حرارتی چندسازه ها را افزایش دهد [۶]. این ویژگی ها باعث می شود که نانوسیلیس به گزینه ای جذاب برای تقویت چندسازه های پلیمری تبدیل شود، به ویژه در کاربردهایی که نیاز به خواص مکانیکی و حرارتی بالاتری دارند.

مطالعات مختلف نشان داده اند که افزودن نانوسیلیس به چندسازه های چوب و پلی پروپیلن منجر به افزایش استحکام و چقرمگی این مواد می شود. به عنوان مثال، خروسچل<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۵) به تأثیر مثبت نانوسیلیس بر پیوند الیاف و بهبود خواص حرارتی و مکانیکی اشاره کرده اند [۷].

نانو کامپوزیت ها به عنوان مواد مهندسی، به دلیل ویژگی های برجسته ای نظیر استحکام بالا و مقاومت در برابر خوردگی، توجه قابل توجهی از سوی پژوهشگران را جلب کرده اند. بهینه سازی فرآیند توسعه و کاربرد دقیق نانو ذرات تقویت کننده، از جمله رویکردهای مؤثری هستند که جهت بهبود خواص مکانیکی این مواد به کار می روند [۸].

یزپورسکا<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۲) نیز گزارش کردند که افزودن نانوسیلیس باعث بهبود اتصال بین پلی اتیلن سنگین و الیاف چوب می شود و بلورینگی<sup>۴</sup> و پایداری حرارتی را افزایش می دهد [۹]. یکی از ویژگی های کلیدی نانوسیلیس، توانایی آن در ایجاد پیوندهای قوی تر درون ماده زمینه پلیمری است. این پیوندهای قوی می توانند به طور

<sup>4</sup> Crystallinity

<sup>5</sup> Ullah

<sup>1</sup> Matrix

<sup>2</sup> Chruściel

<sup>3</sup> Jeziorska

پودر نانوسیلیس<sup>۳</sup> تولیدشده توسط شرکت دگوسا<sup>۴</sup> کشور آلمان نیز در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات نانوسیلیس مورد استفاده در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات پلی‌پروپیلن پیوند خورده با مالئیک انیدرید

شاخص جریان مذاب (g/10min)	۷
چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )	۰/۹۶۵
مقدار انیدرید پیوند خورده (wt%)	٪۱

جدول ۲: مشخصات نانوسیلیس

Silicon Oxide Purity	SiO <sub>2</sub> 99+%
APS	11-13nm
SSA	200 m <sup>2</sup> /g
True density	2.4 g/cm <sup>3</sup>
Bulk density	<0.10 g/cm <sup>3</sup>
Color	White
Moisture	<2%
Weight Loss on Ignition	30%
According to Producer Information	

#### ۲-۲- روش‌ها

درصد وزنی اجزای چندسازه‌های ساخته‌شده در جدول ۳ آورده شده است. اختلاط پلی‌پروپیلن ضایعاتی، آرد چوب، نانوسیلیس و سازگار کننده به صورت نسبت وزنی مشخص، توسط دستگاه اکسترودر دو ماردون<sup>۵</sup> (دو مارپیچه) با دمای ساخت ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت ماردون ۷۰ دور در دقیقه که جهت حرکت ماردون‌های آن خلاف هم بود، در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران انجام شد.

این فرآیند اختلاط به منظور دستیابی به توزیع یکنواخت اجزا و بهبود خواص مکانیکی و حرارتی چندسازه‌ها طراحی شده است. استفاده از اکسترودر دو ماردون به دلیل توانایی بالا در همگن‌سازی و توزیع مواد در مقیاس نانو، به‌ویژه در ترکیبات پلیمری، به‌طور قابل توجهی بر کیفیت نهایی کامپوزیت تأثیر می‌گذارد.

هدف اصلی این تحقیق بررسی تأثیر نانوسیلیس به‌عنوان تقویت‌کننده بر خواص مکانیکی و حرارتی چندسازه‌های<sup>۱</sup> حاصل از آرد چوب کاج و پلی‌پروپیلن بازیافتی است. با توجه به افزایش نگرانی‌ها در مورد محیط زیست و نیاز به استفاده از مواد تجدیدپذیر، این تحقیق به دنبال ارائه راهکارهایی برای بهبود خواص این چندسازه‌ها با استفاده از نانوسیلیس است.

نتایج این تحقیق می‌تواند به توسعه مواد جدید با خواص بهینه کمک کرده و به نیازهای صنعتی پاسخ دهد. با توجه به اهمیت روزافزون استفاده از مواد سازگار با محیط زیست و بهبود عملکرد آن‌ها، این تحقیق می‌تواند به‌عنوان یک قدم مؤثر در این راستا محسوب شود و به افزایش کاربردهای عملی این نوع چندسازه‌ها در صنایع مختلف کمک کند.

درنهایت، بررسی‌های آتی می‌تواند شامل ارزیابی دقیق‌تر اثرات نانوسیلیس بر سایر خواص فیزیکی و شیمیایی این چندسازه‌ها باشد تا به درک بهتری از رفتار آن‌ها در شرایط مختلف دست یابیم. این موضوع می‌تواند به توسعه راهکارهای نوآورانه برای بهبود عملکرد چندسازه‌ها و افزایش کارایی آن‌ها در کاربردهای مختلف منجر شود.

#### ۲- روش تحقیق

##### ۱-۲- مواد

جهت انجام این تحقیق، پلی‌پروپیلن بازیافتی به‌طور آزمایشگاهی تهیه شد. پلی‌پروپیلن با دانسیته ۰/۹۵۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب از شرکت بازرگانی پتروشیمی اراک تأمین و با استفاده از یک اکسترودر دو مارپیچه، تحت دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه دو بار ذوب و گرانول شد.

آرد چوب کاج به‌عنوان تقویت‌کننده پودری در ماده زمینه پلیمری مورد استفاده قرار گرفت. این آرد از یک شرکت تولیدکننده مبلمان تأمین و پس از طبقه‌بندی با دستگاه الک ارتعاشی، آرد عبور کرده از الک با مش ۶۰ و باقیمانده بر الک مش ۷۰ به‌عنوان تقویت‌کننده استفاده گردید. نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. همچنین، مالئیک انیدرید پیوند خورده با پلی‌پروپیلن<sup>۲</sup> به‌عنوان عامل سازگارکننده با خلوص ۹۸ درصد مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات پلی‌پروپیلن پیوند خورده با مالئیک انیدرید در جدول ۱ خلاصه شده است.

<sup>3</sup> Nanosilica (NanoSiO<sub>2</sub>)

<sup>4</sup> Degussa

<sup>6</sup> Dr. Collien

<sup>1</sup> Composite

<sup>2</sup> Maleic Anhydride Grafted With Polypropylene (MAPP)

استفاده شوند، 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 آزمایش خمش، نمونه‌ها از آیین‌نامه D-747 استاندارد ASTM<sup>2</sup> و با سرعت بارگذاری ۲ mm/min از دستگاه اینسترون مدل ۱۱۸۶ استفاده شد (شکل ۲-الف).

برای بررسی استحکام کششی نمونه‌ها، از آیین‌نامه D-638-M-89 استاندارد ASTM بهره‌برداری شد. نمونه‌ها به صورت M-I و دمبلی تهیه گردیدند و سپس از دستگاه اینسترون مدل ۱۱۸۶ برای اعمال آزمایش کشش استفاده شد (شکل ۲-ب). جهت بررسی و آزمایش ضربه فاق‌دار آیزود روی نمونه‌ها از آیین‌نامه D-256 استاندارد ASTM بهره‌گیری شد. برای این منظور دستگاه آزمایشگر مقاومت به ضربه مدل Zwick انتخاب شد (شکل ۲-ج).

برای انجام گرماسنجی رویشی تفاضلی، نمونه‌هایی با وزن بین ۵ تا ۷ میلی‌گرم تهیه و در دستگاه TGA<sup>3</sup> (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 (شکل ۲-د).

برای انجام آزمایش شاخص اکسیژن محدود<sup>۴</sup>، نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM D2863، به ابعاد ۴mm × ۵۰ × ۱۵۰ میلی‌متر تهیه شدند.



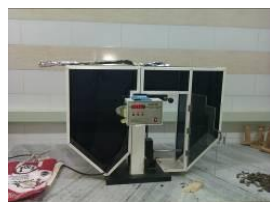
ب



الف



د



ج

شکل ۲: الف) دستگاه Instron جهت آزمون خمش، ب) دستگاه Instron جهت آزمون کشش، ج) دستگاه آزمون ضربه Zwick، د) دستگاه آنالیز حرارتی

جدول ۳: درصد اجزای کامپوزیت در تیمارهای مختلف

ردیف	نانو سیلیس (phc)	آرد چوب (phc)	پلی پروپیلن (phc)	سازگارکننده (phc)
۱	۰	۵۰	۵۰	۳
۲	۳	۵۰	۵۰	۳
۳	۶	۵۰	۵۰	۳
۴	۹	۵۰	۵۰	۳

phc: per hundred compounds

### ۲-۲-۱ ساخت نمونه‌های آزمایشی استاندارد

به منظور ساخت نمونه‌های آزمایشی استاندارد، گرانول‌ها به دستگاه قالب‌گیر تزریقی<sup>۱</sup> تزریق می‌گردد. برای این کار از دستگاه تزریق نیمه‌صنعتی ساخت شرکت ایمن ماشین تهران، موجود در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران استفاده شد. دمای سیلندر تزریق در هر سه ناحیه به ترتیب ۱۶۰، ۱۵۵ و ۱۴۵ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد، درحالی‌که دمای قالب ۴۰ درجه سانتی‌گراد بود. فشار تزریق ۸۰ مگا پاسکال و زمان دوره تزریق کمتر از ۲۰ ثانیه در نظر گرفته شد.

عملیات خنک‌کردن قالب با آب سرد انجام شد و نمونه‌ها جهت آزمایش‌های کشش، خمش و ضربه پس از ۲ دقیقه از قالب بیرون آورده شدند (شکل ۱). این فرآیند به منظور دستیابی به نمونه‌هایی با خواص مکانیکی بهینه و کیفیت بالا طراحی شده است.



شکل ۱: نمونه‌های آزمون ساخته شده

### ۲-۲-۲ اندازه‌گیری خواص مکانیکی و حرارتی

خواص مکانیکی شامل مقاومت خمشی، مدول خمشی، مقاومت به ضربه و مقاومت کششی و خواص آمیزه شامل آزمایش‌های گرماسنجی رویشی تفاضلی نانو چندسازه‌های تهیه‌شده، مورد بررسی قرار گرفتند. قبل از اینکه نمونه‌های استاندارد تهیه‌شده برای انجام آزمایش مکانیکی

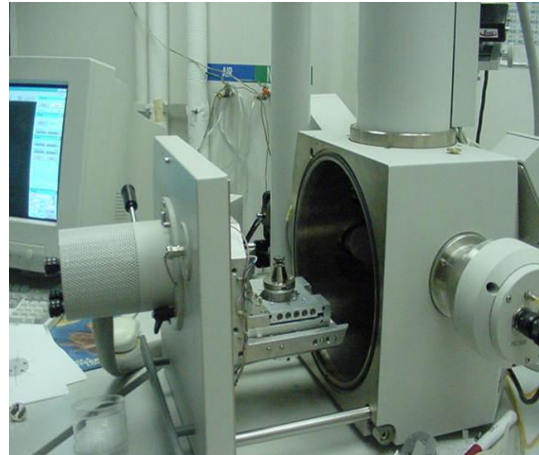
<sup>3</sup> Thermal gravimetric analysis

<sup>4</sup> Limited Oxygen Index (LOI)

<sup>1</sup> Injection Molding

<sup>2</sup> American Society for Testing and Materials

مورفولوژی چندسازه با استفاده از میکروسکوپ الکترونی مدل JXA-840، ساخت شرکت JEOL کشور ژاپن مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۳).



شکل ۳: میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل JXA-840

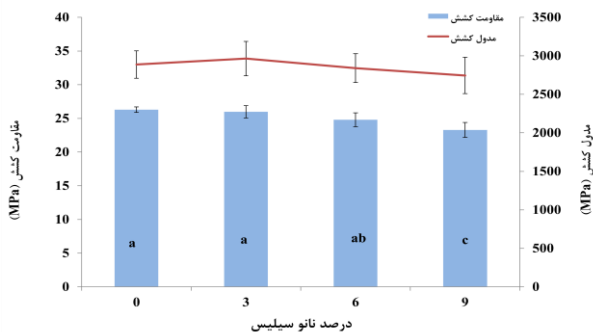
جدول ۴: تجزیه واریانس (مقدار F و سطح معنی‌داری) اثر متغیرهای ساخت بر مقاومت‌ها

متغیرهای ساخت	مقدار F و سطح معنی‌داری
استحکام کششی	*۶/۷۹۱
ضریب الاستیک کشش	ns ۰/۵۸۳
مقاومت خمشی	ns ۲/۵۲۶
مدول خمشی	ns ۱/۶۰۴
مقاومت به ضربه فاق‌دار	ns ۲/۶۹۶
شاخص اکسیژن محدود	*۲۷۲/۹۰۲

#### ۳-۱- تأثیر مقدار نانوسیلیس بر مقاومت و مدول کشش

تحلیل دانکن، سطوح مختلف مقادیر میانگین مقدار نانوسیلیس را در دو گروه مختلف قرار داد، همان‌طوری‌که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، بیش‌ترین مقاومت کششی مربوط به ترکیب (۰ درصد نانوسیلیس) برابر ۲۶/۲۹ مگاپاسکال و کمترین مقدار آن مربوط به ترکیب (۹ درصد نانوسیلیس) برابر ۲۳/۲۷ مگاپاسکال می‌باشد شکل ۴.

بیش‌ترین مدول کششی مربوط به ترکیب (۳ درصد نانوسیلیس) برابر ۲۹۶۳/۰۹ مگاپاسکال و کمترین مقدار آن مربوط به ترکیب (۹ درصد نانوسیلیس) برابر ۲۷۴۴/۹۳ مگاپاسکال می‌باشد شکل ۴.



شکل ۴: تأثیر مستقل نانوسیلیس بر مقاومت کششی و مدول کششی

در این تحقیق، تأثیر نانوسیلیس بر خواص مکانیکی نانچندسازه‌های پلی‌پروپیلن ضایعاتی و آرد چوب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزودن نانوسیلیس به چوب پلاستیک منجر به کاهش مقاومت کششی این ماده مرکب می‌شود. این پدیده ممکن است به دلیل توزیع نامناسب نانو در ماده زمینه چوب پلاستیک باشد. اگر نانو به‌طور یکنواخت پخش نشوند و تجمع پیدا کنند، نقاط

#### ۳-۲- تجزیه و تحلیل نتایج

در این بررسی، سطوح متفاوت نانوسیلیس در چهار سطح (۰، ۳، ۶ و ۹ درصد) مورد مطالعه قرار گرفت. برای هر تیمار، تعداد تکرارها برابر با ۳ در نظر گرفته شد، برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از آزمایش تجزیه واریانس یک‌طرفه استفاده شد. به‌منظور انجام تحلیل‌های آماری، از نرم‌افزار SPSS<sup>1</sup> بهره‌گیری گردید. معنی‌داری میانگین تیمارها نیز با استفاده از تحلیل چنددامنه‌ای دانکن و در سطح اطمینان ۹۵ درصد مورد بررسی قرار گرفت.

#### ۳- نتایج و بحث

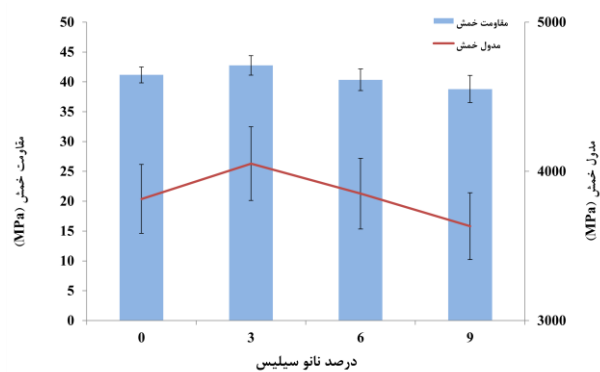
نتایج تجزیه واریانس در جدول ۴ نشان داده شده است. نتایج تجزیه واریانس بیانگر این است که تأثیر نانوسیلیس بر مدول کشش، مقاومت و مدول خمش و مقاومت به ضربه فاق‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار نیست. تنها تأثیر نانوسیلیس بر مقاومت کشش و شاخص اکسیژن محدود در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار است. این نتایج نشان‌دهنده اهمیت نانوسیلیس در بهبود برخی از خواص مکانیکی و حرارتی چندسازه‌ها است، اما در مورد سایر خواص، تأثیر آن به‌طور معناداری مشاهده نشد.

<sup>1</sup> Statistical Package for the Social Sciences

نانوذرات در ماتریس پلیمری و احتمال تجمع آن‌ها که منجر به ایجاد نقاط ضعف در ساختار می‌شود [۲۲].

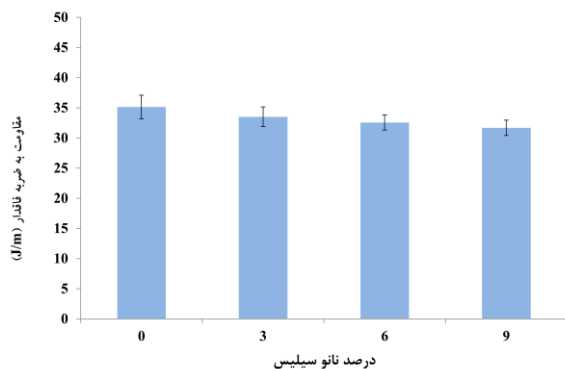
علاوه بر این، بیش‌ترین مدول خمشی نیز در ترکیب حاوی ۳ درصد نانوسیلیس برابر با  $4051/15$  مگاپاسکال و کمترین مقدار آن در ترکیب حاوی ۹ درصد نانوسیلیس برابر با  $3632/44$  مگاپاسکال مشاهده شده است (شکل ۵). این نتایج نشان می‌دهد که افزایش نانوسیلیس تا حد معین می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی کمک کند، اما پس از آن، اثرات منفی ناشی از تجمع نانوذرات و تداخل در پیوندهای بین الیاف چوب و ماتریس پلیمری ممکن است منجر به کاهش این خواص گردد [۲۳].

به‌طورکلی، این یافته‌ها به اهمیت کنترل دقیق مقدار و توزیع نانوسیلیس در ترکیبات کامپوزیتی اشاره دارند تا بتوان به تعادل بهینه‌ای در خواص مکانیکی دست‌یافت.



شکل ۵: تأثیر مستقل نانوسیلیس بر مقاومت خمشی و مدول خمشی

۳-۳- تأثیر مقدار نانوسیلیس بر مقاومت به ضربه فاق‌دار  
بیش‌ترین مقاومت به ضربه فاق‌دار مربوط به ترکیب (۰ درصد نانوسیلیس) برابر  $35/14$  ژول بر متر و کمترین مقدار آن مربوط به ترکیب (۹ درصد نانوسیلیس) برابر  $31/68$  ژول بر متر می‌باشد (شکل ۶).



شکل ۶: تأثیر مستقل نانوسیلیس بر مقاومت به ضربه فاق‌دار

تمرکز تنش ایجاد می‌شود و در نتیجه مقاومت کششی کاهش می‌یابد [۱۵].

همچنین، اگر سطح نانو با ماده زمینه چوب پلاستیک سازگاری نداشته باشد، چسبندگی بین آن‌ها کاهش یافته و این موضوع نیز بر مقاومت کششی تأثیر منفی خواهد داشت [۱۶]. افزودن مقادیر زیاد نانو می‌تواند به ناهمگنی و عدم یکپارچگی در ساختار منجر شود که بر خواص مکانیکی تأثیر می‌گذارد [۱۷].

در مجموع، برای حفظ خواص مکانیکی چوب پلاستیک هنگام افزودن نانوسیلیس، یافتن نسبت مناسب این نانو ضروری است و مطالعات بیشتری در این زمینه نیاز است.

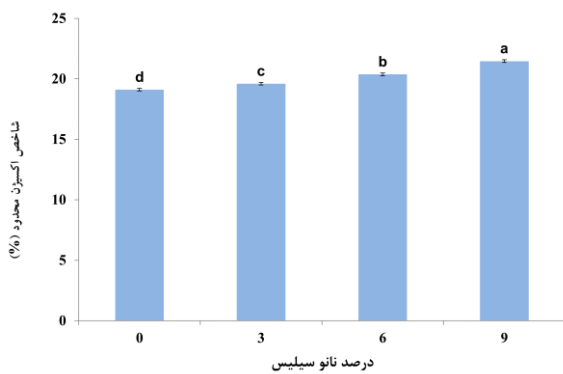
علاوه بر این، افزودن نانوسیلیس به مواد پلیمری می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی این مواد کمک کند. مطالعات نشان داده‌اند که با افزایش درصد نانوسیلیس تا ۳ درصد، مدول کششی و مقاومت کامپوزیت چوب-پلاستیک افزایش می‌یابد [۱۸]. این افزایش به بهبود پیوندهای بین فازی بین ماده زمینه پلیمری و الیاف چوب نسبت داده می‌شود [۱۹].

نانوسیلیس با ایجاد اتصالات قوی‌تر، امکان انتقال مؤثرتر تنش از ماده زمینه به فاز تقویت‌کننده را فراهم می‌کند، اما افزایش بیش از حد نانوسیلیس (بیش از ۳ درصد) می‌تواند منجر به کاهش مدول کششی شود. این کاهش به دلیل تجمع ذرات نانو و ایجاد نقاط تمرکز تنش در ساختار است [۱۹]. نانوسیلیس به علت انرژی سطحی بالا تمایل به تجمع دارند و این موضوع می‌تواند باعث ایجاد پراکنش نامناسب و کلوخه‌ای شدن در بستر چندسازه شود [۲۰].

همچنین، کاهش خاصیت تر کنندگی پلیمر در اثر استفاده از مقادیر بالای نانوسیلیس منجر به اتصال نامناسب الیاف لیگنوسولوزی و ماده زمینه می‌شود [۲۱]. این یافته‌ها اهمیت تنظیم نسبت نانوسیلیس در ترکیب‌های چوب-پلاستیک را برای بهینه‌سازی خواص مکانیکی و عملکرد کلی این چندسازه‌ها مورد تأکید قرار می‌دهند.

### ۳-۲- تأثیر مقدار نانوسیلیس بر مقاومت و مدول خمشی

نتایج نشان می‌دهد که بیش‌ترین مقاومت خمشی مربوط به ترکیب حاوی ۳ درصد نانوسیلیس است که برابر با  $42/75$  مگاپاسکال می‌باشد. در مقابل، کمترین مقدار مقاومت خمشی مربوط به ترکیب حاوی ۹ درصد نانوسیلیس است که برابر با  $38/79$  مگاپاسکال ثبت شده است (شکل ۵). این کاهش در مقاومت خمشی با افزایش درصد نانوسیلیس ممکن است به دلایل مختلفی نسبت داده شود، از جمله توزیع نامناسب



شکل ۷: تأثیر مستقل نانوسیلیس بر شاخص اکسیژن محدود

### ۳-۵- گرماسنجی وزنی

نتایج میزان خاکستر باقیمانده مربوط به آنالیز حرارتی در جدول ۳ مشاهده می‌شود. با افزایش میزان نانوسیلیس میزان خاکستر باقیمانده افزایش یافت. تأثیر درصد نانوسیلیس بر کاهش وزن چندسازه پلی‌پروپیلن ضایعاتی/آرد چوب در سطح ۵۰ درصد در طول زمان گرمادهی (از دمای ۲۵ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد) در جدول ۳ نشان داده شده است. این جدول دمای تخریب در درصدهای مختلف کاهش وزن و وزن باقیمانده در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد برای نانو چندسازه چوب پلاستیک را نشان می‌دهد. افزودن نانوسیلیس نیز تخریب مرحله اول را سرعت می‌بخشد و زغال باقیمانده بیشتری تولید می‌کند. (جدول ۵).

جدول ۵: آنالیز گرمایی کامپوزیت چوب پلاستیک

وزن باقیمانده در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد	%۹۰	%۸۰	%۶۰	%۴۰	%۲۰	%۱۰	%۵	درصد نانوسیلیس کاهش وزن
۷/۶۰	۴۹۸	۴۸۶	۴۷۳	۴۶۱	۳۸۴	۳۰۱	۲۷۴	۰
۹/۶۹	۵۵۸	۴۸۶	۴۷۳	۴۶۰	۳۷۴	۲۹۹	۲۷۳	۳
۱۲/۹۰	+۷۱۴	۴۸۶	۴۷۰	۴۵۶	۳۶۲	۲۹۷	۲۷۲	۶
۱۴/۳۴	+۷۱۴	۴۸۶	۴۶۹	۴۵۳	۳۵۵	۲۹۳	۲۶۸	۹

کرده و مقاومت در برابر اشتعال و پخش حریق را افزایش می‌دهند [۲۵]. در مواجهه با حرارت، سیلیس تجزیه‌شده و لایه‌ای عایق از سیلیکات ایجاد می‌کند که مانع از رسیدن اکسیژن به سطح ماده می‌شود. همچنین، نانوسیلیس با بهبود پیوندهای بین ماده زمینه پلیمری و الیاف چوب، توزیع چوب در ماده زمینه پلیمری را بهبود می‌بخشد و این امر منجر به کاهش مسیرهای احتراق و افزایش مقاومت در برابر آتش‌سوزی می‌شود [۲۶].

در این تحقیق مشاهده شد که با افزایش مقدار نانوسیلیس تا ۹ درصد وزنی، مقاومت به ضربه فاق‌دار چندسازه چوب پلاستیک کاهش می‌یابد. وجود پرکننده‌های سخت معمولاً باعث کاهش استحکام ضربه می‌شود. در پلیمرهای سخت و شکننده، ترک به راحتی رشد می‌کند و نانوذرات به‌عنوان نقاط شروع‌کننده ترک عمل می‌کنند. این کاهش مقاومت به ضربه قابل پیش‌بینی بود، زیرا حضور نانوسیلیس سبب تردتر شدن چندسازه‌ها و در نتیجه کاهش مقاومت به ضربه می‌شود. وجود نانوذرات در ماده زمینه پلیمری قابلیت تحرک زنجیره‌ها را کاهش می‌دهد و نقاط پرتنش را ایجاد می‌کند که می‌تواند محل شکست و ترک باشد [۲۴].

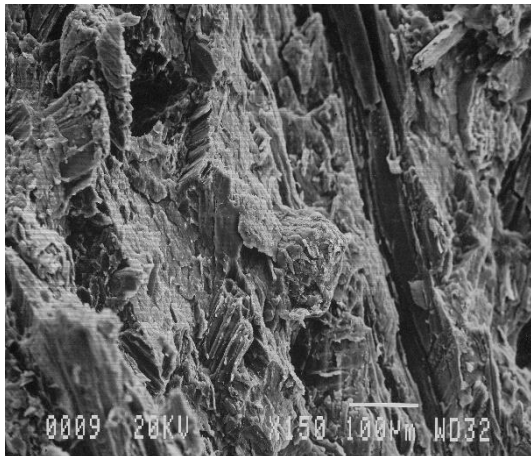
### ۳-۴- تأثیر مقدار نانوسیلیس بر شاخص اکسیژن محدود

تحلیل دانکن، سطوح مختلف مقادیر نانوسیلیس را در چهار گروه مختلف قرار داد (شکل ۷). همان‌طوری که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش مقدار نانوسیلیس تا ۹ درصد وزنی، شاخص اکسیژن محدود افزایش معنی‌داری یافته است. بیش‌ترین شاخص اکسیژن محدود مربوط به استفاده از ۹ درصد وزنی نانوسیلیس برابر ۲۱/۴۷ درصد و کمترین مقدار آن مربوط به استفاده از ۰ درصد وزنی نانوسیلیس برابر ۱۹/۱ درصد می‌باشد.

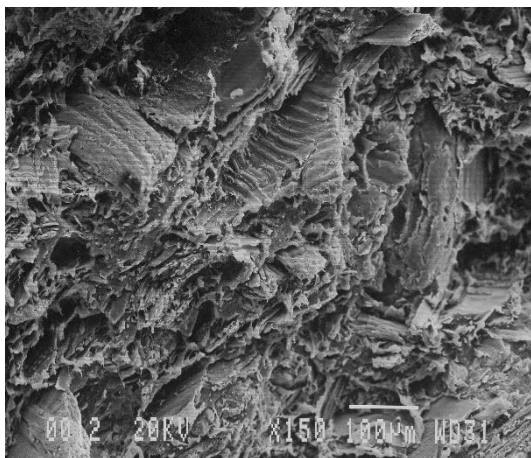
میزان خاکستر باقیمانده در چهار نمونه کامپوزیت هنگام استفاده از ۰ تا ۹ درصد نانوسیلیس به ترتیب برابر است با ۷/۶۰، ۹/۶۹، ۱۲/۹۰ و ۱۴/۳۴ درصد. با افزودن نانوذرات سیلیس به چندسازه‌های چوب-پلاستیک، شاخص اکسیژن محدود افزایش می‌یابد. این افزایش به دلایل مختلفی نسبت داده می‌شود. نانوسیلیس به‌عنوان یک عامل آتش‌بندی عمل

درصد نانوسیلیس، پیوند بسیار خوبی بین ماتریس و الیاف مشاهده می‌شود.

افزایش نانوسیلیس تا ۳ درصد موجب بهبود چسبندگی بین پلیمر و آرد چوب می‌شود و شکست در ذرات آرد چوب هم‌زمان با شکست پلیمر رخ می‌دهد. همچنین، نانوسیلیس از خروج گازهای فرار و آتش‌زا از خلل و فرج جلوگیری کرده و شاخص اکسیژن را افزایش می‌دهد [۲۸].



الف



ب

شکل ۸: تصویر میکروسکوپ الکترونی حاوی ۵۰ درصد آرد چوب و الف (۰٪ نانوسیلیس) و ب (۳٪ نانوسیلیس)

#### ۴- نتیجه‌گیری

این تحقیق به بررسی تأثیر نانوسیلیس بر خواص مکانیکی و حرارتی نانوپندسازه‌های حاصل از آرد چوب کاج و پلی‌پروپیلن ضایعاتی پرداخت. نتایج نشان داد که با افزایش نانوسیلیس تا سطح ۹ درصد، خواص مکانیکی شامل مقاومت کششی، مدول کششی، مقاومت و مدول خمشی و همچنین مقاومت به ضربه فاق‌دار به ترتیب ۱۲/۹۸،

با افزایش درصد نانوسیلیس تا ۹ درصد، این نانوذرات به‌عنوان پرکننده‌های غیرقابل اشتعال عمل کرده و میزان مواد قابل احتراق در ساختار کامپوزیت را کاهش می‌دهند که در نتیجه شاخص اکسیژن محدود افزایش می‌یابد [۲۷]؛ بنابراین، افزودن نانوسیلیس می‌تواند به‌طور مؤثری مقاومت در برابر آتش‌سوزی و شاخص اکسیژن محدود این مواد را بهبود بخشد.

ثبات حرارتی چندسازه‌ها یکی از پارامترهای کلیدی برای فرایندها و کاربردهای این مواد است. تولید برخی از چندسازه‌ها نیازمند اختلاط الیاف و ماده زمینه در دماهای بالا می‌باشد. در این راستا، تخریب حرارتی مواد لیگنوسلولوزی می‌تواند تأثیرات نامطلوبی بر خواص چندسازه‌ها بگذارد. برای بررسی پایداری حرارتی و روند تجزیه ناشی از حرارت، از تجزیه گرماسنجی وزنی به‌عنوان ابزاری مؤثر استفاده می‌شود.

علاوه بر این، در مطالعه‌ای دیگر که توسط هو<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۱ انجام شد، مشاهده شد که با افزودن ۳ درصد وزنی نانوسیلیس به کامپوزیت پلی‌پروپیلن/چوب، دمای شروع تجزیه از ۳۶۳ به ۳۷۷ درجه‌سانتی‌گراد افزایش یافت. این بهبود در پایداری حرارتی به‌دلیل توزیع مناسب نانوذرات در ماده زمینه پلیمری و تشکیل لایه محافظ سیلیکاتی بر روی سطح ذرات چوب گزارش شده است [۲۷].

به‌طور کلی، نتایج مطالعات نشان می‌دهد که افزودن نانوسیلیس به چندسازه‌های چوب-پلاستیک می‌تواند موجب بهبود قابل‌توجهی در پایداری حرارتی و به تأخیر انداختن تجزیه حرارتی این مواد شود.

#### ۳-۶- میکروسکوپ الکترونی پوشی

با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی پوشی، توزیع و سازگاری آرد چوب و ماتریس در نمونه‌های نانوپندسازه حاوی ۵۰ درصد آرد چوب و ۰ و ۳ درصد نانوسیلیس بررسی شده است. شکل ۸ (الف و ب) سطوح شکست این نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در نمونه با ۰ درصد نانوسیلیس، ذرات آرد چوب به‌طور سالم از پلیمر خارج می‌شوند و فواصل و شکاف‌هایی اطراف آن‌ها وجود دارد که نشان‌دهنده برهم‌کنش ضعیف بین آرد و پلیمر است. این فضاهای خالی دلالت بر اتصال ضعیف دارد.

با افزایش نانوسیلیس به ۳ درصد، سازگاری بهبودیافته و منافذ و فضاهای خالی کاهش می‌یابد. در این حالت، پیوند و چسبندگی بین الیاف و ماتریس بهتر و یکنواخت‌تر می‌شود. همچنین، در سطح ۳

<sup>۱</sup> Hu

## ۵- منابع

- [1] D. J. Gardner, Y. Han, and L. Wang, "Wood-plastic composite technology," *Current Forestry Reports*, vol. 1, no. 3, pp. 139–150, 2015, doi: [10.1007/s40725-015-0016-6](https://doi.org/10.1007/s40725-015-0016-6).
- [2] A. Babazadeh, M. Hadad, and M. Safarabadi, "Investigation of the effect of graphene nanoplatelets and carbon nanotubes on improving the mechanical properties of aluminum matrix nanocomposites," *Journal of Science and Technology of Composites*, vol. 7, no. 4, pp. 1197–1206, 2021 (in Persian).
- [3] A. Montazeri and M. Safarabadi, "A comparative study on adding chopped kenaf fibers to the core of glass/epoxy laminates under quasi-static indentation: Experimental and numerical approaches," *Journal of Composite Materials*, vol. 56, no. 25, pp. 3821–3833, 2022, doi: [10.1177/00219983221112861](https://doi.org/10.1177/00219983221112861).
- [4] M. Farsi, "Effect of nano-SiO<sub>2</sub> and bark flour content on the physical and mechanical properties of wood-plastic composites," *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 25, no. 2, pp. 308–314, 2017, doi: [10.1007/s10924-016-0797-9](https://doi.org/10.1007/s10924-016-0797-9).
- [5] P. Jagadeesh, M. Puttegowda, S. M. Rangappa, and S. Siengchin, "Influence of nanofillers on biodegradable composites: A comprehensive review," *Polymer Composites*, vol. 42, no. 11, pp. 5691–5711, 2021, doi: [10.1002/pc.26235](https://doi.org/10.1002/pc.26235).
- [6] B. K. Deka, P. Baishya, and T. K. Maji, "Synergistic effect of SiO<sub>2</sub>, ZnO and nanoclay on mechanical and thermal properties of wood polymer nanocomposite," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 27, no. 4, pp. 464–480, 2014, doi: [10.1177/0892705712444693](https://doi.org/10.1177/0892705712444693).
- [7] J. J. Chruściel and E. Leśniak, "Modification of epoxy resins with functional silanes, polysiloxanes, silsesquioxanes, silica and silicates," *Progress in Polymer Science*, vol. 41, pp. 67–121, 2015, doi: [10.1016/j.progpolymsci.2014.10.001](https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2014.10.001).
- [8] M. Hadad, A. Babazadeh, and M. Safarabadi, "Investigation and comparison of the effect of graphene nanoplatelets and carbon nanotubes on improving mechanical properties in the stir casting process of aluminum matrix nanocomposites," *The*
- ۵/۱۶، ۶/۱، ۵/۰۲ و ۱۰/۹۲ درصد کاهش یافته است. این کاهش می‌تواند به دلایل مختلفی از جمله توزیع نامناسب نانوذرات در ماده زمینه و تجمع آن‌ها نسبت داده شود که منجر به ایجاد نقاط تمرکز تنش و ضعف در ساختار کامپوزیت می‌شود.
- از سوی دیگر، با افزایش نانوسیلیس تا سطح ۹ درصد، شاخص اکسیژن محدود به میزان ۱۲/۴ درصد افزایش یافت. این افزایش نشان‌دهنده بهبود مقاومت در برابر اشتعال و پخش حریق است. نانوسیلیس با ایجاد لایه‌های عایق و بهبود پیوندهای بین ماده زمینه پلیمری و الیاف چوب، مسیرهای احتراق را کاهش داده و به‌طور مؤثری خواص آتش‌سوزی کامپوزیت را بهبود می‌بخشد.
- علاوه بر این، نتایج نشان داد که با افزایش میزان نانوسیلیس، میزان خاکستر باقیمانده و ثبات حرارتی نیز افزایش یافته است. این بهبود در پایداری حرارتی به دلیل تشکیل لایه‌های سیلیکاتی محافظ بر روی سطح ذرات چوب و تأخیر در تجزیه پلیمر نسبت داده می‌شود. این ویژگی‌ها می‌توانند به افزایش عمر مفید و قابلیت استفاده از این نانوجنس‌سازها در کاربردهای صنعتی کمک کنند.
- در مجموع، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که درحالی‌که افزودن نانوسیلیس می‌تواند منجر به کاهش برخی خواص مکانیکی گردد، اما در عوض، بهبود در مقاومت در برابر آتش و افزایش ثبات حرارتی را به همراه دارد؛ بنابراین، برای دستیابی به تعادل بهینه بین خواص مکانیکی و حرارتی، نیاز به مدیریت دقیق مقدار نانوسیلیس و توزیع آن در ماده زمینه پلیمری وجود دارد.
- این یافته‌ها می‌تواند به توسعه مواد جدید با عملکرد بهینه و پایدار در صنایع مختلف کمک کند.
- ریزساختار چندسازه‌ها بر روی سطوح شکست با میکروسکوپ الکترونی بررسی شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که نانوسیلیس تأثیر مثبتی بر اتصال بین الیاف سلولزی و ماتریس پلیمری دارد. فضاهای خالی در تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان‌دهنده اتصالات ضعیف بین این دو فاز است و با افزایش نانوسیلیس، این اتصالات بهبود یافته و یکنواخت‌تر می‌شوند. همچنین، افزایش شاخص اکسیژن محدود در نمونه‌ها حاکی از عملکرد نانوسیلیس به‌عنوان مانع در برابر نفوذ گازهاست. در نمونه‌های حاوی ۳ درصد نانوسیلیس، فضاهای خالی کمتری مشاهده شد که نشان‌دهنده اتصال خوب الیاف با ماتریس و جلوگیری از جدایی آن‌ها در زمان شکست است.

- [16] S. Kalia *et al.*, "Cellulose-based bio- and nanocomposites: A review," *International Journal of Polymer Science*, vol. 2011, Art. no. 837875, 2011, doi: [10.1155/2011/837875](https://doi.org/10.1155/2011/837875).
- [17] Z. Liu *et al.*, "Modification of glass fiber surface and glass fiber reinforced polymer composites: Challenges and opportunities from an organic chemistry perspective," *Current Organic Chemistry*, vol. 19, no. 11, pp. 991–1010, 2015, doi: [10.2174/1385272819666150325231544](https://doi.org/10.2174/1385272819666150325231544).
- [18] B. K. Deka, M. Mandal, and T. K. Maji, "Effect of nanoparticles on flammability, UV resistance, biodegradability, and chemical resistance of wood polymer nanocomposite," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 51, no. 37, pp. 11881–11891, 2012, doi: [10.1021/ie3003123](https://doi.org/10.1021/ie3003123).
- [19] S. R. Mousavi *et al.*, "Mechanical properties of bamboo fiber-reinforced polymer composites: A review of recent case studies," *Journal of Materials Science*, vol. 57, no. 5, pp. 3143–3167, 2022, doi: [10.1007/s10853-021-06854-6](https://doi.org/10.1007/s10853-021-06854-6).
- [20] O. Faruk, A. K. Bledzki, H. P. Fink, and M. Sain, "Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010," *Progress in Polymer Science*, 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).
- [21] B. K. Deka, M. Mandal, and T. K. Maji, "Plant fibre reinforced polymer blend/clay nanocomposite," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 31, no. 10, pp. 657–669, 2012, doi: [10.1177/0731684412441835](https://doi.org/10.1177/0731684412441835).
- [22] I. Alameri and M. Oltulu, "Mechanical properties of polymer composites reinforced by silica-based materials of various sizes," *Applied Nanoscience*, vol. 10, no. 11, pp. 4087–4102, 2020, doi: [10.1007/s13204-020-01530-8](https://doi.org/10.1007/s13204-020-01530-8).
- [23] M. Farsi, "Effect of nano-SiO<sub>2</sub> and bark flour content on the physical and mechanical properties of wood-plastic composites," *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 25, no. 2, pp. 308–314, 2017, doi: [10.1007/s10924-016-0797-9](https://doi.org/10.1007/s10924-016-0797-9).
- [24] R. Kumar, A. Ganguly, and R. Purohit, "Properties and applications of bamboo and bamboo fibre composites," *Materials Today: International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 109, no. 9, pp. 2535–2547, 2020, doi: [10.1007/s00170-020-05829-7](https://doi.org/10.1007/s00170-020-05829-7).
- [9] R. Jeziorska, M. Zielecka, A. Szadkowska, M. Wenda, and L. Tokarz, "Wood-filled high-density polyethylene composites with nanosilica containing immobilized nanosilver," *Polimery*, vol. 57, 2012.
- [10] J. Ebrahimpour-Kasmani and A. Samariha, "Studying the effect of three times recycling on the thermal and mechanical properties of composites made from ash wood flour and recycled polyethylene for packaging purposes," *Science and Technology in Mechanical Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 93–105, 2025 (in Persian), doi: [10.22034/stme.2025.513808.1113](https://doi.org/10.22034/stme.2025.513808.1113).
- [11] Z. Ullah, "A survey on hybrid, energy efficient and distributed (HEED) based energy efficient clustering protocols for wireless sensor networks," *Wireless Personal Communications*, vol. 112, no. 4, pp. 2685–2713, 2020, doi: [10.1007/s11277-020-07147-4](https://doi.org/10.1007/s11277-020-07147-4).
- [12] A. Lashghari and E. Ganjavi, "Investigating the effect of pressing temperature on the thermal, mechanical, and morphological properties of nanocomposites made from recycled polyethylene, nanosilica, and wood flour," *BioResources*, vol. 16, no. 2, 2021.
- [13] B. Bazyar and A. Samariha, "Thermal, flammability, and morphological properties of nanocomposites from fir wood flour and polypropylene," *BioResources*, vol. 12, no. 3, 2017.
- [14] M. Ghorbani, P. Biparva, and S. Hosseinzadeh, "Effect of colloidal silica nanoparticles extracted from agricultural waste on physical, mechanical and antifungal properties of wood polymer composite," *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 76, no. 2, pp. 749–757, 2018, doi: [10.1007/s00107-017-1254-6](https://doi.org/10.1007/s00107-017-1254-6).
- [15] S. Sheykhnazari, T. Tabarsa, A. Ashori, and A. Ghanbari, "Bacterial cellulose composites loaded with SiO<sub>2</sub> nanoparticles: Dynamic-mechanical and thermal properties," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 93, pp. 672–677, 2016, doi: [10.1016/j.ijbiomac.2016.09.012](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.09.012).

[27] L. Liu *et al.*, “Fabrication of green lignin-based flame retardants for enhancing the thermal and fire retardancy properties of polypropylene/wood composites,” *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 4, no. 4, pp. 2422–2431, 2016, doi: [10.1021/acssuschemeng.6b00112](https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b00112).

[28] S. S. Ray and M. Okamoto, “Polymer/layered silicate nanocomposites: A review from preparation to processing,” *Progress in Polymer Science*, vol. 28, no. 11, pp. 1539–1641, 2003, doi: [10.1016/j.progpolymsci.2003.08.002](https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2003.08.002).

*Proceedings*, 2023, doi: [10.1016/j.matpr.2023.02.189](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.189).

[25] M. Kiaei, H. Amiri, A. Samariha, and N. Amani, “Effect of nanosilica on thermal, flammability, and morphological properties of WF/RPS-based nanocomposites,” *Cerme*, vol. 24, no. 1, pp. 59–66, 2018, doi: [10.1590/01047760201824012502](https://doi.org/10.1590/01047760201824012502).

[26] S. M. Rangappa, J. Parameswaranpillai, M. H. Kumar, and S. Siengchin, *Wood Polymer Composites*. Singapore: Springer, 2021, doi: [10.1007/978-981-16-1606-8](https://doi.org/10.1007/978-981-16-1606-8).