Research Article

Iranian Journal of Wood and Paper Industries
Vol. 16, No. 2, Page 139 - 151 (2025)

DOI: 10.22034/ijwp.2025.2051616.1698

Studying the effect of nanoclay on the mechanical, thermal and fire properties of composites made from ash wood flour and waste polypropylene

Jafar Ebrahimpour Kasmani[1*], Ahmad Samariha[2]

1- Corresponding author, Department of Wood and Paper, Sava.C., Islamic Azad University, Savadkooh, Iran. Email: kasmani@iau.ac.ir
2- Department of Engineering Sciences, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

Received: March 2025 Accepted: June 2025

Abstract

Problem definition and objectives: Given the importance of environmental issues and the need to use sustainable materials, the production of composite materials from natural substances and polymers has become a key topic in industrial research. Ash wood flour, as a natural resource with suitable mechanical properties, and polypropylene, as a widely used polymer, can effectively contribute to the creation of high-quality composites. However, one of the main challenges in this field is improving the mechanical, thermal, and flame-retardant properties of these composites. Nanoclay, as a reinforcing agent, can be effective in this regard, but further research is needed to understand its effects on various properties of the composites. The primary objective of this study is to investigate the impact of nanoclay on the mechanical, thermal, and flame-retardant properties of composites made from ash wood flour and waste polypropylene.

Methodology: To this end, polypropylene (at a fixed level of 50%), ash wood flour (at a fixed level of 50%), nanoclay (at four levels of 0, 2, 4, and 6 weight percent), and maleic anhydride grafted polypropylene at a fixed level of 3% were mixed together using a twin-screw extruder. Standard test samples were then produced using the injection molding method. Subsequently, mechanical properties, including tensile and flexural strength, tensile and flexural modulus, and impact resistance, as well as thermal and flame-retardant properties, were measured.

Results: The results indicated that the addition of nanoclay to the composite made from ash wood flour and waste polypropylene leads to improvements in mechanical, thermal, and flame-retardant properties, which can have diverse applications in various industries. Increasing the nanoclay content to 2% resulted in increases in tensile strength, tensile modulus, and flexural modulus of 7.9%, 6.3%, and 4.6%, respectively. An increase in nanoclay to 4% led to a 5.6% increase in flexural strength. However, raising the nanoclay content to 6% resulted in a 20.5% decrease in impact resistance and a 4.7% increase in the oxygen index. Additionally, thermal stability increased with the addition of nanoclay up to 6%, and a greater amount of char was retained.

Conclusion: The addition of nanoclay to the composite significantly enhances its tensile and flexural strength and modulus. This improvement results from the uniform distribution of nanoclay within the matrix and the strong bonding created between the nanoclay and the polymer matrix. Furthermore, nanoclay enhances the thermal resistance of the composite due to its layered

structure, which improves heat transfer pathways. In terms of flame retardancy, nanoclay reduces the rate of combustion, as it forms a protective silicate layer during combustion that prevents the release of gases and flammable materials. Overall, incorporating nanoclay into composites made from ash wood flour and waste polypropylene leads to improved mechanical, thermal, and flame-retardant properties, which can provide diverse applications in various industries.

Keywords: Ash Wood Flour, Nanoclay, Tensile Strength, Tensile Modulus, Limiting Oxygen Index.

اثر نانو رس بر ویژگی‌های مکانیکی، حرارتی و آتش‌گیری کامپوزیت‌های ترکیبی آرد چوب زبان گنجشک و ضایعات پلی‌پروپیلن

جعفر ابراهیم پور کاسمانی[1*]، احمد ثمریها[2]

۱- نویسنده مسئول، گروه چوب و کاغذ، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران. پست الکترونیک: kasmani@iau.ac.ir
۲- گروه علوم مهندسی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

تاریخ دریافت: فروردین ۱۴۰۴ تاریخ پذیرش: خرداد ۱۴۰۴

چکیده

بیان مساله و اهداف: با توجه به اهمیت مسائل زیست‌محیطی و نیاز به استفاده از مواد پایدار، تولید کامپوزیت‌های ترکیبی از مواد طبیعی و پلیمرها به موضوعی کلیدی در تحقیقات صنعتی تبدیل شده است. آرد چوب زبان گنجشک به عنوان یک منبع طبیعی با خواص مکانیکی مناسب و پلی‌پروپیلن به عنوان یک پلیمر پرکاربرد، می‌توانند در ایجاد کامپوزیت‌های با کیفیت موثر باشند. اما یکی از چالش‌های اصلی در این زمینه، بهبود خواص مکانیکی، حرارتی و آتش‌گیری این کامپوزیت‌هاست. نانو رس به عنوان یک تقویت‌کننده می‌تواند در این راستا مؤثر باشد، اما نیاز به تحقیقات بیشتری پیرامون تأثیرات آن بر ویژگی‌های مختلف کامپوزیت‌ها احساس می‌شود. هدف اصلی این پژوهش، بررسی تأثیر نانو رس بر خواص مکانیکی، حرارتی و آتش‌گیری کامپوزیت‌های حاصل از آرد چوب زبان گنجشک و ضایعات پلی‌پروپیلن است.

مواد و روشها: برای این منظور پلی‌پروپیلن (در سطح ثابت ۵۰ درصد)، آرد چوب زبان گنجشک (در سطح ثابت ۵۰ درصد)، نانو رس (در چهار سطح ۰، ۲، ۴ و ۶ درصد وزنی) و انیدرید مالئیک پیوند داده‌شده با پلی‌پروپیلن در سطح ثابت ۳ درصد، به‌وسیله اکسترودر دو ماردونی (دو مارپیچه) با یکدیگر مخلوط و نمونه‌های آزمونی استاندارد با استفاده از روش قالب‌گیری تزریقی ساخته شدند. سپس خواص مکانیکی شامل مقاومت کششی و خمشی، مدول کششی و خمشی، مقاومت به ضربه فاق‌دار، و خواص حرارتی، آتشگیری اندازه‌گیری شدند.

نتایج: نتایج نشان داد افزودن نانو رس به کامپوزیت حاصل از آرد چوب زبان گنجشک و پلی‌پروپیلن ضایعاتی تا حدی منجر به بهبود در خواص مکانیکی، حرارتی و آتش‌گیری کامپوزیت می‌شود که می‌تواند کاربردهای متنوعی در صنایع مختلف داشته باشد. افزایش نانو رس تا سطح ۲ درصد باعث افزایش مقاومت و مدول کششی و مدول خمشی به ترتیب برابر ۷/۹، ۳/۶ و ۶/۴ شد. افزایش نانو رس تا سطح ۴ درصد باعث افزایش ۵/۶ درصدی مقاومت خمشی شد. افزایش نانو رس تا سطح ۶ درصد باعث کاهش ۲۰/۵ درصدی مقاومت به ضربه فاق‌دار و افزایش ۴/۷ درصدی شاخص اکسیژن محدود شد. با افزایش نانو رس تا ۶ درصد ثبات حرارتی افزایش می‌یابد و میزان زغال بیشتری نیز باقی می‌ماند.

نتیجه‌گیری: افزودن نانو رس به کامپوزیت موجب افزایش قابل توجهی در مقاومت و مدول کششی و خمشی آن می‌شود. این بهبود ناشی از توزیع یکنواخت نانو رس در ماتریس و ایجاد پیوند قوی بین نانو رس و ماتریس پلیمری است. همچنین، نانو رس باعث ارتقای مقاومت حرارتی کامپوزیت می‌گردد؛ زیرا ساختار لایه‌ای آن مسیر انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد. در حوزه آتش‌گیری، نانو رس موجب کاهش سرعت احتراق می‌شود که این امر به تشکیل لایه محافظ سیلیکاتی در زمان احتراق مربوط می‌شود و از انتشار گازها و مواد سوختنی جلوگیری می‌کند. در مجموع، افزودن نانو رس به کامپوزیت‌های حاصل از آرد چوب زبان گنجشک و ضایعات پلی‌پروپیلن، به بهبود خواص مکانیکی، حرارتی و آتش‌گیری منجر می‌شود و این ویژگی‌ها می‌تواند کاربردهای متنوعی در صنایع مختلف فراهم آورد.

واژه های کلیدی: آرد چوب زبان گنجشک، نانو رس، مقاومت کششی، مدول کششی، شاخص اکسیژن محدود.

مقدمه

مواد پلاستیکی پتروشیمی در صنایع مختلف مانند بسته‌بندی و خودروسازی استفاده می‌شوند. این پلیمرها به‌سختی تخریب می‌شوند و زباله‌های آن‌ها با بازیافت مجدداً قابل استفاده هستند [۱]. استفاده از نانو مواد بهبوددهنده خواص کامپوزیت¬هاست و امکان تولید محصولات جدید با ارزش افزوده بالا و کارایی بیشتر را فراهم می‌کند [۲]. نانو مواد، به دلیل اندازه کوچک و ویژگی‌های منحصر به فرد خود، توانسته‌اند به عنوان تقویت‌کننده‌ای مؤثر در کامپوزیت‌ها عمل کنند. نانو رس، یکی از این نانو مواد، به دلیل قابلیت‌های فیزیکی و شیمیایی خود، به ویژه در بهبود خواص مکانیکی و حرارتی، توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است[۳].

کامپوزیت‌ها به عنوان ترکیبی از دو یا چند ماده با خواص متفاوت، به منظور بهبود کارایی و عملکرد، شناخته می‌شوند. یکی از ترکیبات نوین که به ویژه در صنایع ساختمانی و بسته‌بندی مورد توجه قرار گرفته، کامپوزیت‌های ترکیبی آرد چوب و پلی‌پروپیلن است. آرد چوب زبان گنجشک به عنوان یک منبع طبیعی و تجدیدپذیر، ویژگی‌های مکانیکی و زیبایی‌شناختی مناسبی را ارائه می‌دهد. این نوع آرد چوب نه تنها از نظر وزن سبک است، بلکه دارای استحکام بالا و قابلیت شکل‌پذیری خوبی نیز می‌باشد[۴].

پلی‌پروپیلن، به عنوان یک پلیمر گرمانرم، به دلیل خواص شیمیایی و فیزیکی خود، یکی از پرکاربردترین مواد در صنایع مختلف است. این ماده دارای مقاومت بالا در برابر مواد شیمیایی، وزن سبک و قابلیت بازیافت است. با این حال، یکی از چالش‌های اصلی در استفاده از پلی‌پروپیلن، بهبود خواص مکانیکی و حرارتی آن است. در این زمینه، افزودن نانو رس به ترکیب آرد چوب و پلی‌پروپیلن می‌تواند به عنوان یک راهکار مؤثر شناخته شود[۵].

نانو رس به دلیل ساختار لایه‌ای خود، می‌تواند به‌طور یکنواخت در ماتریس پلی‌پروپیلن توزیع شود. این توزیع یکنواخت باعث می‌شود که نانو رس به‌عنوان یک مانع در برابر انتقال حرارت و شعله عمل کرده و در نتیجه خواص آتش‌گیری کامپوزیت را بهبود بخشد. تحقیقات نشان داده‌اند که نانو رس می‌تواند باعث افزایش استحکام کششی، مدول الاستیسیته و همچنین مقاومت در برابر حرارت و آتش کامپوزیت‌ها شود [۶].

به‌علاوه، نانو رس به دلیل ویژگی‌های خاص خود، می‌تواند به کاهش نفوذپذیری آب و دیگر مایعات در کامپوزیت‌ها کمک کند. این ویژگی به‌ویژه در کاربردهای ساختمانی و بسته‌بندی اهمیت دارد، زیرا نفوذ آب می‌تواند منجر به کاهش عمر مفید مواد شود [۱].

بررسی خواص حرارتی کامپوزیت‌های پلی‌پروپیلن و آرد چوب در حضور نانو رس نیز موضوعی است که نیازمند توجه بیشتری است. نانو رس نه تنها به بهبود خواص حرارتی کمک می‌کند، بلکه می‌تواند در کاهش واکنش‌های حرارتی ناخواسته نیز موثر باشد. به عبارت دیگر، با افزودن نانو رس، می‌توان دمای شکست حرارتی کامپوزیت‌ها را افزایش داد و در نتیجه، عملکرد آن‌ها را در دماهای بالا بهبود بخشید [۷].

از دیگر جنبه‌های مورد بررسی، تأثیر نانو رس بر خواص آتش‌گیری کامپوزیت‌های ترکیبی آرد چوب و پلی‌پروپیلن است. با توجه به افزایش نگرانی‌ها در مورد ایمنی محصولات، به‌ویژه در کاربردهای ساختمانی، بهبود خواص آتش‌گیری کامپوزیت‌ها به یکی از اولویت‌های پژوهشی تبدیل شده است. نانو رس می‌تواند با ایجاد یک لایه محافظ در سطح کامپوزیت، از شعله‌ور شدن و انتشار آتش جلوگیری کند [۸].

هدف از این مقاله بررسی اثر نانو رس بر ویژگی‌های مکانیکی، حرارتی و آتش‌گیری کامپوزیت‌های ترکیبی آرد چوب زبان گنجشک و ضایعات پلی‌پروپیلن است. با انجام این تحقیق، امکان دستیابی به مواد کامپوزیتی با عملکرد بالاتر و سازگار با محیط زیست فراهم می‌شود. همچنین، نتایج این پژوهش می‌تواند به توسعه فناوری‌های نوین در صنایع مختلف کمک کند و به بهبود کارایی و ایمنی محصولات منجر شود.

مواد و روش‌ها

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 تهیه و با استفاده از یک اکسترودر دو مارپیچه، تحت دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه

ذوب و گرانول شد. آرد زبان گنجشک به عنوان تقویت‌کننده پودری در ماتریس پلیمری مورد استفاده قرار گرفت. آرد از یک شرکت تولیدکننده مبلمان تأمین و پس از طبقه‌بندی با دستگاه الک ارتعاشی، آرد عبور کرده از الک با مش 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 (MAPP) به عنوان عامل سازگارکننده با خلوص ۹۸ درصد مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات پلی‌پروپیلن پیوند خورده با مالئیک انیدرید در جدول ۱ خلاصه شده است. نانو رس مورد استفاده از شرکت Sigma-Aldrich تهیه شد. مشخصات نانو رس در جدول ۲ خلاصه شده است.

روش‌ها

درصد وزنی اجزای کامپوزیت‌های ساخته‌شده با ذکر علامت اختصاری به‌کاررفته برای هر تیمار در جدول ۳ آورده شده است. اختلاط پلی‌پروپیلن ضایعاتی، آرد چوب، نانو رس و سازگار کننده به‌صورت نسبت وزنی مشخص توسط دستگاه اکسترودر دو ماردونی (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.

ساخت نمونه‌های آزمونی استاندارد

به‌منظور ساخت نمونه‌های آزمونی استاندارد، گرانول‌ها به دستگاه قالب‌گیر تزریقی[1] تزریق می‌گردد. برای این‌کار از دستگاه تزریق نیمه صنعتی ساخت شرکت ایمن ماشین تهران موجود در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران استفاده شد. دمای سیلندر تزریق در هر سه ناحیه به‌ترتیب ۱۶۰، ۱۵۵ و ۱۴۵ درجه سانتی‌گراد، دمای قالب ^{o}C۴۰. فشار تزریق ۸۰ مگاپاسکال و زمان دوره تزریق کمتر از ۲۰ ثانیه در نظر گرفته شد. عملیات خنک‌کردن قالب با آب سرد انجام شد و نمونه‌ها جهت آزمون‌های کشش، خمش و ضربه پس از ۲ دقیقه از قالب بیرون آورده شدند.

جدول ۱- مشخصات پلی‌پروپیلن پیوند خورده با مالئیک انیدرید

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

جدول ۲- مشخصات نانو رس K10

Properties	K10
Organic Modifier	MT2EtOH[2]
Base	Montmorillonite
Density	300-370 kg/m^3
Anion	Chloride
Modifier Concentration	48 meq/100 g
Moisture	1-2%
Weight Loss on Ignition	30%

According to Producer Information

1. Injection Molding
2 methyl, tallow, bis-2-hydroxyethyl, quaternary ammonium

جدول ۳- درصد اجزای کامپوزیت در تیمارهای مختلف

شماره تیمار	آرد چوب (phc)	پلی‌پروپیلن (phc)	نانو رس (phc)
۱	۵۰	۵۰	۰
۲	۵۰	۵۰	۲
۳	۵۰	۵۰	۴
۴	۵۰	۵۰	۶

phc: per hundred compounds

اندازه‌گیری خواص فیزیکی، مکانیکی و حرارتی

خواص مکانیکی شامل مقاومت خمشی، مدول خمشی، مقاومت به ضربه و مقاومت کششی و خواص آمیزه شامل آزمون‌های گرماسنجی روبشی تفاضلی نانوکامپوزیت‌های تهیه شده آزمون گردید. قبل از اینکه نمونه‌های استاندارد تهیه شده برای انجام آزمون مکانیکی استفاده گردند، به مدت دو روز در دمای ۲۳ درجه سانتی گراد و رطوبت ۵۰ درصد قرار داده شدند تا با دمای محیط به تعادل برسند. برای ارزیابی خواص مکانیکی، مقاومت خمشی، مدول خمشی، مقاومت به ضربه و مقاومت کششی نمونه‌ها اندازه گیری شد. به منظور بررسی آزمون خمش نمونه‌ها از آیین نامه D-747 استاندارد ASTM و با سرعت بارگذاری ۲ mm/min استفاده شد. از دستگاه اینسترون مدل ۱۱۸۶ برای اعمال آزمون استفاده گردید. برای بررسی استحکام کششی نمونه‌ها از آیین نامه D-638-M-89 استاندارد ASTM استفاده گردید. نمونه‌ها به صورت M-I و دمبلی تهیه گردیدند. سپس از دستگاه اینسترون مدل ۱۱۸۶ برای اعمال آزمون کشش استفاده شد. جهت بررسی و آزمون ضربه فاق‌دار آیزود روی نمونه‌ها از آیین نامه D-256 استاندارد ASTM بهره‌گیری شد. برای این منظور دستگاه آزمایشگر مقاومت به ضربه مدل Zwick انتخاب گردید. برای انجام گرماسنجی روبشی تفاضلی، نمونه‌هایی با وزن بین ۵ تا ۷ میلی‌گرم تهیه و در دستگاه TGA[۳] (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 انجام گرفت.

تجزیه و تحلیل نتایج

در این بررسی سطوح متفاوت نانو رس در چهار سطح (۰، ۲، ۴ و ۶ درصد). تعداد تکرارها برای هر تیمار برابر ۳ تکرار مدنظر قرار گرفت. بنابراین تعداد تیمارها برابر ۴ بود که شامل ۴ سطح نانو رس بود. از آزمایش تجزیه واریانس یک‌طرفه استفاده گردید. به منظور انجام تجزیه و تحلیل‌های آماری از نرم افزار SPSS استفاده شد. معنی‌داری میانگین تیمارها نیز بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن و در سطح احتمال ۵ درصد مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

شاخص جریان مذاب به‌نوعی میزان سیالیت پلیمر را نشان می‌دهد و تغییر آن نشان‌دهنده بروز تغییرات در ساختار پلیمر است. نتایج نشان داد، شاخص جریان مذاب پلی‌پروپیلن بعد از دو بار بازیافت، از g/10min ۱۸ برای پلیمر بکر به ترتیب به ۲۱/۷۵، و g/10min افزایش یافت. نتایج آزمون تجزیه واریانس در جدول ۴ نشان داده شده است.

[۳] Thermal Gravimetric Analysis

جدول ۴- تجزیه واریانس (مقدار F و سطح معنی‌داری) اثر متغیرهای ساخت بر خواص مقاومتی

خواص مقاومتی	مقدار F و سطح معنی‌داری
مقاومت کششی	*۱۲/۲۷۱
مدول کششی	*۱۰/۴۷۳
مقاومت خمشی	*۱۷/۶۵۴
مدول خمشی	*۱۹/۴۴۹
مقاومت به ضربه فاق‌دار	*۳۲/۰۲
شاخص اکسیژن محدود	*۷۰/۷۶۹

تأثیر مقدار نانو رس بر مقاومت و مدول کششی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر مقدار نانو رس بر مقاومت و مدول کششی در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار است. همان‌طوری‌که در شکل ۱ (الف و ب) مشاهده می‌شود با افزایش مقدار نانو رس، مقاومت و مدول کششی تا سطح ۲ درصد ابتدا افزایش و سپس کاهش معنی‌داری می‌یابد. بیش‌ترین مقاومت کششی مربوط به ترکیب (۲ درصد نانو رس) برابر ۳۱/۲۹ مگاپاسکال و کمترین مقدار آن مربوط به ترکیب (۶ درصد نانو رس) برابر ۲۶/۵۳ مگاپاسکال می‌باشد. بیش‌ترین مدول کششی مربوط به ترکیب (۴ درصد نانو رس) برابر ۳۴۱۸/۷۴ مگاپاسکال و کمترین مقدار آن مربوط به ترکیب (۶ درصد نانو رس) برابر ۳۰۳۹/۶۸ مگاپاسکال می‌باشد.

از آنجاییکه تأثیر نانو ذرات بر روی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های پلیمری به عواملی چون اندازه، شکل، نوع، ضریب ظاهری، ساختار بلوری، مقدار، مقدار پراکنش و کیفیت ذرات نانو رس و نحوه اتصال آن‌ها با پلیمر بستگی دارد [۹]. می‌توان افزایش در مقدار مقاومت کششی کامپوزیت را در هنگام استفاده از ۲ درصد وزنی نانو رس به ضریب ظاهری بالای ذرات نانو رس نسبت داد. ضریب ظاهری بالای نانو رس موجب می‌شود سطح مشترک دو فاز افزایش یابد. افزایش مقدار نانو رس و وجود مورفولوژی بین‌لایه‌ای در نانوکامپوزیت به‌دلیل تأثیر بین سطحی زنجیره‌های آلی و ذرات نانو رس و نیز جهت‌یافتگی ذرات سیلیکات لایه‌ای موجب افزایش مقاومت در نانوکامپوزیت می‌گردد [۹]. همچنین غیرهمگونی و نسبت بالای سطح به حجم نانو رس با مواد آلی در قابلیت تقویت‌کنندگی بالای ذرات نانو رس سهیم است، و به این صورت عمل می‌شود که ذرات نانو رس به‌عنوان تقویت‌کننده موجب می‌شود سطح مشترک بین دو فاز افزایش پیدا کند [۱۰]. از طرفی با افزودن رس در نتیجه تورم لایه‌های رس و ایجاد چسبندگی سطحی قوی بین پلیمر و رس، مقاومت کامپوزیت افزایش می‌یابد [۱۱]. به‌همین دلیل، نتایج نشان می‌دهد با افزایش مقدار نانو رس تا سطح ۲ درصد وزنی مقاومت کششی کامپوزیت افزایش‌یافته است که با نتایج به‌دست آمده توسط (Danesh et al., 2012) همخوانی دارد [۱۲]، همچنین از طرفی احتمالاً با افزایش مقدار نانو رس تا سطح ۴ و ۶ درصد، به‌علت تجمع و تراکم ذرات نانو رس و همچنین تشکیل توده‌های درهم‌رفته در نقاط شکست مقاومت کششی کامپوزیت کاهش می‌یابد [۱۳].

ذرات نانو، مقاومت کامپوزیت را تقویت می‌کند که این امر به سطح ذرات پرکننده بستگی دارد. سطح ذرات پرکننده به توپوگرافی سطح و تخلخل ذرات پرکننده وابسته است. سطح ذرات پرکننده بدین صورت تعریف می‌شود که در هر مترمربع از کامپوزیت، چند گرم از پرکننده وجود دارد [۱۴]. افزایش تا سطح ۲ درصد وزنی می‌تواند بر اثر برهم‌کنش قوی بین ماتریس (پلیمر) و لایه‌های سیلیکاتی نانو رس به دلیل تشکیل پیوندهای هیدروژنی [۱۵] و همچنین عوامل ساختاری مختلفی نظیر نسبت حجمی، ضریب ظاهری بالای ذرات نانو رس، فاصله افقی بین ذرات و مقدار درهم‌رفتگی ذرات نانو رس نیز بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های پلیمر – خاک رس تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای دارند [۹]. علاوه‌بر این تشکیل ساختار بین‌لایه‌ای، تأثیر شدیدی بر مدول نانوکامپوزیت حاصل دارد، همچنین درصد خاک رس در نانوکامپوزیت‌ها نقش بسزایی ایفاء می‌کند [۹].

تأثیر مقدار نانو رس بر مقاومت و مدول خمشی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر مقدار نانو رس بر مقاومت و مدول خمشی در سطح اطمینان ۹۵٪

معنی‌دار است. همان‌طوری‌که در شکل ۲ (الف و ب) مشاهده می‌شود با افزایش مقدار نانو رس، مقاومت خمشی تا سطح ۴ درصد ابتدا افزایش و سپس کاهش معنی‌داری می‌یابد. با افزایش مقدار نانو رس، مدول خمشی تا سطح ۲ درصد ابتدا افزایش و سپس کاهش معنی‌داری می‌یابد. بیش‌ترین مقاومت خمشی مربوط به ترکیب (۴ درصد نانو رس) برابر ۴۸/۶۹ مگاپاسکال و کمترین مقدار آن مربوط به ترکیب (۶ درصد نانو رس) برابر ۴۴/۷۴ مگاپاسکال می‌باشد. بیش‌ترین مدول خمشی مربوط به ترکیب (۲ درصد نانو رس) برابر ۴۳۹۷/۹۱ مگاپاسکال و کمترین مقدار آن مربوط به ترکیب (۶ درصد نانو رس) برابر ۳۹۵۲/۴۴ مگاپاسکال می‌باشد.

از آنجائی‌که تأثیر نانو ذرات بر روی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های پلیمری به عواملی چون اندازه، شکل، نوع، ضریب ظاهری، ساختار بلوری، مقدار، مقدار پراکنش و کیفیت ذرات نانو رس و نحوه اتصال آن‌ها با پلیمر بستگی دارد [۹]. لذا می‌توان افزایش در مقدار مقاومت خمشی کامپوزیت را در هنگام استفاده از ۴ درصد وزنی نانو رس به ضریب ظاهری بالای ذرات نانو رس نسبت داد. ضریب ظاهری بالای نانو رس موجب می‌شود سطح مشترک دو فاز افزایش یابد.

به‌همین دلیل، نتایج نشان می‌دهد با افزایش مقدار نانو رس تا سطح ۴ درصد وزنی مقاومت خمشی کامپوزیت افزایش‌یافته است که با نتایج به‌دست آمده توسط (Ziaei Tabari et al., 2011) همخوانی دارد [۱۶]، دلیل کاهش مقاومت خمشی با افزایش نانو رس می‌تواند مربوط به ویژگی جذب شدن ماده سازگارکننده توسط نانو رس باشد [۱۷]. نانو رس، تمایل به جذب ماده سازگارکننده دارد. زمانی‌که میزان نانو رس در ساختار کامپوزیت افزایش می‌یابد، نانو رس‌های بیشتر، ماده سازگارکننده بیشتری را به سمت خود می‌کشند و مانع از اتصال ماده جفت‌کننده با ذرات لیگنوسلولزی شده و این موضوع باعث کاهش مقاومت خمشی می‌شود [۱۷].

افزایش تا سطح ۲ درصد وزنی می‌تواند بر اثر برهم‌کنش قوی بین ماتریس (پلیمر) و لایه‌های سیلیکاتی نانو رس به‌دلیل تشکیل پیوندهای هیدروژنی [۱۷] و همچنین ضریب ظاهری بالای ذرات نانو رس و تشکیل ساختار بین‌لایه‌ای در نانوکامپوزیت مرتبط دانست. اما در مقادیر بالاتر با توجه به تجمع و تراکم ذرات نانو رس و تشکیل توده‌های متراکم و درهم‌رفته در نقاط شکست مدول خمشی کامپوزیت تا حدودی کاهش می‌یابد.

نتایج نشان می‌دهد با افزایش مقدار نانو رس ۲ درصد وزنی مدول خمشی کامپوزیت افزایش‌یافته است که با نتایج به‌دست آمده توسط (Liu et al., 2021) همخوانی دارد [۱۸].

تأثیر مقدار نانو رس بر مقاومت به ضربه فاق‌دار

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر مقدار نانو رس بر مقاومت مقاومت به ضربه فاق‌دار در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار است. همان‌طوری‌که در شکل ۳ مشاهده می‌شود با افزایش مقدار نانو رس، مقاومت به ضربه فاق‌دار تا سطح ۶ درصد کاهش معنی‌داری می‌یابد. بیش‌ترین مقاومت به ضربه فاق‌دار مربوط به ترکیب (۰ درصد نانو رس) برابر ۳۸/۲۰ ژول بر متر و کمترین مقدار آن مربوط به ترکیب (۶ درصد نانو رس) برابر ۳۱/۶۹ ژول بر متر می‌باشد.

با توجه به اینکه ذرات نانو رس نواحی متمرکز تنش و نقاط شروع شکست را ایجاد می‌کنند، در نتیجه با افزایش مقدار نانو رس، میزان مقاومت به ضربه کامپوزیت کاهش می‌یابد. در واقع وجود ذرات نانو در ماتریس پلیمر سبب کاهش قابلیت تحرک زنجیرها و امکان اتلاف انرژی آن‌ها، افزایش انرژی جذب‌شده توسط کامپوزیت و ایجاد نقاط پرتنش می‌شود. این نقاط می‌تواند محل‌هایی برای شروع شکست و ترک باشند (Han et al., 2008). این تحقیق با نتایج Lei et al., 2010، مطابقت دارد [۱۹].

تأثیر مقدار نانو رس بر شاخص اکسیژن محدود

نتایج تجزیه واریانس یک طرفه نشان داد تأثیر نانو رس بر شاخص اکسیژن محدود در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار است. آزمون دانکن، سطوح مختلف مقادیر نانو رس را در چهار گروه مختلف قرار داد شکل ۴ همان‌طوری‌که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش مقدار نانو رس تا ۶ درصد وزنی، شاخص اکسیژن محدود افزایش معنی‌داری یافته است. بیش‌ترین شاخص اکسیژن محدود مربوط به استفاده از ۶ درصد وزنی نانو رس برابر ۲۰/۳ درصد و کمترین مقدار آن مربوط به استفاده از ۰ درصد وزنی نانو رس برابر ۱۹/۲ درصد می‌باشد.

با مشاهده داده‌های شاخص اکسیژن مشخص است که هرچقدر میزان نانو رس افزایش یابد شاخص اکسیژن بیشتر می‌شود یعنی هرچقدر نانو رس زیادتر شود نمونه برای سوختن به اکسیژن بیشتری نیاز دارد. با افزایش نانو رس به دلیل بهبود چسبندگی بین فصل مشترک پلیمر و چوب مقدار شاخص اکسیژن محدود افزایش یافت. مقادیر بالاتر شاخص اکسیژن محدود ممکن است ناشی از تشکیل زغال کربنی-سیلیکاتی[۴] روی سطح باشد. نانو رس می‌توانند مثل سدی مانع نفوذ و حرکت اکسیژن به داخل ساختار نانو کامپوزیت شوند و در واقع مانند مانعی در برابر نفوذ گازها عمل کرده و حفرات را پر می‌کنند [۲۰].

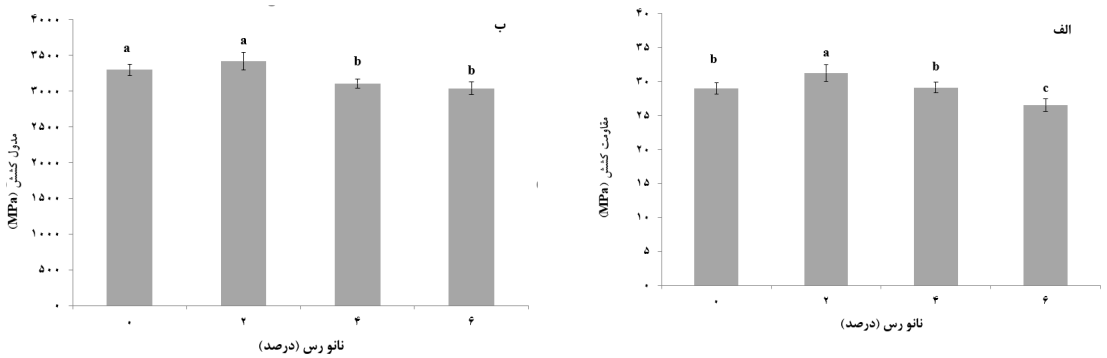
کامپوزیت‌ها معمولاً دارای خلل و فرج هستند و این خلل و فرج معمولاً توسط بخار و مواد فرار در طی مرحله ترکیب و یا ساخت ایجاد می‌شوند. این خلل و فرج باز و با هم مرتبط هستند و حالت حفره دارند. اکسیژن معمولاً از این حفره‌ها عبور می‌کند و روند اشتعال را افزایش می‌دهد اما حضور ذرات نانو با پر کردن این حفرات این روند را دچار اختلال کرده و باعث کاهش سوختن و پایداری حرارتی می‌گردد [۲۰].

این عقیده وجود دارد که به خاطر تأثیر سد نانو رس که نفوذ O2 به داخل نمونه را کند می‌کند. تخریب نانو کامپوزیت در دمای بالاتری اتفاق می‌افتد [۲۱].

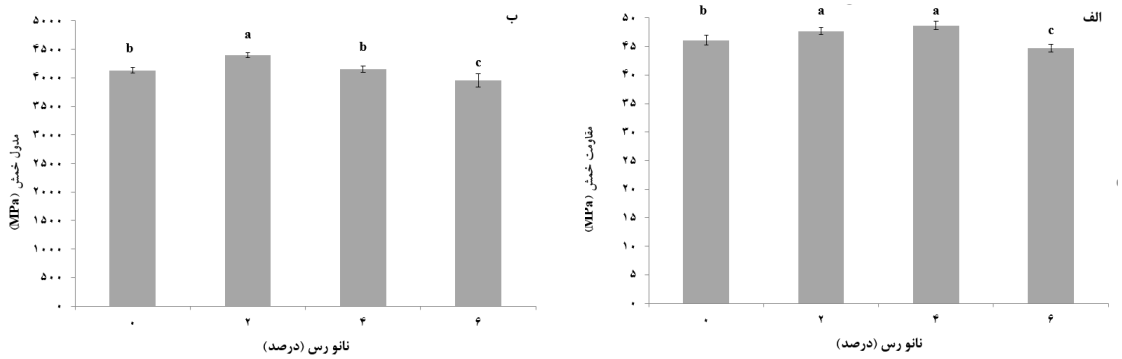
گرماسنجی وزنی

نتایج میزان خاکستر باقیمانده مربوط به آنالیز حرارتی در جدول ۵ مشاهده می‌شود. با افزایش میزان نانو رس میزان خاکستر باقیمانده افزایش یافت. جدول ۵ مربوط به نتایج گرماسنجی وزنی ۵۰ درصد آرد چوب و چهار سطح ۰، ۲، ۴ و ۶ درصد نانو رس را نشان می‌دهد. نتایج بررسی گرماسنجی وزنی کامپوزیت‌ها نشان داد که اختلاف معنی-داری بین دمای تخریب نمونه‌های مختلف وجود ندارد. نتایج نشان داد در نمونه‌ها، سه محدوده تخریب حرارتی وجود دارد که در مرحله اول نمونه‌ها در دمای بالاتری شروع به تخریب می‌کنند. در مرحله دوم که میزان آن شدیدتر می‌باشد با افزایش میزان نانو رس نمونه‌ها در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد شروع به تخریب می‌کنند. در مرحله سوم تخریب با افزایش میزان نانو رس در دمای ۳۸۶ درجه سانتی‌گراد تخریب ادامه پیدا می‌کند که در این مرحله میزان دمای تخریب کمتر از سایر نمونه‌ها می‌باشد ولی اختلاف دمای تخریب با سایر نمونه‌ها معنی‌دار نیست. از دمای ۴۵۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد تخریب با شدت بیشتر انجام می‌شود. به‌طور کلی در نمونه‌های حاوی چوب و نانو رس افت وزن تا محدوده دمایی ۵۰۰ درجه ادامه داشته و بعد از آن در دمای کاهش وزن روند ثابتی گرفته و یا بسیار ناچیز است. علاوه بر این از نمودار آنالیز حرارتی این نکته دریافت می‌شود نانو رس ثبات حرارتی را افزایش داده است. میزان خاکستر باقیمانده در چهار نمونه کامپوزیت هنگام استفاده ار ۰ تا ۶ درصد نانو رس به ترتیب برابر است با ۷/۱۱، ۸/۷۱، ۱۱/۴۶ و ۱۲/۴۲ درصد می‌باشد. موادی که باعث کند سوز شدن و به تعویق افتادن احتراق می‌شوند به‌طورکلی باید با وزن و نسبت بیشتری و یا به‌اصطلاح با سطح بارگیری بیشتری استفاده شوند. بالا بودن سطح بارگیری این کند سوزکننده‌ها معمولاً منجر به چگالی زیاد و عدم انعطاف‌پذیری محصولات نهایی می‌شود و همچنین می‌تواند مشکلاتی در ترکیب‌سازی و اکستروژن به وجود آورد [۲۲]. نتایج نشان داد با افزایش نانو رس ثبات حرارتی نمونه‌ها افزایش یافت و هرچقدر میزان نانو رس افزایش یافت نانو کامپوزیت در دمای بالاتری شروع به تخریب می‌کند یعنی نمونه در دمای بالاتری دچار افت وزنی می‌گردد، احتمالاً به دلیل آزادسازی ترکیباتی است که در ذرات نانو به کار می‌رود و خاکستری که زیاد شده ناشی از ترکیبات معدنی ذرات نانو است و این نتیجه با نتایج دیگر محققین تطابق دارد [۲۳].

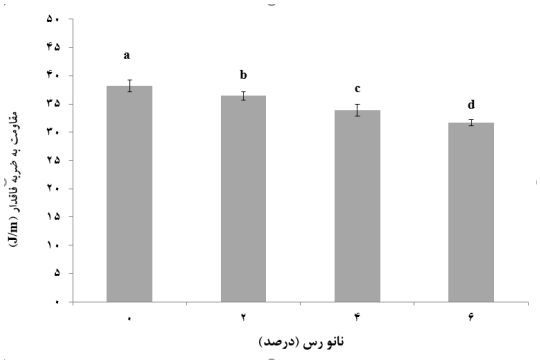
[۴] Carbonaceous-Silica Char



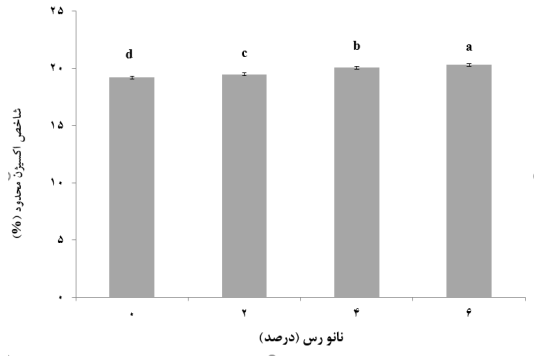
شکل ۱- تأثیر مستقل نانو رس بر مقاومت کششی (الف) و مدول کششی (ب)



شکل ۲- تأثیر مستقل نانو رس بر مقاومت خمش (الف) و مدول خمش (ب)



شکل ۳- تأثیر مستقل نانو رس بر مقاومت به ضربه فاق‌دار



شکل ۴- تأثیر مستقل نانو رس بر شاخص اکسیژن محدود

جدول ۵- آنالیز گرمایی کامپوزیت چوب پلاستیک

شماره تیمار	نانو رس	دمای تخریب (TD) در درصدهای مختلف کاهش وزن (٪)				وزن باقیمانده در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد (RW٪)
۱	۰	۲۰٪	۴۰٪	۶۰٪	۸۰٪	۷/۱۱
۲	۲	۳۷۰	۴۶۴	۴۷۴	۴۸۷	۸/۷۱
۳	۴	۳۶۷	۴۶۲	۴۷۴	۴۸۹	۱۱/۴۶
۴	۶	۳۵۸	۴۶۲	۴۷۶	۴۹۳	۱۲/۴۲

نتیجه گیری

افزودن نانو رس به کامپوزیت ابتدا باعث بهبود مقاومت و مدول کششی و خمشی می‌شود، این بهبود در خواص مکانیکی به دلیل پراکنش مناسب نانو رس در ماتریس و ایجاد اتصال قوی بین نانو رس و ماتریس پلیمری است. همچنین افزودن نانو رس به کامپوزیت سبب افزایش مقاومت حرارتی کامپوزیت می‌شود و این بهبود در خواص حرارتی به دلیل ساختار لایه‌ای نانو رس و افزایش مسیر عبور گرما از طریق کامپوزیت است. افزودن نانو رس به کامپوزیت باعث بهبود خواص آتش‌گیری کامپوزیت مانند کاهش سرعت احتراق، می‌شود. این بهبود در خواص آتش‌گیری به دلیل تشکیل لایه محافظ سیلیکاتی در سطح کامپوزیت در زمان احتراق است که مانع از انتشار گازها و مواد سوختنی می‌شود. در مجموع، افزودن نانو رس به کامپوزیت حاصل از آرد چوب زبان گنجشک و پلی‌پروپیلن ضایعاتی تا حدی منجر به بهبود در خواص مکانیکی، حرارتی و آتش‌گیری کامپوزیت می‌شود که می‌تواند کاربردهای متنوعی در صنایع مختلف داشته باشد.

افزایش نانو رس تا سطح ۲ درصد باعث افزایش مقاومت و مدول کششی و مدول خمشی به ترتیب برابر ۷/۹، ۳/۶ و ۶/۴ شد.

افزایش نانو رس تا سطح ۴ درصد باعث افزایش ۵/۶ درصدی مقاومت خمشی شد.

افزایش نانو رس تا سطح ۶ درصد باعث کاهش ۲۰/۵ درصدی مقاومت به ضربه فاق‌دار و افزایش ۴/۷ درصدی شاخص اکسیژن محدود شد.

با افزایش نانو رس تا ۶ درصد ثبات حرارتی افزایش می‌یابد و میزان زغال بیشتری نیز باقی می‌ماند.

منابع

[1] Samariha, A., pourabbasi, S. and Khademi Eslam, H. 2023. Investigating the characteristics of wood-plastic composites made from bagasse. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 14(3), 271-283. doi: 10.22034/ijwp.2023.2008110.1622 (In Persian)

[2] Yari Firouzabadi, Z., vaziri, V., kord, B. and Jamalirad, L. 2023. Investigation of the mechanical-dynamic and thermal properties of nanocomposites manufactured from rapeseed stalk flour/ nanographene and high-density polyethylene. Iranian Journal of Wood and Paper Industries, 13(4), 445-456. doi: 10.22034/ijwp.2023.1971217.1571 (In Persian).

[3] Rajeshkumar, G., Seshadri, S. A., Ramakrishnan, S., Sanjay, M. R., Siengchin, S., and Nagaraja, K. C. 2021. A comprehensive review on natural fiber/nano-clay reinforced hybrid polymeric composites: Materials and technologies. Polymer Composites, 42(8), 3687-3701.

[4] Ibrahim, M. A., Hirayama, T., and Khalafallah, D. 2019. An investigation into the tribological properties of wood flour reinforced polypropylene composites. Materials Research Express, 7(1), 015313.

[5] Gill, Y. Q., Abid, U., Irfan, M. S., Saeed, F., Shakoor, A., and Firdaus, A. 2022. Fabrication, characterization, and machining of polypropylene/wood flour composites. Arabian Journal for Science and Engineering, 47(5), 5973-5983.

[6] Rafiee, R., and Shahzadi, R. 2019. Mechanical properties of nanoclay and nanoclay reinforced polymers: a review. Polymer Composites, 40(2), 431-445.

[7] Asim, M., Paridah, M. T., Chandrasekar, M., Shahroze, R. M., Jawaid, M., Nasir, M., and Siakeng, R. 2020. Thermal stability of natural fibers and their polymer composites. Iranian Polymer Journal, 29, 625-648.

[8] Ao, X., Vázquez-López, A., Mocerino, D., González, C., and Wang, D. Y. 2024. Flame retardancy and fire mechanical properties for natural fiber/polymer

composite: A review. Composites Part B: Engineering, 268, 111069.

[9] Kord, B. 2009. Improvement of practical properties of wood polymer composite with nanoclay particles. Journal of Advanced Materials and Technologies, -2(4), 369-377. doi: 10.30501/jamt.2632.70163. (In persin).

[10] Tijjani, N., Tofa, M. S., Abdullahi, I., Yunusa, A. S., and Adam, I. B. 2023. Polymer Matrix Composites Reinforcement with Nanoparticulate Rice Husk Ash. Journal of Energy Technology and Environment, 5(2).

[11] Asif, A. L., V. Roa, and K. N. Ninan, 2007. Hydroxyl terminated poly (ether ether ketone) with pendant methyl group-toughened epoxy ternary nanocomposites: preparation, morphology and thermomechanical properties. Journal Applied Polymer Science (103), 3793-3799.

[12] Danesh, M. A., H. Ziaei Tabari, R. Hosseinpour, N. Nazarnezhad, and M. Shams, 2012. Investigation of the morphological and thermal properties of waste newsprint/recycled polypropylene/nanoclay composite, BioResources 7(1), 936-945.

[13] Karimpour-Motlagh, N., Khonakdar, H. A., Jafari, S. M. A., Mahjub, A., Panahi-Sarmad, M., Kasbi, S. F., ... and Arjmand, M. 2020. Influence of polypropylene and nanoclay on thermal and thermo-oxidative degradation of poly (lactide acid): TG-FTIR, TG-DSC studies and kinetic analysis. Thermochimica Acta, 691, 178709

[14] Jahromi, G., B. Andalibizade, and S. Vossough, 2010. Engineering Properties of Nanoclay Modified Asphalt Concrete Mixtures. The Arabian Journal for Science and Engineering, 35(1), 89-103.

[15] Golmakani, M. E., Wiczenbach, T., Malikan, M., Mahoori, S. M., and Eremeyev, V. A. 2021. Experimental and numerical investigation of tensile and flexural behavior of nanoclay wood-plastic composite. Materials, 14(11), 2773.

[16] Ziaei Tabari, H., A. Nourbakhsh, and A. Ashori, 2011. Effects of nanoclay and coupling agent on the mechanical, morphological, and thermal properties of wood flour/polypropylene composites, Polymer Engineering and Science 51(2), 272-277.

[17] Yeh, S. K., and Gupta, R. K. 2010. Nanoclay-reinforced, polypropylene-based wood–plastic composites. Polymer Engineering & Science, 50(10), 2013-2020.

[18] Liu, L., Yuan, Z., Fan, X., Pan, C., and Li, X. 2021. A review of interfacial bonding mechanism of bamboo fiber reinforced polymer composites. Cellulose, 1-18.

[19] Lei, W., X.Y. Ding, and C. Xu, 2010. Effect of Compatibilizing Agent on Mechanical and Thermal Properties of Wood-Plastic Composites. J. Adv. Mater. Res., 150, 406-409.

[20] Kiaei, M., Amiri, H., Samariha, A., and Amani, N. 2018. Effect of nanosilica on thermal, flammability, and morphological properties of WF/RPS-based nanocomposites. Cerne, 24(1), 59-66.

[21] Gilman, J. W., C.L. Jackson, A.B. Morgan, R.H. Harris, J.E. Manias, E.P. Giannelis, M. Wuthenow, D. Hiltion, and S. H. Philips, 2000. Flammability properties of Polymer–layered–silicate nanocomposites. polypropylene and polystyrene Nanocopositesٔ. Chemical Materials, 12: 1866-1873.\

[22] He, W., Song, P., Yu, B., Fang, Z., and Wang, H. 2020. Flame retardant polymeric nanocomposites through the combination of nanomaterials and conventional flame retardants. Progress in Materials Science, 114, 100687.

[23] Wang, X., Kalali, E. N., Wan, J. T., and Wang, D. Y. 2017. Carbon-family materials for flame retardant polymeric materials. Progress in Polymer Science, 69, 22-46.