





# Investigating the Characteristics of Composite Made of Wood Flour, Recycled PVC and Nanosilica for Packaging Purposes

Jafar Ebrahimpour-Kasmani \*, Ahmad Samariha 

\* Associate Prof, Department of Wood and Paper Science and Technology, Savadkooh Branch, Islamic Azad University, Savadkooh, Iran

(Received: 26/04/2024, Revised: 18/05/2024, Accepted: 25/09/2024, Published: 10/12/2024)  
DOR: 20.1001.1.22286675.1403.15.59.1.4


## ABSTRACT

*In order to reduce the use of plastics in packaging and their harmful effects on the environment, innovative measures such as composite construction are being undertaken worldwide. The aim of this research is to develop a composite with suitable properties for packaging applications. For this purpose, PVC waste (50% by weight), wood flour (50% by weight), nanosilica (at 0, 3, 6, and 9% by weight) and maleic anhydride bonded with polypropylene at a constant level of 3 The percentages were mixed with two-rolled extruder (two arches) and standard test specimens were made using an injection press. Then, mechanical, thermal properties were measured. Also, in order to study the structure and operation of nanosilica particles, the morphology of the nanocomposite was investigated by electron microscope (SEM). The results showed that with increasing nanosilica content up to 3% by weight, tensile and flexural strength, flexural and tensile modulus, increased composite, then these properties decrease by adding up to 9% by weight of nanosilica. On the other hand, by increasing the amount of nanosilica to 9% by weight, the impact strength of the cigarette is reduced, the composite decreases. As the nanosilica increases, the thermal stability increases to 9%, and the amount of coal remains higher. An examination of the electron microscopic images showed that with increasing nanosilica, weaker adhesion was observed, but also less cavities and empty spaces.*

**Keywords:** Nanosilica, Flexural Strength, Tensile Modulus, Thermogravimetric Analysis, Scanning Electron Microscopy (SEM)

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

 Authors



\* Corresponding Author Email: jafar\_kasmani@yahoo.com

علمی - پژوهشی

## بررسی ویژگی‌های کامپوزیت ساخته شده از آرد چوب، PVC بازیافتی و نانو سیلیس برای مصارف بسته‌بندی

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

۱- دانشیار، گروه مهندسی چوب و کاغذ، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران، ۲- استادیار، گروه صنایع چوب، دانشگاه ملی مهارت،

تهران، ایران

DOR: 20.1001.1.22286675.1403.15.59.1.4

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۰۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۲۹

### چکیده

در سراسر جهان، به‌منظور کاهش استفاده از پلاستیک در بسته‌بندی‌ها و تأثیرات مخرب آن بر محیط زیست، اقدامات نوآورانه مانند ساخت کامپوزیت در حال انجام است. هدف این پژوهش هم ساخت کامپوزیت با ویژگی‌های مناسب برای مصارف بسته‌بندی است. برای این منظور PVC ضایعاتی (سطح ۵۰ درصد وزنی)، آرد چوب (سطح ۵۰ درصد وزنی)، نانو سیلیس (در چهار سطح ۰، ۳، ۶ و ۹ درصد وزنی) و انیدرید مالئیک پیوند داده‌شده با پلی پروپیلن در سطح ثابت ۳ درصد، به‌وسیله اکسترودر دو ماردون (دو مارپیچه) با یکدیگر مخلوط و نمونه‌های آزمون استاندارد با استفاده از پرس تزریقی ساخته شدند. سپس خواص مکانیکی، حرارتی، اندازه‌گیری شدند. همچنین به‌منظور بررسی ساختار و نحوه عملکرد ذرات نانو سیلیس ریخت‌شناسی نانو چندسازه حاصله به‌وسیله میکروسکوپ الکترونی (SEM) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد با افزایش مقدار نانو سیلیس تا ۳ درصد وزنی، مقاومت کششی و خمشی، مدول خمشی و کششی، چندسازه افزایش یافته، سپس با افزودن مقدار تا ۹ درصد وزنی نانو سیلیس، این خواص کاهش می‌یابند. از طرفی با افزایش مقدار نانو سیلیس تا ۹ درصد وزنی مقاومت به ضربه فاق‌دار، چندسازه کاهش می‌یابد. با افزایش نانو سیلیس تا ۹ درصد ثابت حرارتی افزایش می‌یابد و میزان زغال بیشتری نیز باقی ماند. بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان داد با افزایش نانو سیلیس چسبندگی ضعیف‌تری بوجود آمد ولی حفرات و فضاهای خالی کمتر می‌شود.

### کلیدواژه‌ها: نانو سیلیس، مقاومت خمشی، مدول کششی، گرماسنجی وزنی، میکروسکوپ الکترونی (SEM)

#### ۱- مقدمه

مصرف منابع طبیعی و ایجاد یک روش بسته‌بندی پایدارتر می‌شود. استفاده از کامپوزیت چوب پلاستیک در بسته‌بندی می‌تواند بهبودی در عملکرد، ماندگاری و ایمنی محصولات فراهم کند و در عین حال به حفظ محیط زیست و کاهش پسماندها کمک کند [۱].

تولیدکنندگانی که به محیط زیست اهمیت می‌دهند، باید به سمت گزینه‌های بهتر و استفاده از مواد کامپوزیتی و مصرف هر چه کمتر پلاستیک در بسته‌بندی محصولاتشان حرکت کنند. صنایع مهم نظیر: هوا فضا، خودرو، و بسته‌بندی، اشتیاق زیادی برای گسترش کامپوزیت‌های نو نشان می‌دهند. با توجه به گسترش صنایع بسته‌بندی و مصارف پلاستیک‌ها در این صنایع بخصوص بسته‌بندی مواد غذایی، دارویی و بهداشتی، این مسئله موجب افزایش زباله‌های ناشی از این محصولات و ایجاد آلودگی‌های زیست محیطی شده است. با یک برنامه‌ریزی مناسب، برای بازیافت ضایعات پلاستیکی، نه

استفاده از کامپوزیت چوب پلاستیک در بسته‌بندی، به‌عنوان جایگزین پایدار و مناسب برای بسته‌بندی سنتی، اهمیت زیادی دارد. این کامپوزیت با ترکیب چوب و پلاستیک تولید می‌شود و ویژگی‌های منحصر به فرد هر دو جنس را داراست. این کامپوزیت دارای مقاومت بالا در برابر ضربه، استحکام بیشتر نسبت به چوب و پلاستیک معمولی، مقاومت به رطوبت و ضدپوسیدگی است. همچنین، قابلیت بازیافت و دوباره استفاده از آن منجر به کاهش

\* رایانامه نویسنده مسئول: jafar\_kasmani@yahoo.com

می‌شده است، اما از دهه ۱۹۹۰ استفاده از پلاستیک‌های ضایعاتی در ساخت این چندسازه‌ها مورد توجه قرار گرفته است [۵]. PVC در محدوده بسیار گسترده‌ای از کاربردها با طول عمر کوتاه تا بلند استفاده می‌شود. حدود ۶۰٪ کاربردهای این پلیمر طول عمری بیش از ۴۰ سال دارند. پلی وینیل کلرید در مقایسه با سایر پلاستیک‌ها با تنوع بسیار زیاد در کاربرد نهایی و امکان پذیری از لحاظ قیمت، بسیار مناسب است. این پلیمر با دوام است، به سهولت نگهداری می‌شود و در گستره وسیعی از رنگ‌ها تولید می‌شود. بیشترین مقدار پلی وینیل کلرید برای ساخت لوله روکش پروفیل درب و پنجره‌ها عایق کاری سیم و کابل و ورقه‌ها یا فیلم‌های صلب به وسیله اکستروژن فرایند می‌شود. ورقه‌سازی در فرایند کردن ورقه‌ها یا فیلم‌های انعطاف‌پذیر برای اثاثیه منزل کاغذ دیواری و کف پوش‌ها استفاده می‌شود. قالب‌گیری تزریقی برای رابط لوله‌ها و در صنایع خودروسازی کاربرد دارد. مزیت مهم پلی وینیل کلرید سازگاری آن با انواع مختلفی از افزودنی‌هاست که باعث تنوع بسیار و خواص معینی در این پلیمر می‌شود. کاربردهای این پلیمر شامل کالاهای سخت کشسان و اسفنجی است.

از بین انواع نانو ذراتی که در ساخت چندسازه‌ها استفاده می‌شوند، نانو سیلیس به دلیل فراوانی بیش از سایر نانو ذرات مورد توجه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانو سیلیس سبب بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چندسازه حاصله می‌گردد [۶]. با توجه به اثر مواد در مقیاس نانو، سیلیس در افزایش مقاومت خمشی و فشاری در سیمان، پیش‌بینی می‌شود نانو مواد به سبب حجم و اندازه کوچک به‌عنوان مواد افزودنی در کامپوزیت‌ها کاربرد داشته باشد و در بهبود خواص کاربردی محصولات و یا بهبود مقاومت اتصالات بین مواد لیگنوسولوزی و مواد اتصال دهنده به‌صورت قابل توجهی ایفای نقش نماید [۷]. هدف از این پژوهش بررسی ویژگی‌های کامپوزیت ساخته شده از آرد چوب، PVC بازیافتی و نانو سیلیس برای مصارف بسته‌بندی است.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- مواد

در این بررسی پلیمر (PVC S65) از پتروشیمی بندر امام خمینی تهیه گردید و توسط دستگاه اکسترودر از نوع دو مارپیچه، تحت دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه، سه بار ذوب‌شده و سپس به صورت دانه‌های گرانول در آمد که به‌عنوان ماده پلیمری جهت ساخت چندسازه و آرد چوب صنوبر (ضایعات

فقط آلودگی محیط زیست را کاهش می‌دهد بلکه می‌توان این مواد را به جای مواد اولیه دوباره مصرف نمود [۲].

امروزه یافتن محصول جایگزین برای منابع سلولزی بویژه بعنوان مواد اولیه صنعت بسته‌بندی در جهت نیاز بشر و حفظ محیط زیست و جلوگیری از مصرف چوب درختان و نابودی جنگل‌ها منجر به تولید محصولی به نام چوب پلاستیک شده است. این محصول از دسته مواد ترکیبی (چندسازه - کامپوزیت) است. با توجه به توسعه و رویکردهای نوین در عرصه صنعت و اقتصاد بویژه در بخش نانو تکنولوژی تولید و استفاده از این ماده بسیار مورد توجه قرار گرفته است. مقاومت مکانیکی محصول به دست آمده ۳۰ درصد بیشتر از پلاستیک و حدوداً ۵ برابر چوب است و نسبت به پلاستیک‌ها از انعطاف‌پذیری بیشتری برخوردار است که می‌تواند مهمترین دلیل کاربرد این مواد یا محصولات آن در تولید مواد اولیه بسته‌بندی‌های انعطاف‌پذیر باشد [۳].

روزانه مقادیر قابل توجهی زباله‌های پلاستیکی در سراسر دنیا تولید می‌شود. بیشتر پلاستیک‌های موجود در بسته‌بندی محصولات (غذایی، دارویی و بهداشتی) پس از یکبار استفاده دور ریخته می‌شوند و در نتیجه مقدار زیادی از زباله‌های پلاستیکی به محیط زیست وارد می‌شود. به‌طور کلی پلی‌اتیلن سنگین، پلی‌اتیلن سبک، پلی‌پروپیلن (PP)<sup>۱</sup>، پلی‌اتیلن ترفتالات (PET)<sup>۲</sup>، پلی‌استایرن (PS)<sup>۳</sup> و پلی‌وینیل کلراید (PVC)<sup>۴</sup> از اجزاء اصلی تشکیل دهنده پلاستیک‌ها در ضایعات جامد شهری هستند [۴]. این مواد به علت خنثی بودن نسبی در مقابل واکنش‌های شیمیایی، در نهایت به آلاینده محیط‌زیست تبدیل می‌شوند.

روش‌های مختلفی شامل دفن، سوزاندن و بازیافت برای سازمان‌دهی این مواد وجود دارد. استفاده مجدد از این پلاستیک‌ها سبب کاهش صدمات زیست‌محیطی، کاهش مصرف پلاستیک‌های بکر و همچنین کاهش هزینه‌های تولید محصولات جدید می‌شود.

یکی از راه‌های بازیافت پلاستیک‌ها استفاده از آنها در ساخت چندسازه‌های چوب پلاستیک است. چندسازه چوب پلاستیک، دسته‌ای از چندسازه‌ها هستند که در آنها از آرد چوب یا الیاف مواد لیگنوسولوزی به‌عنوان پرکننده یا تقویت‌کننده در بستر پلاستیکی استفاده می‌شود. به دلیل ویژگی‌های مناسبی که این چندسازه‌ها دارند، استفاده از آنها در دهه‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در ابتدا از پلاستیک‌های بکر مانند پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن و پلی‌وینیل کلراید در ساخت چندسازه‌های چوب پلاستیک استفاده

<sup>1</sup> Polypropylene

<sup>2</sup> Polyethylene terephthalate

<sup>3</sup> Polystyrene

<sup>4</sup> Polyvinyl chloride

ناحیه به ترتیب ۱۶۰، ۱۵۵ و ۱۴۵ درجه سانتی‌گراد، دمای قالب  $40^{\circ}\text{C}$ ، فشار تزریق ۸۰ Mpa و زمان دوره تزریق کمتر از ۲۰ ثانیه در نظر گرفته شد. عملیات خنک کردن قالب با آب سرد انجام شد و نمونه‌ها جهت آزمون‌های کشش، خمش و ضربه پس از ۲ دقیقه از قالب بیرون آورده شدند.

## ۲-۴- 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 نانوجندسازهای 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 سانتی‌گراد 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 اندازه‌گیری شد. به منظور بررسی آزمون خمش نمونه‌ها از آیین نامه D-747 استاندارد ASTM<sup>۴</sup> 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<sup>۵</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. آزمون مورد نظر مطابق استاندارد ASTM E1131 انجام گرفت و جهت بررسی سطوح شکست از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل JXA-۸۴۰ ساخت شرکت JEOL کشور ژاپن استفاده شد.

## ۲-۵- تجزیه و تحلیل نتایج

در این بررسی سطوح متفاوت نانو سیلیس در چهار سطح (۰، ۳، ۶ و ۹ درصد). تعداد تکرارها برای هر تیمار برابر ۳ تکرار مدنظر قرار

کارگاه چوب بری) و پلی اتیلن مالئیک‌دار<sup>۱</sup> (MAPP) ساخت شرکت کرانکین به عنوان سازگار کننده یا عامل جفت کننده به منظور بهبود چسبندگی بین PVC آب‌گریز (غیرقطبی) و آرد چوب آب‌دوست (قطبی) استفاده شد. پودر نانو سیلیس (Nano SiO<sub>2</sub>) تولید شده توسط شرکت Degussa کشور آلمان تهیه و با درصدهای مختلف (۰، ۳، ۶ و ۹ درصد) استفاده شد. دانه‌های گرانول تهیه شده به مدت ۵ روز در مجاورت هوای آزاد قرار گرفت و سپس در داخل کیسه‌های پلاستیکی ریخته و تا زمان استفاده نگهداری گردید. آرد چوب صنوبر استفاده شده در این تحقیق از مش ۴۰ عبور کرده و روی الک با مش ۵۰ باقیمانده است. سپس به منظور جلوگیری از تاثیر رطوبت الیاف در فرآیند ساخت به مدت ۲۴ ساعت در آن قرار داده شد بعد از این مرحله، آرد چوب مورد نظر در کیسه‌های پلاستیکی ریخته و نگهداری شد.

## ۲-۲- روش‌ها

درصد وزنی اجزای کامپوزیت‌های ساخته شده با ذکر علامت اختصاری به کاررفته برای هر تیمار در جدول (۱) آورده شده است. اختلاط PVC ضایعاتی، آرد چوب، پرکننده نانو سیلیس و سازگار کننده به صورت نسبت وزنی مشخص توسط دستگاه اکسترودر دو ماردون<sup>۲</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.

جدول (۱): درصد اجزای کامپوزیت چندسازه در تیمارهای مختلف

ردیف	کد تیمار	آرد چوب (phc)	PVC ضایعاتی (phc)	نانوسیلیس (phc)	جفت کننده (phc)
۱	A1	۵۰	۵۰	۰	۳
۲	A2	۵۰	۵۰	۳	۳
۳	A3	۵۰	۵۰	۶	۳
۴	A4	۵۰	۵۰	۹	۳

phc: parts per hundred compounds

## ۲-۳- ساخت نمونه‌های آزمونی استاندارد

به منظور ساخت نمونه‌های آزمونی استاندارد، گرانول‌ها به دستگاه قالب‌گیر تزریقی<sup>۳</sup> تزریق می‌گردد. برای این کار از دستگاه تزریق نیمه صنعتی ساخت شرکت ایمن ماشین تهران موجود در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران استفاده شد. دمای سیلندر تزریق در هر سه

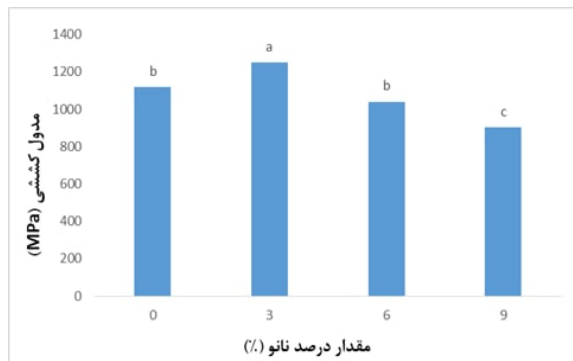
<sup>۴</sup> American Society for Testing and Materials

<sup>۵</sup> Thermal gravimetric analysis

<sup>۱</sup> Maleic anhydride polypropylene

<sup>۲</sup> Dr. Collien

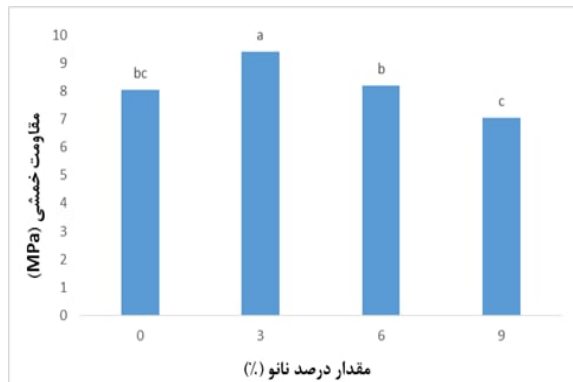
<sup>۳</sup> Injection Molding



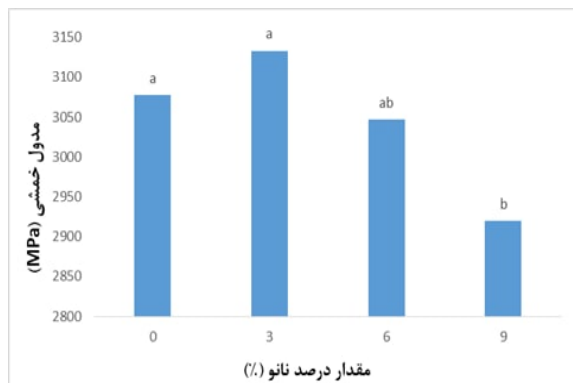
شکل (۲): تأثیر مقدار نانو سیلیس بر مدول کششی

### ۳-۲- تأثیر نانو سیلیس بر مقاومت و مدول خمشی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر نانو سیلیس بر مقاومت و مدول خمشی در سطح اطمینان ۹۵٪ دارای اختلاف معنی دار است. همان طوری که در شکل (۳) و (۴) مشاهده می شود با افزایش مقدار نانو سیلیس تا ۳ درصد وزنی، مقاومت و مدول خمشی افزایش می یابد، و با افزایش ۹ درصدی این میزان کاهش می یابد. بیشترین مقدار مقاومت و مدول خمشی مربوط به استفاده از ۳ درصد وزنی نانو سیلیس به ترتیب برابر  $9/4 \text{ MPa}$  و  $3133 \text{ MPa}$  و کمترین مقدار آن مربوط به استفاده از ۹ درصد وزنی نانو سیلیس به ترتیب برابر  $7/04 \text{ MPa}$  و  $2920 \text{ MPa}$  می باشد.



شکل (۳): تأثیر مقدار نانو سیلیس بر مقاومت خمشی



شکل (۴): تأثیر مقدار نانو سیلیس بر مدول خمشی

گرفت. بنابراین تعداد تیمارها برابر ۴ تا بود که شامل ۴ سطح نانو سیلیس بود. از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی استفاده گردید. به منظور انجام تجزیه و تحلیل های آماری از نرم افزار SPSS نسخه ۱۶ استفاده شد. معنی داری میانگین تیمارها نیز بر اساس آزمون چند دامنه ای دانکن و در سطح احتمال ۵ درصد مورد بررسی قرار گرفت.

### ۳- نتایج

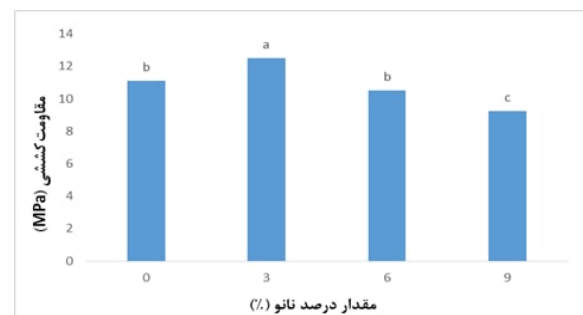
نتایج آزمون تجزیه واریانس در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول (۲): تجزیه واریانس (مقدار F و سطح معنی داری) اثر متغیرهای ساخت بر مقاومتها

مقدار F و سطح معنی داری	متغیرهای ساخت
*۲۳/۹۹۳	مقاومت کششی
*۱۸/۹۰۵	مدول کششی
*۹/۱۰۷	مقاومت خمشی
*۴/۱۹۱	مدول خمشی
*۱۵/۸۳۳	مقاومت به ضربه فاق دار

### ۳-۱- تأثیر نانو سیلیس بر مقاومت و مدول کششی

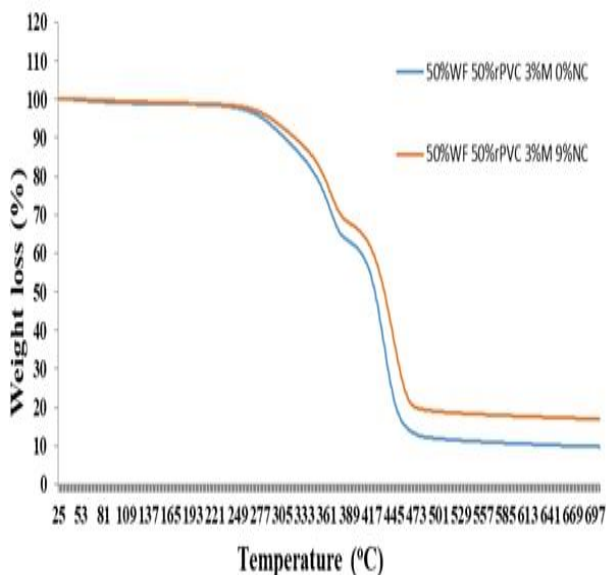
نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر نانو سیلیس بر مقاومت و مدول کششی در سطح اطمینان ۹۵٪ دارای اختلاف معنی دار است. همان طوری که در شکل (۱) و (۲) مشاهده می شود با افزایش مقدار نانو سیلیس تا ۳ درصد وزنی، مقاومت و مدول کششی افزایش می یابد، و با افزایش ۹ درصدی این میزان کاهش می یابد. بیشترین مقدار مقاومت و مدول کششی مربوط به استفاده از ۳ درصد وزنی نانو سیلیس به ترتیب برابر  $12/49 \text{ MPa}$  و  $1250 \text{ MPa}$  و کمترین مقدار آن ها مربوط به استفاده از ۹ درصد وزنی نانو سیلیس به ترتیب برابر  $9/24 \text{ MPa}$  و  $903 \text{ MPa}$  می باشد.



شکل (۱): تأثیر مقدار نانو سیلیس بر مقاومت کششی

جدول (۳): آنالیز گرمایی نانو کامپوزیت چوب پلاستیک و نانو سیلیس

وزن باقیمانده در دمای ۷۰۰ درجه سانتی-گراد (RW/%)	دمای تخریب (TD) در درصد‌های مختلف کاهش وزن (%)				حداکثر دمای پیرولیز (Tm) (°C)	حداکثر دمای پیرولیز (Ti) (°C)	دمای تخریب اولیه (Ti) (°C)	کد پتیل
	۸۰٪	۶۰٪	۴۰٪	۲۰٪				
۹/۷۹	۴۴۸	۴۳۰	۴۰۴	۳۴۸	۵۰۳	۳۸۹	۲۲۰	A1
۱۷/۰۱	۴۷۲	۴۴۳	۳۹۶	۳۵۷	۵۰۱	۳۹۰	۲۱۵	A4



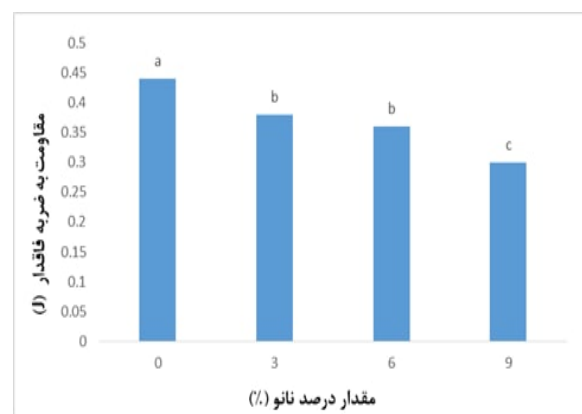
شکل (۶): نمودار مربوط به آنالیز حرارتی نمونه‌های نانو سیلیس و PVC ضایعاتی

### ۳-۵- ریخت‌شناسی به وسیله SEM

با استفاده از تصاویر به دست آمده از میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) می‌توان توزیع و سازگاری بین فیبرها و ماتریس را مشاهده کرد. اشکال (۷) تا (۱۰) سطوح شکست نمونه‌های نانو کامپوزیت حاوی ۵۰ درصد آرد چوب در چهار سطح ۰، ۳، ۶، و ۹ درصد نانو سیلیس را نشان می‌دهد. فضاهای خالی دلالت بر سطح اتصال ضعیف بین آرد و ماتریس دارد. با افزایش نانو سیلیس منافذ و فضاهای خالی کاهش می‌یابد. اگرچه در سطح ۳ درصد نانو سیلیس مقدار کمی حفره و فضای خالی به چشم می‌خورد که بیانگر آن است که بین ماتریس و الیاف پیوند بسیار خوبی برقرار شده است.

### ۳-۳- تأثیر نانو سیلیس بر مقاومت به ضربه فاقدار

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر نانو سیلیس بر مقاومت به ضربه فاقدار در سطح اطمینان ۹۵٪ دارای اختلاف معنی‌دار است. همان‌طوری که در شکل (۵) مشاهده می‌شود با افزایش مقدار نانو سیلیس تا ۹ درصد وزنی، مقاومت به ضربه فاقدار کاهش می‌یابد. بیش‌ترین مقدار مقاومت به ضربه فاقدار مربوط به استفاده از ۰ درصد وزنی نانو سیلیس برابر ۰/۴۴ J و کمترین مقدار آن مربوط به استفاده از ۹ درصد وزنی نانو سیلیس برابر ۰/۳ J می‌باشد.

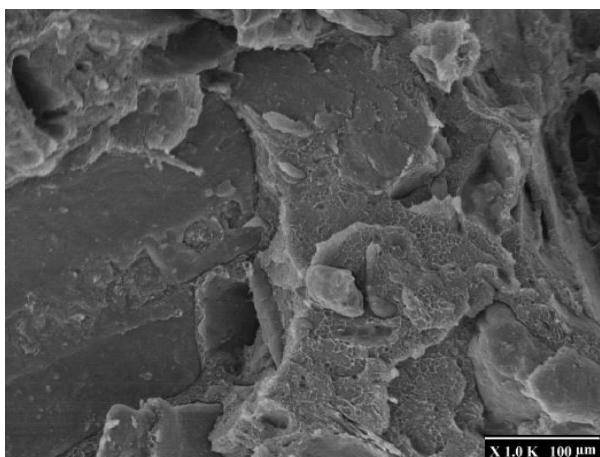


شکل (۵): تأثیر نانو سیلیس بر مقاومت به ضربه فاقدار

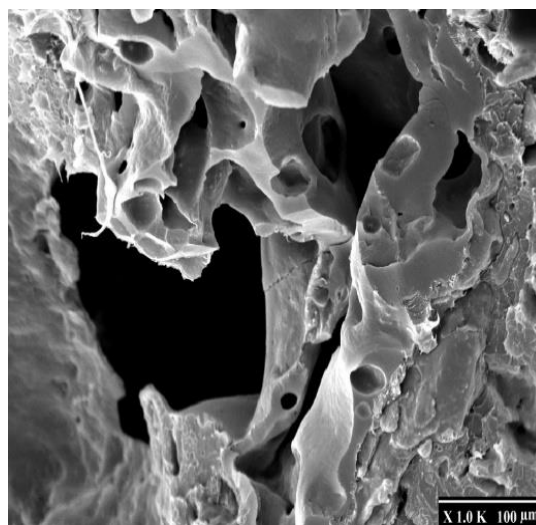
### ۳-۴- گرماسنجی وزنی

جدول (۳) نشان‌دهنده دمای تخریب اولیه (Ti)، حداکثر دمای پیرولیز (Tm)، دمای تخریب در درصد‌های مختلف کاهش وزن (TD) و وزن باقیمانده (RW/%) برای نانو کامپوزیت چوب پلاستیک است. شکل (۶) نمودار مقایسه‌ای مربوط به نتایج گرماسنجی وزنی ۵۰ درصد آرد چوب در دو سطح ۰ و ۹ درصد نانو سیلیس را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود منحنی تخریب دمایی نانو چندسازه به دو مرحله تقسیم می‌شود، مرحله اول مربوط به تجزیه الیاف چوبی و مرحله دوم مربوط به تجزیه پلیمر می‌باشد. افزودن آرد چوب به ماتریس پلیمری سبب کاهش دمای تخریب کامپوزیت چوب پلاستیک شده است و چندسازه در دمای پائین‌تری تجزیه می‌شود. در شروع مرحله دوم دمای تجزیه به دمای بالاتری انتقال می‌یابد. افزودن نانو سیلیس نیز تخریب مرحله اول را سرعت می‌بخشد و زغال باقیمانده بیشتری تولید می‌کند. دمای تجزیه مرحله دوم به دمای بالاتر انتقال می‌یابد، در حقیقت نانو سیلیس ثبات حرارتی را افزایش داده است. (جدول ۳).



شکل (۱۰): تصویر میکروسکوپ الکترونی حاوی ۵۰ درصد آرد چوب و ۹٪ نانو سیلیس

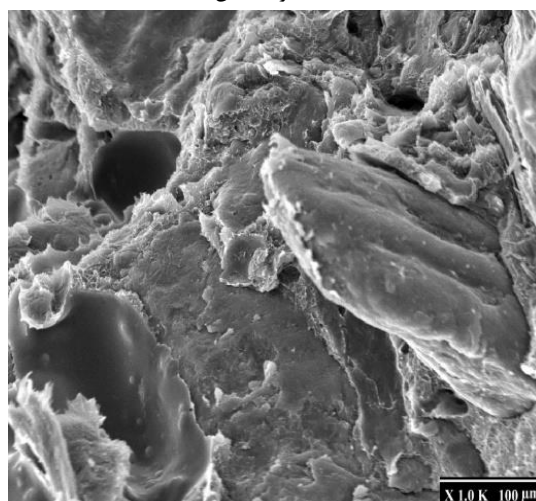


شکل (۷): تصویر میکروسکوپ الکترونی حاوی ۵۰ درصد آرد چوب و ۰٪ نانو سیلیس

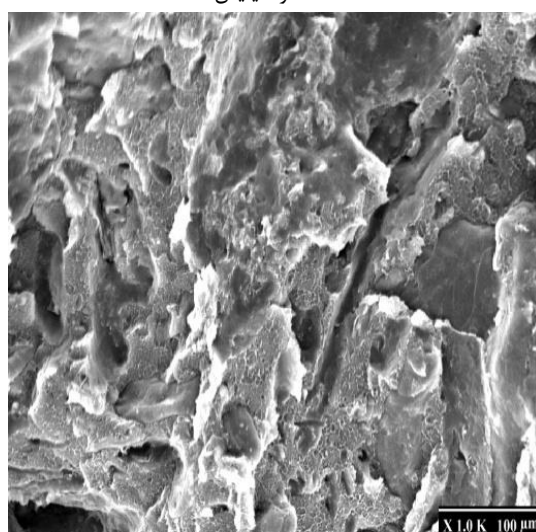
#### ۴- بحث و نتیجه گیری

با افزایش مقدار نانو سیلیس تا ۳ درصد، مقاومت کششی و خمشی، مدول کششی و خمشی افزایش یافته اما افزون بیشتر نانو سیلیس تا ۹ درصد تاثیر معنی داری بر این خواص نداشته است. از این رو جهت افزایش مقاومتها تا ۳ درصد نانو سیلیس دو مکانیسم وجود دارد: مکانیسم اول مرتبط با این موضوع است که نانو سیلیس از طریق تحمل تنش، تنش بین الیاف و ماتریس را بالا می برد [۸]. مکانیسم دوم نیز بر این موضوع دلالت دارد که نانو ذرات سیلیس به عنوان عامل هسته گذار در رشد بلورها عمل میکنند از این رو در اثر ورود این نانو ذرات تعداد بلورها افزایش می یابد [۹]. از طرف دیگر نانو ذرات سیلیس به علت انرژی سطحی زیاد، تمایل به جذب یکدیگر به علت وجود گروه های آب دوست هیدروکسیل و نیروهای جاذبه سیلیس را دارند. این گروه ها می توانند با ایجاد پیوند هیدروژنی باعث ایجاد تجمع در سطح پلیمر شوند [۱۰]. از این رو کاهش مقاومتها در اثر استفاده از ۹ درصد نانو سیلیس، به دلیل تجمع ذرات نانو و پراکنش نایکخواخت آنها و ایجاد پدیده کلوخینگی در بستر کامپوزیت است [۱۱]. موضوع دیگر مربوط به کاهش خاصیت ترکندگی پلیمر در اثر استفاده از مقادیر بالای نانو سیلیس است که منجر به اتصال نامناسب الیاف لیگنوسولوزی ماتریس می شود [۱۲].

افزایش مدول در هنگام استفاده از ۳ درصد نانو سیلیس در کامپوزیتهای پلیمری، تا حد زیادی بستگی به نحوه پراکنش ذرات نانو در بستر ماتریس دارد. از این رو می توان افزایش مدول را به توزیع مناسب این ذرات در بستر پلیمر و همچنین کاهش تحرک زنجیره های پلیمری و به تبع آن کاهش تغییر طول نسبی نمونه ها مرتبط دانست. از طرف دیگر کاهش مدول در مقادیر بالاتر نانو سیلیس مربوط به انباشتگی و تجمع نانو ذرات در کامپوزیت است [۱۳]. وجود پرکننده ها عموماً باعث کاهش استحکام ضربه می شود. در



شکل (۸): تصویر میکروسکوپ الکترونی حاوی ۵۰ درصد آرد چوب و ۳٪ نانو سیلیس



شکل (۹): تصویر میکروسکوپ الکترونی حاوی ۵۰ درصد آرد چوب و ۶٪ نانو سیلیس

در این تحقیق بررسی ریزساختار چندسازه‌ها بر روی سطوح شکست ایجادشده با میکروسکوپ الکترونی انجام شد. ریزنگارهای حاصل تا حدودی نتایج آزمون‌های حرارتی چندسازه‌ها را مورد تأیید قرار داد. با استفاده از تصاویر به دست آمده از میکروسکوپ الکترونی به بررسی و تأثیر نانو سیلیس بر سطح مشترک بین دو فاز لیاف سلولزی و فاز پلیمری پرداختیم. تصاویر میکروسکوپ الکترونی بر این موضوع دلالت داشت که با افزایش نانو سیلیس سازگاری بیشتری به وجود آمد، سطح اتصال بین ماده سلولزی و ماتریس پلیمری افزایش یافته و اتصالات بهتر و قوی‌تری و یکنواخت‌تری بین ماتریس و لیاف سلولزی ایجاد شده که می‌توان به این موضوع با در نظر گرفتن میزان فضاهای خالی و یکنواخت بودن سطوح شکسته شده در کامپوزیت پی برد.

چوب پلاستیک به عنوان یک جایگزین مناسب برای جعبه‌های چوبی در صنایع بسته‌بندی در حال رشد است. این ماده ترکیبی از لیاف چوب و پلیمر است که به دلیل ویژگی‌های خاص خود می‌تواند مزایای زیادی نسبت به چوب داشته باشد. چوب پلاستیک به طور طبیعی در برابر رطوبت، حشرات و پوسیدگی مقاوم است. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که چوب پلاستیک گزینه‌ای مناسب برای بسته‌بندی کالاهای حساس به رطوبت باشد [۲۰]. همچنین وزن سبک چوب پلاستیک به کاهش هزینه‌های حمل و نقل کمک می‌کند و همچنین امکان جایجایی آسان‌تر را فراهم می‌آورد [۲۱]. چوب پلاستیک معمولاً از مواد بازیافتی تولید می‌شود، که می‌تواند به کاهش زباله‌ها و مصرف منابع طبیعی کمک کند [۲۲]. چوب پلاستیک به راحتی قابل شکل‌دهی است، که به طراحان این امکان را می‌دهد تا بسته‌بندی‌های جذاب و متنوعی ایجاد کنند [۲۳]. چوب پلاستیک به عنوان یک جایگزین برای جعبه‌های چوبی در بسته‌بندی، نه تنها مزایای عملکردی دارد، بلکه به دلیل ویژگی‌های زیست‌محیطی، به ویژه در دنیای امروز که به پایداری اهمیت بیشتری داده می‌شود، جذابیت بیشتری پیدا کرده است.

این تحقیق به بررسی تأثیر میزان نانو سیلیس بر ویژگی‌های مکانیکی، حرارتی، و ریخت‌شناسی نانو چندسازه ساخته‌شده از آرد چوب و پلی و نیل کلراید ضایعاتی پرداخت و این نتایج حاصل گردید:

۱. با افزایش مقدار نانو سیلیس تا ۳ درصد وزنی، مقاومت کششی و خمشی، مدول خمشی و کششی، چندسازه افزایش یافته، سپس با افزودن مقدار تا ۹ درصد وزنی نانو سیلیس، این خواص کاهش می‌یابند. از طرفی با افزایش مقدار نانو سیلیس تا ۹ درصد وزنی مقاومت به ضربه فاق‌دار، چندسازه کاهش می‌یابد.
۲. با افزایش نانو سیلیس تا ۹ درصد ثبات حرارتی افزایش می‌یابد و میزان زغال بیشتری نیز باقی ماند.

پلیمرهای سخت و شکننده، ترک به راحتی رشد می‌کند، به نحوی که ذرات به عنوان شروع کننده ترک عمل کرده و مقاومت به ضربه را کاهش می‌دهند. کاهش مقاومت به ضربه در اثر اضافه شدن نانو سیلیس قابل پیش بینی بود، زیرا حضور نانو سیلیس سبب تردتر شدن چندسازه‌ها و کاهش مقاومت به ضربه آن‌ها می‌شود. وجود مواد نانو در ماتریس پلیمری سبب کاهش قابلیت تحرک زنجیرها و امکان اتلاف انرژی آن‌ها، افزایش انرژی جذب شده توسط چندسازه و ایجاد نقاط پرتنش می‌شود. این نقاط می‌تواند محل‌هایی برای شروع شکست و ترک باشند [۱۴]. نتایج نشان داد با افزایش نانو سیلیس ثبات حرارتی نمونه‌ها افزایش یافت. 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 (ظهور نیا ۱۳۸۹) و این نتیجه با نتایج دیگر محققین تطابق دارد [۱۵-۱۶]. البته میزان تأثیر نانو سیلیس‌ها در بهبود ثبات حرارتی به شرایطی از قبیل نوع پلیمر، نوع نانو سیلیس و شرایط فرآوری بستگی دارد و نانو سیلیس‌ها در بازه‌های دمایی بالاتر نیز باعث افزایش ثبات حرارتی می‌گردند. مهم‌ترین عامل در پایداری حرارتی که توسط ذرات نانو ایجاد می‌شود تشکیل یک لایه زغال مانند غیرقابل سوختن است و در نهایت به دلیل سطح ویژه بالا و سطح پوشش مناسب تأثیر بسزایی در پایداری حرارتی دارند [۱۷]. علاوه بر این افزایش پایداری حرارتی ممکن است به دلیل افزایش تعامل بین ماتریس پلیمری آرد چوب و نانو سیلیس باشد [۱۸]. در بررسی تأثیر نانو سیلیس بر ثبات حرارتی تحلیل‌های دیگری نیز وجود دارد. این موضوع را می‌توان عنوان کرد که در اثر افزودن مواد معدنی حرکت زنجیره‌های پلیمری کاهش می‌یابد که دلیل این موضوع و حرکت کمتر، برهمکنش مناسب بین پلیمر و ذرات نانو است [۱۷]. تخریب حرارتی با تشکیل رادیکال‌های آزاد شروع می‌شود که این رادیکال‌های آزاد باعث تحریک هر چه بیشتر فرآیندهای تخریب زنجیره پلیمری می‌گردد. میزان تخریب زنجیره‌های ماده پلیمری بستگی به حرکت رادیکال‌های آزاد از یک زنجیره به زنجیره دیگر و حرکت جز به جز در زنجیره‌های پلیمری دارد که به دلیل حضور ذرات نانو این اثر حرکت زنجیره‌ها کاهش پیدا کرده است و ثبات حرارتی افزایش یافت و باعث گردید فرآیند تخریب در دمایی بالاتر اتفاق افتد [۱۹]. علاوه بر ساختارهای محافظتی که نانو سیلیس مانند ساختار زغال مانند در برابر حرارت ایجاد می‌کند مکانیسم‌های دیگری هم برای کاهش اشتعال‌پذیری پیشنهاد شده است. بر اساس اطلاعات به دست آمده، مکانیسم پیشنهادی برای کاهش اشتعال‌پذیری به خاطر پیرولیز پلیمر و فروریختن ساختار نانو کامپوزیت برای تشکیل سد سیلیکات-کربن است که این سد پلیمر زیر لایه بکر (دست‌نخورده) را در برابر حرارت محافظت کرده و در نتیجه تبخیر سوخت را کند می‌کند [۱۵].



- [12] A. Amini, M. Farsi, M. Ebadi, F. M. Sani, and M. Shahbabaci, "Effect of microwave heat treatment on physical and mechanical properties of high-Density polyethylene/wood flour/Nano-SiO<sub>2</sub> composites," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 36(8), pp 3312-3331, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1177/08927057221128186>
- [13] M. Echarri-Giacchi, and J. M. Martín-Martínez, "Efficient Physical Mixing of Small Amounts of Nanosilica Dispersion and Waterborne Polyurethane by Using Mild Stirring Conditions," *Polymers*, vol. 14(23), pp 5136, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14235136>
- [14] A. H. Hemmasi, I. Ghasemi, B. Bazayar, and A. Samariha, "Studying the effect of size of bagasse and nanoclay particles on mechanical properties and morphology of bagasse flour/recycled polyethylene composites," *BioResources*, vol. 8(3), pp 3791-3801, 2013.
- [15] J. W. Gilman, A. B. Morgan, R. Harris, E. Manias, E. P. Giannelis, and M. Wuthenow, "Polymer layered-silicate nanocomposites: polyamide-6, polypropylene and polystyrene," In *FRCA* (pp 9-22). CRC Press. 2021.
- [16] B. W. Liu, H. B. Zhao, and Y. Z. Wang, "Advanced flame-retardant methods for polymeric materials," *Advanced Materials*, vol. 34(46), 2107905. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.202107905>
- [17] M. Nemati, H. K. Eslam, M. Taleipour, B. Bazayar, and A. Samariha, "Effect of nanoclay on flammability behavior and morphology of nanocomposites from wood flour and polystyrene materials," *BioResources*, vol. 11(1), pp 748-758, 2016.
- [18] M. Xanthos, (Ed.). *Functional fillers for plastics*. John Wiley & Sons. 2010.
- [19] N. PUTFAK, and A. Larpkasemsuk, "Wollastonite and talc reinforced polypropylene hybrid composites: Mechanical, morphological and thermal properties," *Journal of Metals, Materials and Minerals*, vol. 31(3), pp 92-99, 2021. DOI: <https://doi.org/10.55713/jmmm.v31i3.967>
- [20] D. J. Gardner, Y. Han, and L. Wang, "Wood-plastic composite technology," *Current Forestry Reports*, vol. 1, pp 139-150, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40725-015-0016-6>
- [21] J. K. Kim, K. Pal, J. K. Kim, and K. Pal, "Overview of wood-plastic composites and uses," *Recent advances in the processing of wood-plastic composites*, pp 1-22. 2011. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-14877-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-14877-4_1)
- [22] M. J. Schwarzkopf, and M. D. Burnard, "Wood-plastic composites—Performance and environmental impacts," *Environmental impacts of traditional and innovative forest-based bioproducts*, 19-43, 2016. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-0655-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-10-0655-5_2)
- [23] E. Soury, A. H. Behraves, E. R. Esfahani, and A. Zolfaghari, "Design, optimization and manufacturing of wood-plastic composite pallet," *Materials & Design*, vol. 30(10), pp 4183-4191, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.04.035>

۳. بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان داد با افزایش نانو سیلیس چسبندگی ضعیفتری بوجود آمد ولی همچنان حفرات و فضاهای خالی کمتر می‌شود.

## ۵- مراجع

- [1] D. Friedrich, "Success factors of Wood-Plastic Composites (WPC) as sustainable packaging material: A cross-sector expert study," *Sustainable Production and Consumption*, vol. 30 pp. 506-517. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.12.030>
- [2] S. Dharmadhikari, "Eco-friendly packaging in supply chain," *IUP Journal of Supply Chain Management*, vol. 9(2), pp 7, 2012.
- [3] A. Ashori, "Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries!," *Bioresource technology*, vol. 99(11), pp 4661-4667, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.043>
- [4] M. Y. Khalid and Z. U. Arif, "Novel biopolymer-based sustainable composites for food packaging applications: A narrative review," *Food Packaging and Shelf Life*, vol. 33, 100892, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100892>
- [5] S. K. Najafi, "Use of recycled plastics in wood plastic composites—A review," *Waste management*, vol. 33(9), pp 1898-1905, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.05.017>
- [6] R. A. Elsad, M. M. Habashy, M. A. Izzularab, and A. M. Abd-Elhady, "Evaluation of dielectric properties for PVC/SiO<sub>2</sub> nanocomposites under the effect of water absorption," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 34(9), pp 786, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10854-023-10199-y>
- [7] P. M. Ajayan, L. S. Schadler, and P. V. Braun, *Nanocomposite science and technology*. John Wiley & Sons. 2006.
- [8] 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: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2014.08.001>
- [9] P. M. Visakh, "Polyethylene terephthalate: blends, composites, and nanocomposites—state of art, new challenges, and opportunities. Poly (Ethylene Terephthalate) Based Blends," *Composites and Nanocomposites*, pp 1-14, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-31306-3.00001-4>
- [10] L. Bokobza, "Interfaces in Polymer Nanocomposites Characterized by Spectroscopic Techniques. Spectroscopic Techniques for Polymer Characterization: Methods," *Instrumentation, Applications*, pp 75-105, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/9783527830312.ch3>
- [11] B. Adak, M. Joshi, S. W. Ali, "Dyeability of polymer nanocomposite fibers," In *Nanotechnology in Textiles* (pp. 145-178). Jenny Stanford Publishing. 2020.