



## Investigation of the Physical and Mechanical Properties of Poly-caprolactone Bio-composite and Banana Fibre Reinforced with Nano Chitosan Polymer

Fateme Dehdest<sup>1\*</sup>, Mohammad Dahmardeh Ghalehno<sup>2</sup>, Babak Nosrati<sup>2</sup>,  
Saeid Reza Farrokhpayam<sup>2</sup>, Mohammad Shamsian<sup>2</sup>

1- Corresponding author, PhD student in wood and cellulose industry engineering, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran. Email: [Fatima.Dehdast61@gmail.com](mailto:Fatima.Dehdast61@gmail.com)

2-Associate Professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran

Received: September 2024

Accepted: September 2024

### Abstract

**Problem definition and objectives:** The aim of this research is the investigation of the physical and mechanical properties of polycaprolactone biocomposite and banana fibre reinforced with nano chitosan polymer for the improvement and development of biodegradable composites.

**Methodology:** In this study, bio-composites were prepared by combining poly caprolactone (PCL) granules with treated banana fibers (using a 10% sodium hydroxide solution) and untreated banana fibers. Additionally, 0.5%, 1%, and 2% nano-polymer chitosan were added to the composites. Subsequently, physical, mechanical, FTIR spectroscopy, thermal gravimetric analysis (TGA), and scanning electron microscopy (SEM) tests were conducted.

**Results:** The results indicate that chemical modification of banana fibers significantly improves the properties of wood-plastic composites. Increased density, reduced water absorption, and enhanced thickness swelling demonstrate the positive effects of these modifications. Furthermore, the addition of nano-polymer chitosan significantly improves flexural strength. Spectroscopic and thermal weight analysis confirm that chemical treatment and the inclusion of chitosan positively impact the stability and thermal properties of the composites.

**Conclusion:** Overall, this research highlights that chemical modifications and the addition of nano-polymer chitosan can lead to substantial improvements in the properties of wood-plastic composites, making them suitable options for various industrial applications.

**Keywords:** Bio-composites, banana fibers, nano-chitosan, polycaprolactone, biodegradability, mechanical resistance.

## بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی بیوکامپوزیت پلی‌کاپرولاکتون و الیاف موز تقویت شده با نانوپلیمر کیتوزان

فاطمه دهدست<sup>۱\*</sup>، محمد دهمرده قلعه نو<sup>۲</sup>، بابک نصرتی<sup>۱</sup>، سعید رضا فرخ پیام<sup>۲</sup>، محمد شمسیان<sup>۱</sup>

۱- نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری، مهندسی صنایع چوب و فرآورده‌های سلولزی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران، پست الکترونیک: Fatima.dehdast61@gmail.com  
۲- دانشیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران.

تاریخ پذیرش: شهریور ۱۴۰۳

تاریخ دریافت: خرداد ۱۴۰۳

### چکیده

**بیان مساله و اهداف:** هدف از انجام این پژوهش بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی بیوکامپوزیت پلی‌کاپرولاکتون و الیاف موز تقویت شده با نانوپلیمر کیتوزان برای بهبود و توسعه کامپوزیت‌های زیست تخریب پذیر می باشد.

**مواد و روشها:** در این پژوهش، بیوکامپوزیت با ترکیب گرانول‌های پلی‌کاپرولاکتون (PCL) و الیاف موز تیمار شده با محلول هیدروکسید سدیم ۱۰ درصد و الیاف موز بکر و همچنین افزودن ۰/۵، ۱ و ۲ درصد نانو پلیمر کیتوزان ساخته شدند. سپس آزمون‌های فیزیکی، مکانیکی، طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز، وزن‌سنجی حرارتی TGA و همچنین مطالعات میکروسکوپی با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد.

**نتایج:** نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تیمار شیمیایی الیاف موز به طریق معنی‌داری خصوصیات کامپوزیت چوب پلاستیک را بهبود می‌بخشد. افزایش دانسیته، کاهش جذب آب، و کاهش واکنش‌پذیری ضخامت نشان دهنده اثر مثبت این اصلاحات است. همچنین، افزودن نانوپلیمر کیتوزان نیز مقاومت‌های مکانیکی را بهبود می‌بخشد. طیف‌سنجی و وزن‌سنجی حرارتی نیز تأیید می‌کنند که تیمار شیمیایی و افزودن کیتوزان تأثیر مثبتی بر پایداری و خواص حرارتی کامپوزیت دارند.

**نتیجه‌گیری:** به طور کلی، این تحقیق نشان می‌دهد که تیمار شیمیایی و افزودن نانوپلیمر کیتوزان می‌تواند بهبودهای قابل توجهی در خواص کامپوزیت چوب پلاستیک ایجاد کند و به‌عنوان گزینه‌های مناسبی برای کاربردهای مختلف در صنعت مورد استفاده قرار گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** بیوکامپوزیت، الیاف موز، نانوکیتوزان، پلی‌کاپرولاکتون، زیست تخریب پذیر، مقاومت مکانیکی.

### مقدمه

که عمدتاً از مواد نفتی تولید می‌شوند و چرخه مصرفی آنها بسیار کوتاه اما تجزیه آنها در طبیعت سال‌های زیادی طول می‌کشد، منجر به تولید پسماندهای زیاد و مشکلات زیست‌محیطی خواهد شد [۱]. بنابراین، با توجه به نگرانی‌های زیست‌محیطی و تقاضا برای کاهش تولید پسماندهای

استفاده از مواد پلیمری به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی نظیر سبکی، فرآیندپذیری آسان، قیمت پایین و کارایی در بخش‌های مختلف به طور گسترده‌ای در حال افزایش می‌باشد. با این وجود مصرف بی‌اندازه این پلیمرها

محصولات نفتی، استفاده مجدد از این پلیمرها و تحقیقات برای تولید و توسعه مواد جدیدی مانند پلیمرهای زیست تخریب پذیر بررسی شد. پلیمرهای زیست تخریب پذیر، پلیمرهایی هستند که در صورت قرار گرفتن در معرض خاک با شرایط مساعد نظیر رطوبت، دما، تابش طیف فرابنفش، pH خاک و سایر عوامل همراه با فعالیت میکروارگانیسم‌های نظیر باکتری‌ها و قارچ‌ها و جلبک‌ها، در مدت زمان کوتاهی تجزیه می‌شوند و در نتیجه تجزیه آنها، آب، دی اکسید کربن، متان و بعضی ترکیبات مولکولی سازنده این پلیمرها تولید می‌شود [۲]. پلی-کاپرولاکتون<sup>۱</sup> (PCL)، از جمله این پلیمرهای زیست تخریب پذیر است که به عنوان یک پلی‌استر آلیفاتیک از طریق بسپارش چندتراکمی هیدروکسی کاپروئیک یا از طریق بازشدن حلقه ۶-کاپرولاکتون تولید می‌شود. این پلیمر زیست تخریب پذیر دارای برخی ویژگی‌های مکانیکی مناسب از قبیل مقاومت به ضربه و انعطاف پذیری است که دلیل انعطاف پذیری آن به دلیل دمای شیشه‌ای شدن پایین آن می‌باشد [۳]. رویکردهای جدید ساخت کامپوزیت‌ها که براساس توسعه پایدار است، از طریق ترکیب ویژگی‌های منحصربفرد مواد مختلف، منجر به موادی با کارایی مختلف خواهد شد. کامپوزیت‌های چوب-پلاستیک از جمله این مواد هستند که از بستر پلیمری با افزودن الیاف طبیعی مانند الیاف لیگنوسلولزی و برخی تقویت کننده‌ها ساخته می‌شوند. الیاف لیگنوسلولزی که به صورت آرد چوب در کامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، دارای قیمت ارزان، دانسیته پایین، مقاومت به سایش بالا و زیست تخریب پذیر هستند و به عنوان عامل تقویت کننده در کامپوزیت‌های چوب-پلاستیک مورد استفاده قرار می‌گیرند [۴]. ضایعات کشاورزی یکی از منابع مهم تامین کننده الیاف لیگنوسلولزی می‌باشند که برحسب مقدار تولید، ترکیبات شیمیایی و خواص مورد نظر محصول نهایی قابل استفاده می‌باشند. خواص کامپوزیت چوب پلاستیک متأثر از ترکیبات و روش تولید آن می‌باشد. در سال‌های اخیر، مطالعات گسترده‌ای در خصوص تولید و بررسی ویژگی‌های کامپوزیت چوب

پلاستیک با استفاده از پلیمرهای زیست تخریب پذیر و ضایعات کشاورزی و بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی صورت گرفته است تا از این کامپوزیت‌ها به عنوان یک محصول سبز در مصارف صنعتی استفاده نمود.

درخت موز پس از برداشت میوه آن، در هر هکتار ۲۰-۱۲ تن ضایعات خشک حاصل از ساقه و برگ تولید می‌کند که با توجه به سطح کشت تا ۵ تا ۶ هزار هکتار از این محصول در استان سیستان و بلوچستان و حجم تولید ۶۰-۱۰۰ هزار تن ضایعات به عنوان یک منبع لیگنوسلولزی ارزشمند شناخته می‌شود که از آن می‌توان برای تولید انواع مختلف محصولات لیگنوسلولزی نظیر خمیر کاغذ، فرآورده مرکب چوبی و کامپوزیت چوب پلاستیک استفاده کرد [۵]. یکی از راهکارهای ارائه شده توسط محققان استفاده از نانوذرات در تولید بیوکامپوزیت‌های تهیه شده از پلیمرهای زیست تخریب پذیر برای بهبود مقاومت‌های حرارتی و ویژگی‌های مکانیکی پایین در مقایسه با پلیمرهای مرسوم مانند پلی الفینی و پلی-استایرنی می‌باشد [۶]. Shahreki و همکاران (۱۴۰۰) با ساخت نانوکامپوزیت‌های سه جزئی پلی کاپرولاکتون/ پلی لاکتیک اسید و نانو کریستال سلولز، نشان دادند با افزودن نانوکریستال سلولز، واکنش هیدروژنی میان گروه‌های هیدروکسیل نانو کریستال سلولز با گروه‌های کربونیل پلی کاپرولاکتون و پلی لاکتیک اسید شکل گرفته و خواص مکانیکی و دینامیکی-مکانیکی بیوکامپوزیت ساخته شده بهبود یافت [۷]. Ridwan و همکاران (۲۰۲۱) اثر بنتونیت/کیتوزان را به عنوان پرکننده در کامپوزیت پلی-کاپرولاکتون/پلی لاکتیک اسید را بررسی و نشان دادند که افزودن این پرکننده منجر به بهبود خواص مکانیکی، حرارتی و زیست تخریب پذیری کامپوزیت شده است [۸]. Hossein و همکاران (۲۰۲۰) ، ویژگی‌های کامپوزیت ساخته شده با رزین پلی‌استر غیراشباع تقویت شده با الیاف درخت موز را بررسی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که با اضافه نمودن ۲۰ درصد وزنی الیاف موز به بستر پلیمر، مقاومت‌های کامپوزیت بهبود یافته و تنها طول شکست با افت محسوس همراه بوده است [۹]. همچنین، Tan و همکاران (۲۰۱۹) از کیتوزان به عنوان عامل جفت کننده برای کامپوزیت PCL والیاف شیشه استفاده نموده و

<sup>1</sup> Poly Caprolacton

محلول ۱:۱۰. یود. ابتدا محلولی با غلظت ۱۰ درصد هیدروکسید سدیم (NaOH) تهیه شد. سپس الیاف موز به مدت ۱۲ ساعت در محلول هیدروکسید سدیم به صورت کامل غوطه‌ور شدند، در پایان ۱۲ ساعت الیاف موز به وسیله آب مقطر شستشو داده شد. الیاف شستشو داده شده در دمای ۱۰۳ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن وزن ثابت خشک شد.

### فرایند اختلاط و آماده‌سازی بیوکامپوزیت

پس از انجام تیمار شیمیایی و خشک کردن الیاف موز، ابتدا الیاف تیمار شده با هیدروکسید سدیم و الیاف بکر (تیمار نشده)، گرانول‌های PCL و نانوکیتوزان براساس نسبت‌های وزنی مطابق با جدول ۱ مخلوط شدند. برای این منظور ابتدا مواد به صورت دستی مخلوط و سپس به درون محفظه دستگاه اکسترودر دو مار پیچه برابندر آلمانی ۲۰۰۲،  $L/D$  برابر ۴۰ و  $D$  برابر ۲۰ میلی‌متر ریخته شدند. نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اکسترودر واقع در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، با تنظیم دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد در همه بخش‌ها و سرعت چرخش ۶۰ دور بر دقیقه با یکدیگر ترکیب شدند و سرعت خروج مواد از دستگاه ۲ m/min می‌باشد.

ماده بی شکل تولید شده با استفاده از چاقو به قطعات مساوی بریده شده و در دمای محیط خنک‌سازی شد و مجدداً در دمای محیط نگه داری شد. برای تهیه پانل، مواد تهیه شده داخل قالب زیردستگاه پرس گرم mini test press ژاپنی ۲۰۰۲ مدل wch با دمای ۱۷۵°C، فشار پرس ۱۰۰MPa به مدت ۲ دقیقه حرارت دهی شد. سپس نمونه‌ها از قالب بیرون آورده شدند و عملیات خنک کردن قالب ۱ با دستگاه mini test press ژاپنی مدل WCH انجام شد. نمونه‌های استاندارد برای آزمون‌های کشش مطابق استاندارد ASTM D638، خمش مطابق استاندارد ASTM D790، ضربه و جذب آب و واکنش‌دهی ضخامت مطابق استاندارد ASTM D256 از پانل‌ها تهیه شد. در نهایت مشروط سازی نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM آیین‌نامه D618-99 در دمای ۲۱±۳ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵۰ درصد انجام شد.

نشان دادند که کیتوزان باعث بهبود مقاومت برش سطحی به میزان ۷۸ درصد شده است [۱۰]. در این مطالعه، به دلیل افزایش مصرف مواد پلیمری و نگرانی‌های زیست‌محیطی ناشی از تولید پسماندهای غیرقابل تجزیه، به بررسی تولید و بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی کامپوزیت‌های زیست‌تخریب‌پذیر پرداخته شده است. استفاده از پلی‌کاپرولاکتون به‌عنوان پلیمر پایه و ضایعات ساقه موز به‌عنوان الیاف تقویت‌کننده، همراه با نانوکیتوزان و تیمار قلیایی، به منظور بهبود خواص حرارتی و مکانیکی این کامپوزیت‌ها انجام شده است. این تحقیق نه تنها به توسعه مواد زیست‌تخریب‌پذیر و کاهش پسماندهای نفتی کمک می‌کند، بلکه با استفاده از ضایعات کشاورزی، راه‌حلی پایدار و اقتصادی برای تولید مواد کامپوزیتی با کارایی بالا ارائه می‌دهد. هدف اصلی این مقاله بررسی تأثیر افزودن نانوکیتوزان و تیمار قلیایی بر خواص مکانیکی و فیزیکی کامپوزیت پلی‌کاپرولاکتون و الیاف موز است.

### مواد و روش‌ها

#### مواد

مواد مورد استفاده در این پژوهش شامل پلی-کاپرولاکتون، با میانگین وزن مولکولی ۶۰۰۰۰ g/mol، دمای ذوب ۶۵-۶۰°C از شرکت eSUN™ چین خریداری شد. نانو پلیمر کیتوزان از شرکت نانو نوین پلیمر تهیه گردید. قطر الیاف نانو، در محدوده ۳۰-۲۰ نانومتر و طول آن‌ها در محدوده ۳۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر بود. همچنین، الیاف موز از منطقه چابهار تهیه و پس از شستشو، خشک کردن و آسیاب، با مش ۶۰ و ۸۰ جداسازی و برای تهیه بیوکامپوزیت مورد استفاده قرار گرفت. هیدروکسید سدیم (NaOH) از شرکت مرک آلمان با شدت نم گیر و نقطه ذوب ۳۱۸°C و چگالی ۲,۱۳ g/cm<sup>3</sup> تهیه گردید.

#### روش‌ها

##### تیمار شیمیایی الیاف موز

در این مرحله الیاف قبل از اختلاط با پلیمر به صورت جداگانه تیمار شیمیایی شدند. و نسبت وزنی الیاف موز به

جدول ۱- ترکیب درصدهای مختلف از کامپوزیت پلی کاپرولا DDتون/آرد الیاف موز/نانو پلیمر کیتوزان

| کد نمونه | پلی کاپرولا کتون (%) | آرد الیاف موز (%) | نانو پلیمر کیتوزان (%) |
|----------|----------------------|-------------------|------------------------|
| CB       | ۵۰                   | ۵۰                | ۰                      |
| CB/0.5   | ۴۹/۵                 | ۵۰                | ۰/۵                    |
| CB/1     | ۴۹                   | ۵۰                | ۱                      |
| CB/2     | ۴۸                   | ۵۰                | ۲                      |
| *TCB     | ۵۰                   | ۵۰                | ۰                      |
| TCB/0.5  | ۴۹/۵                 | ۵۰                | ۰/۵                    |
| TCB/1    | ۴۹                   | ۵۰                | ۱                      |
| TCB/2    | ۴۸                   | ۵۰                | ۲                      |

T\*الیاف تیمار شده با سدیم هیدروکسید ۱۰ درصد

## اندازه گیری خواص فیزیکی و مکانیکی

ویژگی های فیزیکی از جمله دانسیته، جذب آب و واکنش پذیری ضخامت بعد از ۲ و ۲۴ ساعت غوطه وری در آب طبق استاندارد ASTM آیین نامه D 7031-04 اندازه گیری شد. برای انجام این کار، ابتدا نمونه ها در ابعاد استاندارد تهیه و سپس به مدت ۲۴ ساعت در آن با دمای ۴۰ درجه سانتی گراد تا رسیدن به وزن ثابت قرار داده شدند. نمونه های خشک شده بلافاصله توزین ( $M_0$ ) و ابعاد آن ها ( $T_0$ ) اندازه گیری شدند. سپس به مدت ۲۴ ساعت در آب غوطه ور شدند (حجم آب پنج برابر حجم نمونه ها)، بعد از گذشت زمان های ۲ و ۲۴ ساعت، از آب خارج و وزن ( $M_t$ ) و ضخامت ( $T_t$ ) نمونه ها اندازه گیری شد. در نهایت مقدار جذب آب و واکنش پذیری ضخامت با استفاده از روابط ۱ و ۲ محاسبه شد.

$$WA(t) = \frac{W(t) - W(0)}{W(0)} \times 100 \quad (1)$$

$$TS(t) = \frac{T(t) - T(0)}{T(0)} \times 100 \quad (2)$$

که در آن،

$W_{(t)}$  = مقدار جذب آب در زمان مورد نظر (%)،  $W_{(0)}$  = وزن نمونه در زمان غوطه وری مورد نظر (gr)،  $W_{(0)}$  = وزن خشک نمونه قبل از غوطه وری (gr).

$TS_{(t)}$  = واکنش پذیری ضخامت در زمان مورد نظر (%)،  $T_{(t)}$  = ضخامت نمونه در زمان غوطه وری مورد نظر (mm)،  $T_{(0)}$  = ضخامت اولیه نمونه ها (mm)

آزمایش مقاومت کششی طبق استاندارد ASTM-D638 با سرعت بارگذاری ۵ میلیمتر بر دقیقه و مقاومت خمشی نمونه ها طبق استاندارد ASTM-D790 با سرعت بارگذاری ۲ میلیمتر بر دقیقه با استفاده از دستگاه SANTAM انجام شد (شکل ۱-الف). آزمون مقاومت به ضربه براساس استاندارد ASTM D-256 و دستگاه ضربه دیجیتالی از نوع پاندولی Izod انجام شد (شکل ۱-ب). آزمون های مکانیکی برای هر تیمار با ۵ تکرار انجام شد.



(ب)



(الف)

شکل ۱- دستگاه اندازه گیری مقاومت خمشی و مقاومت به ضربه، (الف) دستگاه SANTAM (ب) دستگاه ضربه دیجیتالی Izod

باشد که دارای ولتاژ ۲۵ کیلو ولت و محدوده بزرگ نمایی ۲۰ تا ۷۵۰۰۰ برابر می‌باشد.

### آنالیز آماری داده‌ها

داده‌های بدست آمده در نرم افزار اکسل وارد شده و پس از تهیه گزاره‌های توصیفی (میانگین، انحراف معیار)، تجزیه و تحلیل آماری نتایج با استفاده از نرم‌افزار SPSS در غالب طرح آماری کاملاً تصادفی فاکتوریل انجام شد و پس از مشاهده تفاوت معنی‌دار بین تیمارها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح اطمینان ۹۵ درصد برای مقایسه سطوح استفاده شد.

### نتایج و بحث

#### خواص فیزیکی

##### دانسیته

نتایج نشان می‌دهد که با تیمار شیمیایی الیاف موز، دانسیته به صورت معنی‌داری افزایش می‌یابد (شکل ۲). به طوری که کمترین میزان دانسیته مربوط به نمونه بدون تیمار، برابر با ۱/۰۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. در صورتی که در نمونه های تیمار شده با هیدرواکسید سدیم دانسیته برابر ۱/۰۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری شده و به

### طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه

(FTIR)

آزمون FTIR با استفاده از دستگاه مدل II TENSOR ساخت کمپانی BRUKER آلمان انجام شد. برای انجام این آزمون، نمونه‌ها به صورت پودر تهیه و استفاده شدند. طیف‌سنجی در دامنه عدد موجی  $4000-400$  و  $65$   $\text{cm}^{-1}$  پیمایش در هر ثانیه انجام شد.

### وزن‌سنجی حرارتی (TGA)

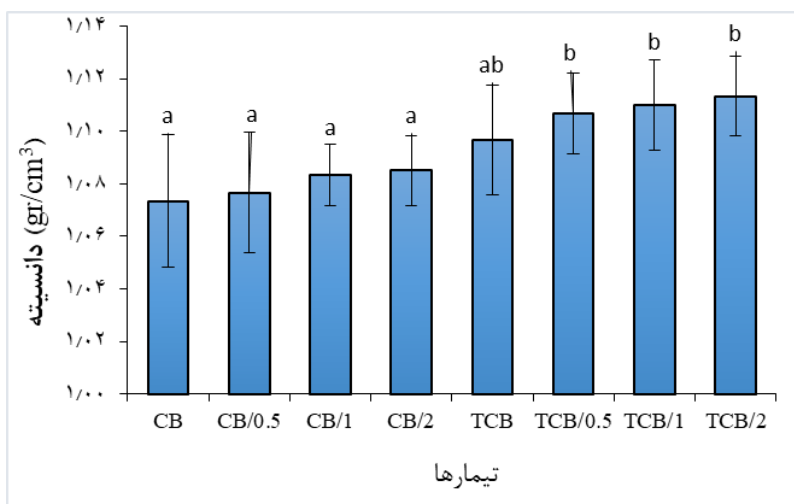
آنالیز وزن‌سنجی حرارتی کامپوزیت‌های ساخته شده در گستره دمایی ۲۵ تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد و با نرخ حرارت‌دهی  $20^\circ \text{C}/\text{min}$  در محیط نیتروژن با استفاده از دستگاه STGA ساخت شرکت Sanaf (تهران، ایران) مورد بررسی قرار گرفت.

### مطالعات میکروسکوپ الکترونی (SEM)

تصاویر میکروسکوپی از طریق برخورد الکترون‌ها به سطح نمونه‌ها، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی پوششی واقع در آزمایشگاه پژوهشگاه پلیمر و پترو شیمی ایران تهیه شد. مدل این دستگاه VEGA مونتاژ شده توسط شرکت TESCAN می‌-

افزودن نانو پلیمر کیتوزان به صورت جزئی موجب افزایش دانسیته کامپوزیت چوب پلاستیک می‌باشد. اما در بین نمونه‌های ساخته شده با افزودنی نانو پلیمر کیتوزان تفاوت معنی‌داری از نظر دانسیته مشاهده نشد.

صورت معنی‌داری افزایش یافت. با توجه به نتایج آنالیز واریانس و گروه بندی دانکن میانگین داده‌ها در دو گروه مختلف دسته بندی شدند. این افزایش دانسیته به دلیل تغییر در ساختار داخلی چوب و تغییرات در فضای میان ذرات می‌باشد [۳۳]. اگرچه،

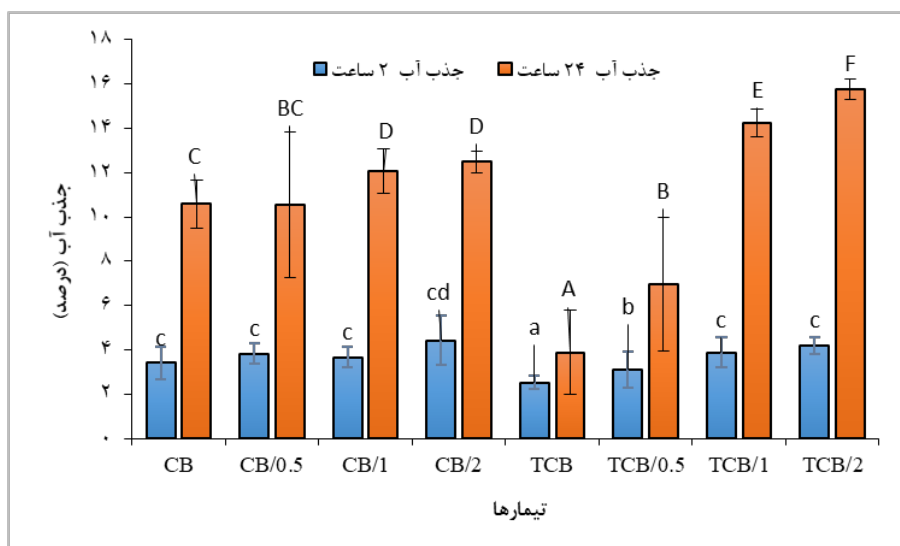


شکل ۲ تاثیر تیمار شیمیایی الیاف موز و افزودن نانو پلیمر کیتوزان بر دانسیته کامپوزیت‌ها

میزان جذب آب کامپوزیت‌ها به طور معنی‌داری افزایش پیدا کرد. افزودن کیتوزان به چوب پلاستیک موجب افزایش جذب آب آنها می‌شود زیرا کیتوزان یک پلیمر طبیعی است که از پوست خرچنگ‌ها به دست می‌آید. اگرچه کیتوزان در آب محلول نیست، اما در محلول‌های آبی رقیق اسیدهای آلی، دارای ویژگی‌های هیدروفیلیک (دوست دارنده آب) است [۱۲]. به عبارت دیگر، کیتوزان توانایی دارد که آب را به خود جذب کرده و نگه دارد. بنابراین، با افزودن کیتوزان به چوب پلاستیک، ویژگی هیدروفیلیک آن افزایش می‌یابد و به تبع آن، جذب آب نیز افزایش می‌یابد. اضافه کردن پلیمر کیتوزان می‌تواند باعث ایجاد تعاملات هیدروژنی با آب شود و در نتیجه جذب آب بیشتری را فراهم کند [۱۳].

### جذب آب

شکل ۳ مقادیر جذب آب پس از غوطه‌وری ۲ و ۲۴ ساعته در آب را نشان می‌دهد. براساس این شکل، با افزایش زمان غوطه‌وری میزان جذب آب افزایش پیدا کرده است. پیش تیمار قلیایی الیاف موز موجب کاهش میزان جذب آب در کامپوزیت‌های تهیه شده می‌شود، این امر می‌تواند به دلیل تغییرات شیمیایی در گروه‌های هیدروکسیل الیاف لیگنوسولولزی به واسطه تیمار قلیایی باشد. تیمار قلیایی الیاف سلولزی موجب کاهش گروه‌های OH می‌شود [۱۱]. پس از ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب کمترین میزان جذب آب در چوب پلاستیک ساخته شده با پلی‌کاپرولاکتون و الیاف موز پیش‌تیمار شده برابر ۳/۸۹ درصد مشاهده شد. همچنین قابل مشاهده است با افزودن کیتوزان به کامپوزیت بعد از ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب

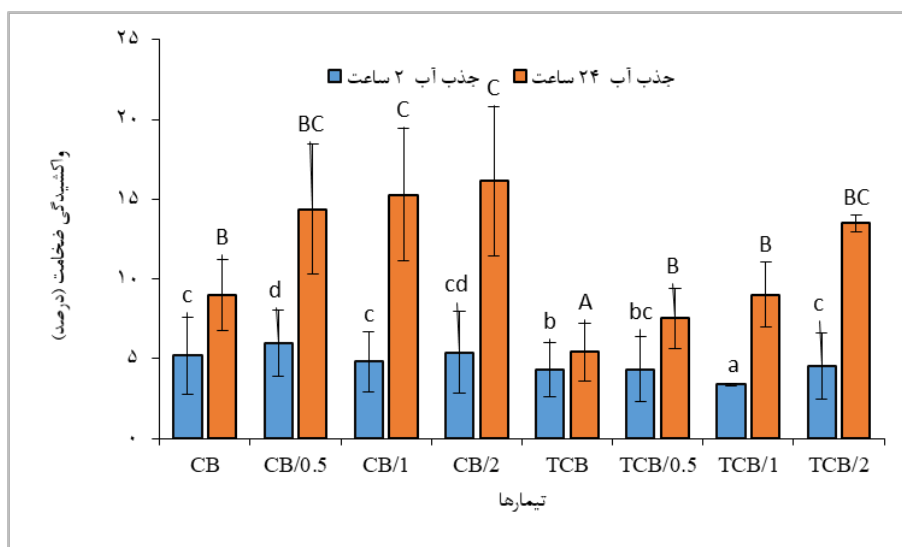


شکل ۳ تاثیر تیمار شیمیایی الیاف موز و افزودن نانو پلیمر کیتوزان بر مقدار جذب آب بعد از غوطه‌وری ۲ ساعت و ۲۴ ساعت کامپوزیت‌ها

#### واکسیدگی ضخامت

شکل ۴ مقادیر واکسیدگی ضخامت نمونه‌ها را بعد از ۲ ساعت و ۲۴ ساعت غوطه‌وری نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد، واکسیدگی ضخامت با افزایش زمان غوطه‌وری موجب کاهش میزان واکسیدگی ضخامت می‌شود. تیمار قلیایی باعث خروج بخشی از همی سلولزها و لیگنین از دیواره سلولی شده و باعث افزایش فضای خالی در ساختار الیاف مواد لیگنوسلولزی و همچنین محدود کردن گروه‌های هیدروکسیل می‌شوند [۱۴، ۱۵]. از جهت دیگر، افزودن نانو پلیمر کیتوزان به چوب پلاستیک می‌تواند به افزایش واکسیدگی ضخامت پس از غوطه‌وری در آب

منجر شود. این امر ممکن است به دلیل تعاملات هیدروژنی بین پلیمر کیتوزان و آب باشد [۱۶]. پلیمر کیتوزان با وجود گروه‌های آمین و هیدروکسیل خود، قابلیت تشکیل پیوندهای هیدروژنی با آب را دارد [۱۷]. این تعاملات هیدروژنی باعث می‌شود که ذرات آب به سطح چوب پلاستیک جذب شوند و در نتیجه ضخامت آن افزایش یابد. به طوری که بعد از ۲۴ ساعت غوطه‌وری، بیشترین میزان این کمیت مربوط به نمونه بدون پیش تیمار قلیایی و همراه با افزودنی ۲ درصد کیتوزان، برابر با ۱۶/۱۲ درصد و کمترین میزان آن مربوط به نمونه‌های تیمار شده با هیدروکسید سدیم، برابر با ۵/۴۲ درصد می‌باشد.



شکل ۴ تاثیر تیمار شیمیایی الیاف موز و افزودن نانو پلیمر کیتوزان بر مقدار واکنشیدگی ضخامت بعد از غوطه‌وری ۲ ساعت و ۲۴ ساعت کامپوزیت‌ها

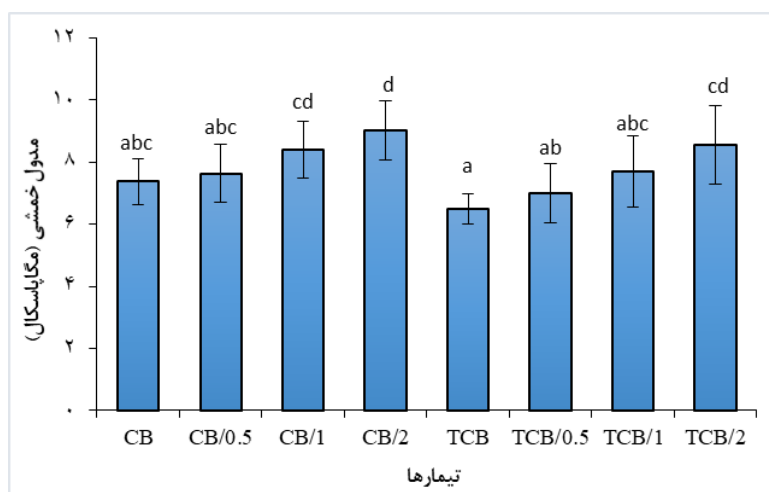
(MOR)، مربوط چوب پلاستیک ساخته شده با الیاف موز، تیمار شده با هیدروکسید سدیم برابر با ۶/۴۸ مگاپاسکال و بیشترین مقاومت خمشی مربوط به کامپوزیت‌های ساخته شده با افزودنی دو درصد نانو پلیمر کیتوزان برابر با ۹/۰۲ مگاپاسکال می‌باشد. افزودن نانو پلیمر کیتوزان در واقع می‌تواند مدول الاستیسیته (MOE) را در مواد کامپوزیتی افزایش دهد [۱۹]. حضور کیتوزان باعث بهبود تعامل سطحی در ماتریس پلیمری می‌شود و پیوندهای هیدروژنی قوی با فیبریل‌های سلولز و پیوندهای هیدروژنی بالقوه با پلیمر ایجاد می‌کند که منجر به تثبیت ساختاری و تقویت اتصالات بین ذرات می‌شود [۲۰]. این مکانیسم تقویتی منجر به افزایش مدول الاستیک، استحکام کششی، ازدیاد طول در هنگام شکست و چقرمگی مواد کامپوزیت می‌شود. علاوه بر این، سازگاری نانوذرات کیتوزان با ماتریس باعث افزایش خواص مکانیکی مانند استحکام کششی و مدول الاستیک می‌شود [۲۱]. بنابراین، افزودن نانو پلیمر کیتوزان به چوب پلاستیک ممکن است بهبود در هر دو مقاومت خمشی (MOR) و مدول الاستیسیته خمشی (MOE) را ایجاد کند، اغلب به علت تقویت و بهبود اتصالات میان ذرات و بهبود ویژگی‌های مکانیکی آنها است.

### ویژگی مکانیکی

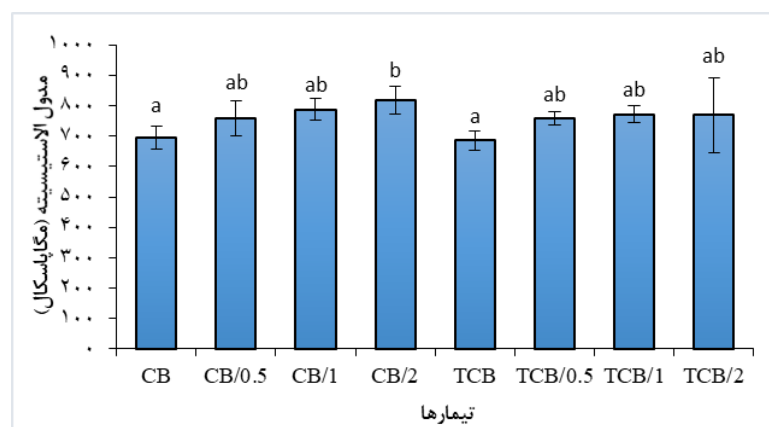
#### مقاومت خمشی (MOR)، مدول الاستیسیته

(MOE)

نتایج بررسی مقاومت خمشی (MOR) و مدول الاستیسیته (MOE) به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ گزارش شده، مقاومت خمشی در اثر تیمارهای شیمیایی با هیدروکسید سدیم به صورت معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد کاهش پیدا کرده است ( $\text{Sig} = 0.069$ ). نتایج مشابهی در مورد مدول الاستیسیته (MOE) مشاهده شد ( $\text{Sig} = 0.140$ ). تیمار قلیای الیاف موز ممکن است با تخریب ساختاری، کاهش مقاومت زمینه پلیمری و تغییرات شیمیایی منجر به کاهش مقاومت مکانیکی چوب پلاستیک شود [۱۸]. تخریب ساختاری الیاف لیگنوسلولزی باعث کاهش اتصالات بین الیاف چوب و مواد پلیمری می‌شود که در نتیجه مقاومت مکانیکی چوب پلاستیک کاهش می‌یابد. در مقابل افزودن نانو پلیمر کیتوزان موجب بهبود مقاومت خمشی چوب پلاستیک شد، و با افزایش درصد افزودنی نانو پلیمر کیتوزان به طور معنی‌داری موجب افزایش مقدار مقاومت خمشی چوب پلاستیک شد. این بهبود می‌تواند به علت تقویت و افزایش اتصالات بین ذرات چوب و مواد پلیمری باشد. با افزایش اتصالات و تراکم بهتر بین ذرات، مقاومت خمشی چوب پلاستیک افزایش می‌یابد. کم‌ترین میزان مقاومت خمشی



شکل ۵- اثر تیمارهای تیمار شیمیایی و افزودن نانو پلیمر کیتوزان بر مقاومت خمشی

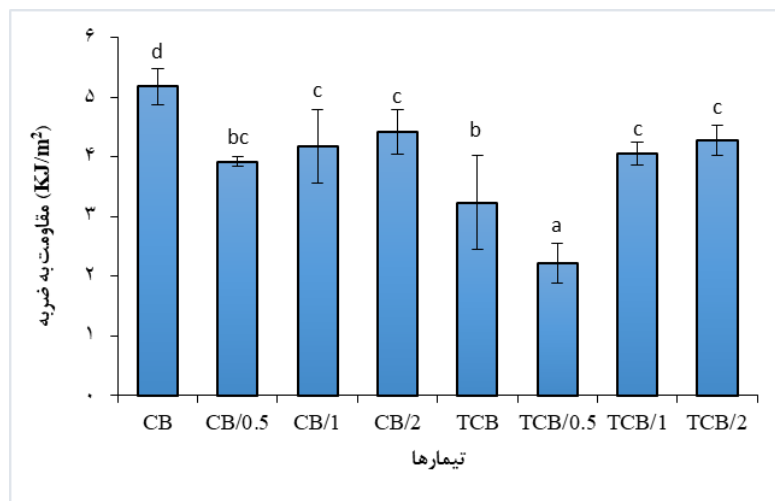


شکل ۶- اثر تیمارهای تیمار شیمیایی و افزودن نانو پلیمر کیتوزان بر مدول الاستیسیته

### مقاومت به ضربه

مقادیر مقاومت به ضربه نمونه‌های چوب پلاستیک در شکل ۷ خلاصه شده است. تیمار شیمیایی الیاف موز با هیدروکسید سدیم مقاومت به ضربه را به طور معنی داری کاهش می‌دهد و گروه بندی دانکن میانگین داده‌ها را در گروه‌های مجزا دسته بندی کرد (Sig= ۰ / ۰۰۰). این کاهش مقاومت در برابر ضربه را می‌توان به تغییر در ساختار فیبر الیاف موز به واسطه غلظت بالا هیدروکسید سدیم استفاده شده در این پژوهش نسبت داد که ممکن است بر عملکرد مکانیکی کلی مواد کامپوزیت تأثیر بگذارد [۲۲]. Rajeshkumar و همکاران (۲۰۲۱)، تیمار قلیایی خواص سطحی الیاف را تغییر می‌دهد، پیوند بین سطحی و عملکرد مکانیکی کلی را بهبود می‌بخشد [۲۳]. علاوه بر

این، تیمار قلیایی تغییرات مویرگی در حفره‌های الیاف موز ایجاد می‌کند این ممکن است طور بالقوه کاهش مقاومت ضربه را در سناریوهای خاصی توضیح دهد [۲۴]. همچنین قابل مشاهده است افزودن نانوپلیمر کیتوزان به طور معنی‌داری باعث کاهش مقاومت به ضربه کامپوزیت چوب پلاستیک می‌شود (جدول-۲). افزودن نانوپلیمر کیتوزان با تشکیل پیوندهای هیدروژنی قوی و پیوندهای کووالانسی بالقوه با ماتریس پلیمر باعث افزایش چقرمگی و شکنندگی و کاهش مقاومت به ضربه کامپوزیت‌های چوبی می‌شوند. فیلم‌های کامپوزیت کیتوزان با سلولز نانوفیبریلی از خواص مکانیکی بهتری مانند افزایش مدول یانگ و مقاومت کششی نشان می‌دهند که ممکن است بر مقاومت ضربه تأثیر منفی بگذارد [۲۴].

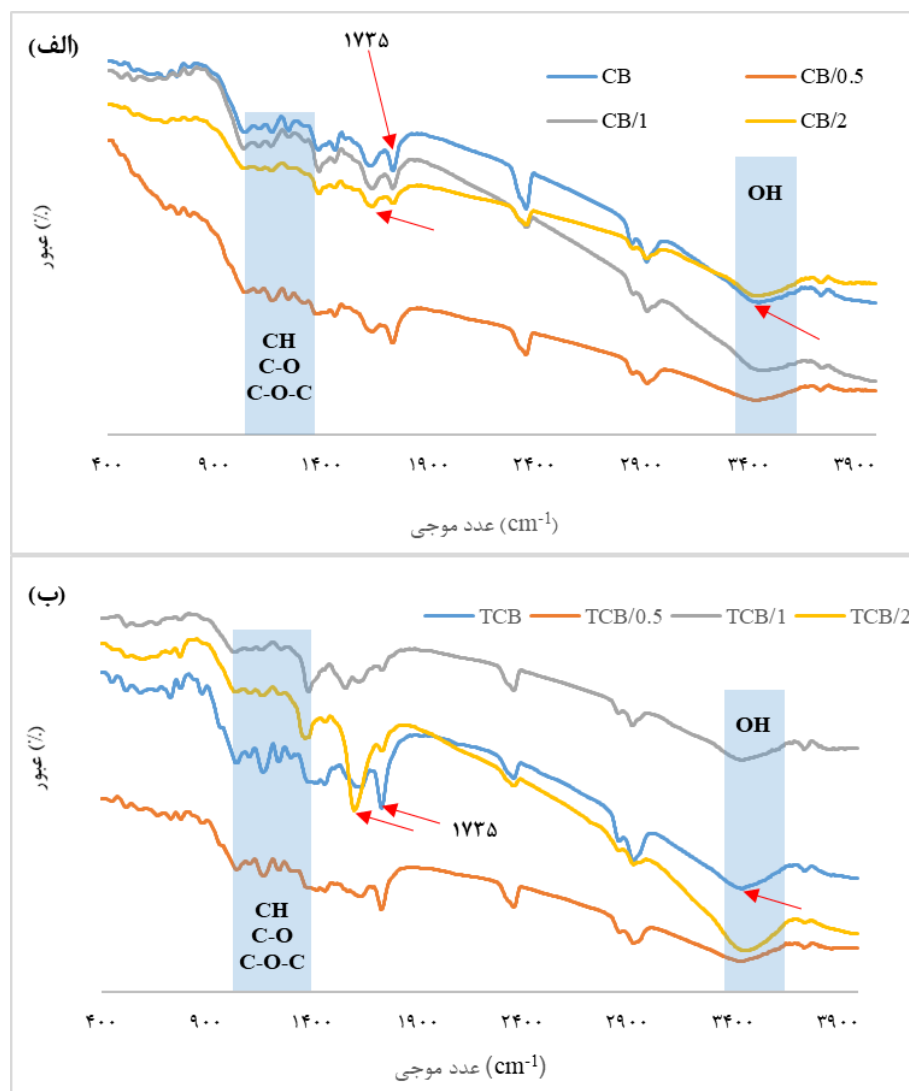


شکل ۷- اثر تیمارهای تیمار شیمیایی و افزودن نانو پلیمر کیتوزان بر مقاومت به ضربه کامپوزیت چوب پلاستیک

سلولز نسبت داده می شود [۲۸]. شدت پیک در این نقطه در نمونه‌های تیمار شده با هیدرواکسید سدیم بیش تر شده است، در نمونه های با افزودنی کیتوزان شدت نسبتا کمتری مشاهده شد. این میتواند به دلیل تخریب و شسته شدن موارد ذکر شده به سطح الیاف باشد. شدت پیک در حدود  $1640-1600\text{ cm}^{-1}$  نشان دهنده وجود هیدرات‌ها و گروه های هیدروکسیل ( $\text{-OH}$ ) است که در سلولز و همی سلولز فیبر وجود دارد [۲۹]. این پیک در نمونه های ساخته شده با کیتوزان در درصدهای بالا شدت بیشتری دارند. پیک‌های در محدوده  $1400-800\text{ cm}^{-1}$ ، از جمله پیک‌های  $1367$ ،  $1320$ ،  $1240$  و  $1100-895$  به خمش پیوندهای  $\text{CH}$  سلولز و همی سلولز، ارتعاشات  $\text{CH}_2$  سلولز و همی سلولز، کشش  $\text{C-O}$  سلولز و ارتعاشات پیوندهای  $\text{C-O-C}$  اختصاص داده شده است [۳۰]. شدت پیک‌ها در این محدوده بر اثر تیمار شیمیایی افزایش پیدا کرده است و با افزودن نانوپلیمر کیتوزان شدت پیک‌ها کاهش پیدا کرد و با افزایش درصد نانو پلیمر کیتوزان پیک‌ها در این ناحیه حذف می‌شوند.

#### طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادونقرمز (FTIR)

طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز برای کامپوزیت‌های ساخته شده با الیاف موز بدون تیمار و تیمار شده همراه با افزودنی نانو پلیمر کیتوزان در شکل ۸ نشان داده شده است. بر اساس این طیف‌ها، انجام تیمار شیمیایی الیاف موز، میزان جذب گروه هیدروکسیل در باند جذبی  $3460-3400\text{ cm}^{-1}$  کاهش پیدا کرده که نشان دهنده انجام تیمار فعال الیاف موز است. کاهش پیک در این محدوده می‌تواند به معنی توسعه منطقه آمورف سلولزی در اثر حذف گروه‌های هیدروکسیل در الیاف موز باشد [۲۵]. همچنین قابل مشاهده است در نمونه‌های حاوی افزودنی نانوپلیمر کیتوزان دامنه و شدت پیک‌ها در این محدوده بیشتر است. نانو پلیمر کیتوزان حاوی گروه‌های فعال هیدروکسیل ( $\text{OH}$ ) است. این گروه‌های هیدروکسیل، به عنوان گروه‌های عامل، در تعاملات شیمیایی و خواص زیستی کیتوزان نقش مهمی ایفا می‌کنند [۲۶]. پیک‌های  $1735\text{ cm}^{-1}$  یک نوار پیچیده است که به ارتعاش کششی  $\text{C=O}$  گروه های استیل یا کربوکسیل اختصاص داده شده است [۲۷]، که به همی سلولز و همچنین به محصولات جانبی تخریب لیگنین و



شکل ۸- طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادونقرمز (FTIR)، الف) کامپوزیت‌های بدون پیش تیمار قلبیایی، ب) کامپوزیت‌های با پیش تیمار قلبیایی

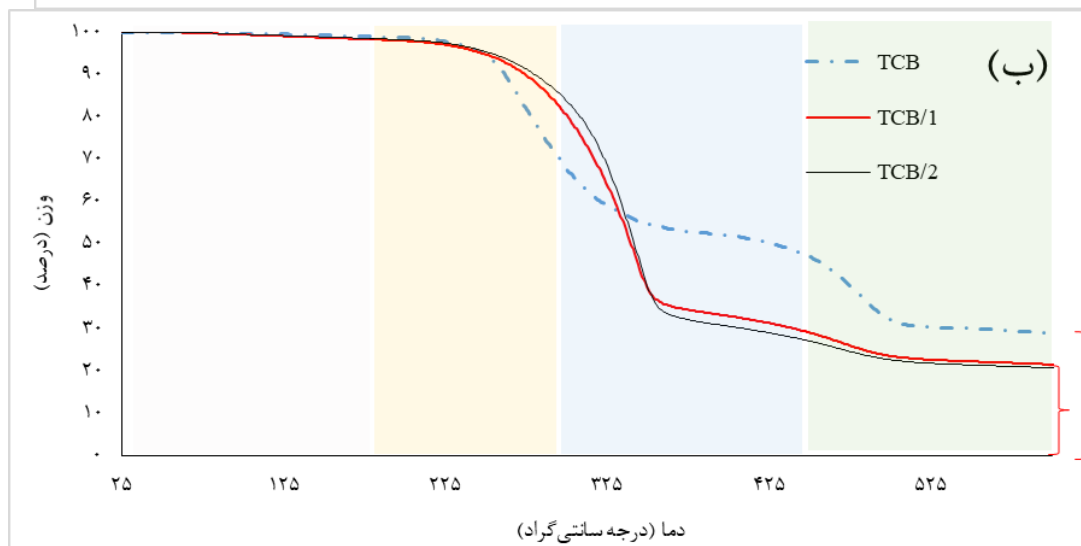
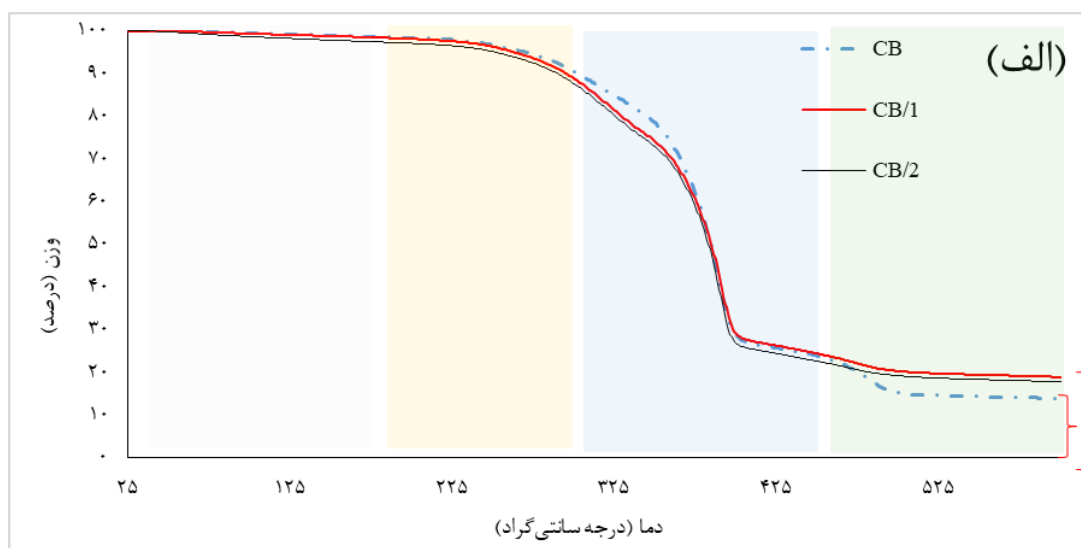
ساخته شده با الیاف تیمار شده با NaOH اگر چه زودتر شروع به تخریب شدن می‌کنند اما مقاومت بالاتری نسبت نمونه شاهد در برابر حرارت‌دهی داشته و در پایان ۲۸ درصد از نمونه باقی ماند. در نمونه‌های ساخته شده با الیاف تیمارنشده ۱۳ درصد از وزنی نمونه باقی ماند. اولین تجزیه در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد شروع شد که منجر به کاهش وزن به دلیل تبخیر آب و بخار در فیبر و چوب پلاستیک شد. در ابتدا شیب نمودار ثابت است و به صورت افقی حرکت می‌کند. این سیر افقی نمودار نشان دهنده این است که ماده خالص است و دارای مواد ناخالصی و یا رطوبت نیست (در نمونه‌های تیمار شیمیایی شده).

### آزمون وزن سنجی حرارتی (TGA)

آنالیز وزن‌سنجی حرارتی (TGA) یکی از روش‌های آنالیز حرارتی است که می‌تواند برای اندازه‌گیری تغییر جرم، تجزیه حرارتی و پایداری حرارتی مواد کامپوزیتی استفاده شود. پایداری حرارتی مواد به عنوان دمای ویژه و یا محدوده دمایی- زمانی مشخص تعریف می‌شود که در آن یک ماده می‌تواند بدون کاهش وزن زیاد استفاده شود [۳۱]. منحنی‌های TGA، چهار مرحله تجزیه حرارتی الیاف موز، در ماتریس چوب پلاستیک در دو حالت بدون تیمار (شکل ۹-الف) و تیمار شده با هیدروکسید سدیم (شکل ۸-ب) را در شکل ۹ نشان می‌دهد. نمونه‌های

مشاهده شد. سلولز در نمونه‌های شاهد از دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد شروع به تخریب می‌کند و با شیب ملایمی تا دمای ۲۶۰ الی ۲۷۰ درجه سانتی‌گراد و سپس به صورت شدید تخریب چوب (سلولز) صورت می‌گیرد.

تجزیه دوم و سوم در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد تا ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد شروع شد که مشاهده شد که کاهش وزن به دلیل تخریب همی سلولز، سلولز و لیگنین است [۳۲]. مرحله آخر یا چهار، وزن باقیمانده خاکستر است که



شکل ۹- وزن سنجی حرارتی (TGA)، الف) کامپوزیت‌های بدون پیش تیمار قلیایی، ب) کامپوزیت‌های با پیش تیمار قلیایی

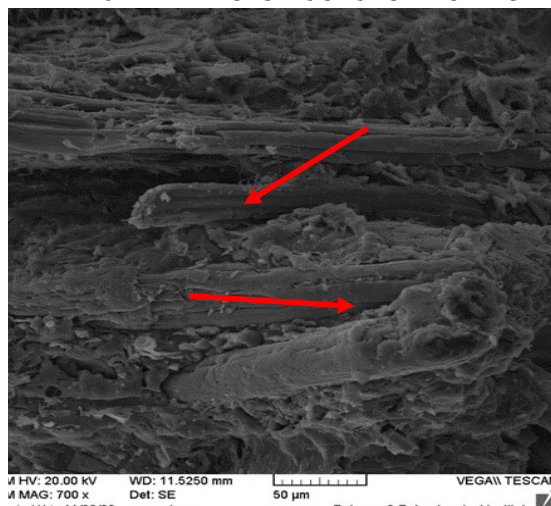
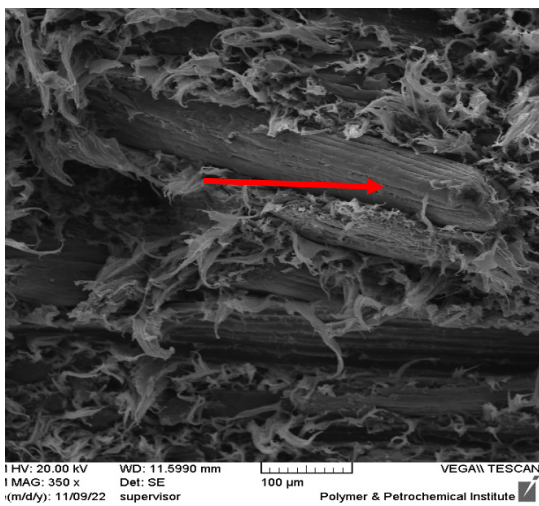
داخل ماتریس پلیمری خارج شده و باعث ایجاد فضاهای خالی در داخل ماتریس چوب پلاستیک می‌شود. در تصاویر مربوط به نمونه‌های شاهد نتیجه برهمکنش ضعیف بین دو فاز چوب و پلیمر قابل مشاهده است (شکل ۱۰-الف). این بیرون زدگی الیاف موز بیان کننده سطح مشترک ضعیفی بین الیاف و پلیمر به دلیل عدم سازگاری

### تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی

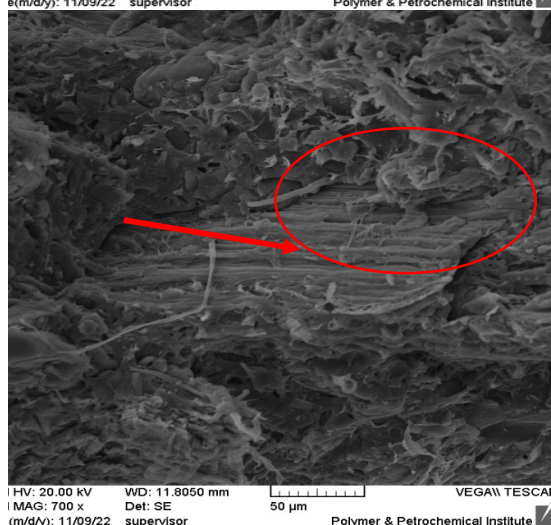
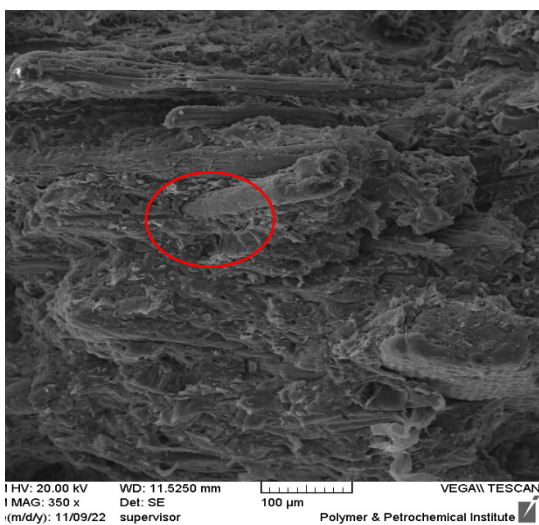
تصویر میکروسکوپ الکترونی پویشی در نمونه بدون تیمار در شکل ۱۰ نشان داده شده است. بیرون زدگی‌های الیاف موز از ماتریس پلیمری مشاهده می‌شود. در واقع هنگام شکست نمونه، الیاف به صورت سالم در

شاهد بهبود یافته است. اگر چه تیمار شیمیایی الیاف با هیدروکسید سدیم، موجب فعال سازی و بهبود چسبندگی سطح الیاف با ماتریس پلیمری می شود، اما این تیمار می تواند به ترک های ریز داخلی و فرسایش سطحی الیاف منجر شود. این ترک ها و فرسایش های سطحی، به طور کلی، خواص مکانیکی الیاف را تضعیف می کنند. بنابراین، هر چند تصاویر میکروسکوپی بهبود چسبندگی سطح الیاف و پلیمر را نشان می دهند، اما کاهش خواص مکانیکی می تواند ناشی از آسیب های ساختاری الیاف در اثر تیمار شیمیایی باشد. این تناقض ظاهری بین تصاویر میکروسکوپی و نتایج خواص مکانیکی ناشی از اثرات متفاوت و متضاد تیمار شیمیایی بر سطح و ساختار داخلی الیاف است.

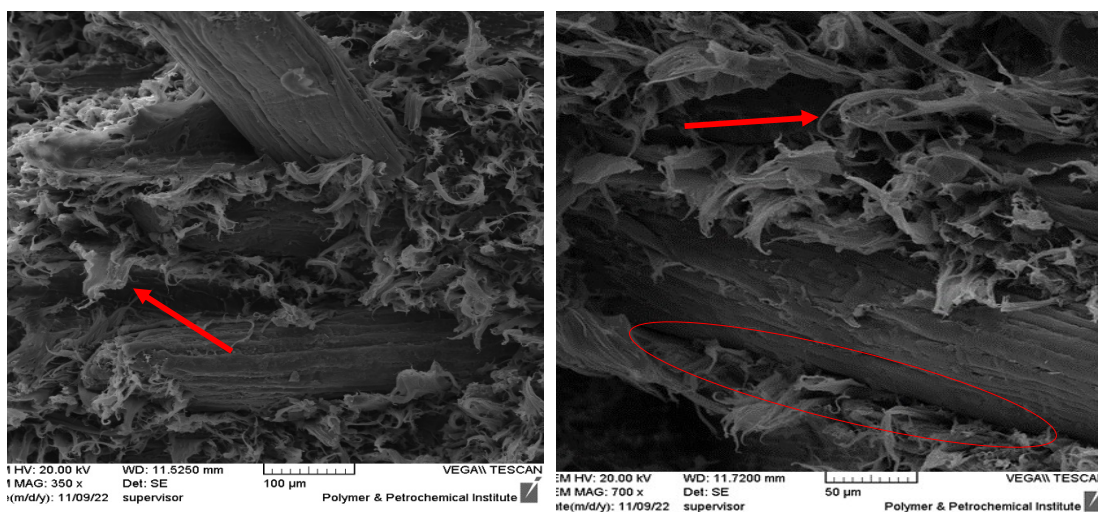
بین آنها وجود دارد. اما در اثر تیمار شیمیایی این سطح مشترک تقویت می شود و همانطور که مشاهده می شود بیرون زدگی الیاف از داخل ماده زمینه کمتر مشاهده می شود. تصویر میکروسکوپ الکترونی پوششی در نمونه تیمار شده با هیدروکسید سدیم شیارها و سطح فعال تری نشان داده شده است، در بعضی از مناطق که فعل و انفعال بین چوب و پلیمر بیشتر است، بیرون زدگی الیاف کمتر مشاهده می شود. همچنین به هم پیوستگی بیشتری و یک پارچگی بهتری بین الیاف موز و پلیمر مشاهده می شود (شکل ۱۰-ب). در تیمار قلیایی و حضور نانو پلیمر کیتوزان (به عنوان تقویت کننده) نیز فعل و انفعال بیشتر و چسبندگی قوی تری بین ماتریس مشاهده می شود. به طوری که در این اشکال مشاهده می شود، چسبندگی و اتصال فصل مشترک بین دو فاز و ماتریس نسبت به نمونه



(ب)



(د)



شکل ۱۰- تصویر میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) کامپوزیت چوب پلاستیک، الف) شاهد، ب) نمونه های هیدروکسید سدیم، ج) نمونه های با افزودنی نانو پلیمر کیتوزان

پلیمر کیتوزان بهبود قابل توجهی در این ویژگی‌ها ایجاد می‌کند. همچنین، تیمار قلیایی و افزودن کیتوزان مقاومت به ضربه کامپوزیت را کاهش داد. با توجه به نتایج طیف-سنجی FTIR، تحلیل TGA و تصاویر میکروسکوپ الکترونی، تیمار شیمیایی الیاف موز باعث بهبود مواد کامپوزیتی شده و ارتباط بین فازهای چوب و پلیمر تقویت می‌شود. افزودن نانو پلیمر کیتوزان نیز باعث افزایش چسبندگی و بهبود ویژگی‌های مکانیکی مواد می‌شود. به صورت کلی، این مطالعه نشان می‌دهد که ترکیب الیاف موز و کیتوزان می‌تواند بهبود قابل توجهی در ویژگی‌های مکانیکی کامپوزیت‌های چوب پلاستیک حاصل از پلیمر زیستی نظیر پلی‌کاپرولاکتون ایجاد کند. این روش‌ها می‌توانند جذابیت واحدهای صنعتی چوب پلاستیک را افزایش داده و موادی با عملکرد بهتر و ارتباط فازی بهتر بین چوب و پلیمر تولید کنند.

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش، بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی و همچنین مطالعات میکروسکوپی کامپوزیت الیاف پلاستیک ساخته شده از پلی‌کاپرولاکتون با الیاف موز و استفاده از افزودنی نانو پلیمر کیتوزان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که تیمار شیمیایی الیاف موز به طور معنی‌داری دانسیته را افزایش می‌دهد. افزودن نانو پلیمر کیتوزان نیز دانسیته را افزایش می‌دهد، اما تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. تیمار قلیایی الیاف موز با ایجاد تغییرات شیمیایی در گروه‌های عاملی الیاف موز موجب کاهش جذب آب می‌شود، در حالی که افزودن کیتوزان باعث افزایش جذب آب چوب پلاستیک می‌شود. تیمار شیمیایی الیاف موز با هیدروکسید سدیم باعث کاهش مقاومت خمشی (MOR) و مدول الاستیسیته (MOE) چوب پلاستیک می‌شود، در حالی که افزودن نانو

centrifugal spun polycaprolactone fibers: A Comparative Study.

- [4] Liikanen, M., Grönman, K., Deviatkin, I., Havukainen, J., Hyvärinen, M., Kärki, T. et al., 2019. Construction and demolition waste as a raw material for wood polymer composites—Assessment of environmental impacts. *Journal of Cleaner Production*, 225, pp.716-727.
- [5] Sokhandan Sorkhabi, T., 2015. Determination and Prioritization of Effective Criteria in Construction of Particleboard Factories with Using Wastes of

## منابع

- [1] Rajmohan, K.V.S., Ramya, C., Viswanathan, M.R. and Varjani, S., 2019. Plastic pollutants: effective waste management for pollution control and abatement. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 12, pp.72-84.
- [2] Rudnik, E., 2019. *Compostable polymer materials*. Newnes.
- [3] Kuželová Košťáková, E., Blažková, L., Lukáš, D. and Mašková, G., 2017. Crystallinity of Electrospun and

- [16] Qiao, C., Ma, X., Zhang, J. and Yao, J., 2019. Effect of hydration on water state, glass transition dynamics and crystalline structure in chitosan films. *Carbohydrate Polymers*, 206, pp.602-608.
- [17] Branca, C., D'Angelo, G., Crupi, C., Khouzami, K., Rifici, S., Ruello, G. and Wanderlingh, U., 2016. Role of the OH and NH vibrational groups in polysaccharide-nanocomposite interactions: A FTIR-ATR study on chitosan and chitosan/clay films. *Polymer*, 99, pp.614-622.
- [18] Olakanmi, E.O., Ogunesan, E.A., Vunain, E., Lafia-Aragá, R.A., Doyoyo, M. and Meijboom, R., 2016. Mechanism of fiber/matrix bond and properties of wood polymer composites produced from alkaline-treated Daniella oliveri wood flour. *Polymer Composites*, 37(9), pp.2657-2672.
- [19] Santillo, C., Wang, Y., G., Buonocore, G., Gentile, G., Verdolotti, L., Kaciulis, S., Xia, H., Lavorgna, M., 2022. Hybrid Graphene Oxide/Cellulose Nanofillers to Enhance Mechanical and Barrier Properties of Chitosan-Based Composites. *Frontiers in Chemistry*, doi: 10.3389/fchem.2022.926364
- [20] Lamm, M.E., Li, K., Ker, D., Zhao, X., Hinton, H.E., Copenhaver, K., Tekinalp, H., Ozcan, S., 2022. Exploiting chitosan to improve the interface of nanocellulose reinforced polymer composites. *Cellulose*, doi: 10.1007/s10570-021-04327-2
- [21] Adelaja, O., Daramola, O.E., 2022. Preparation and Characterization of Low-Density Polyethylene-Chitosan Nanoparticles Biocomposite as a Source of Biodegradable Plastics. *European Journal of Advanced Chemistry Research*, doi: 10.24018/ejchem.2022.3.1.85
- [22] Fu, J., He, C., Jiang, C., Chen, Y., 2019. Degradation Resistance of Alkali-Treated Eucalyptus Fiber Reinforced High Density Polyethylene Composites as Function of Simulated Sea Water Exposure. *Bioresources*, 14(3), pp.6384-6396.
- [23] Rajeshkumar, G., Hariharan, V., Indran, S., Sanjay, M.R., Siengchin, S., Prakash, J., Al-Dhabi, N.A., Karupiah, P., 2021. Influence of Sodium Hydroxide (NaOH) Treatment on Mechanical Properties and Morphological Behaviour of Phoenix sp. Fiber/Epoxy Composites. *Journal of Polymers and The Environment*, 29(3), pp.765-774. doi: 10.1007/S10924-020-01921-6
- [24] Jampilek, J., Kráľová, K., 2020. Benefits of Chitosan-Based and Cellulose-Based Nanocomposites in Food Protection and Food Packaging. pp.121-160. doi: 10.1007/978-3-030-61985-5\_5
- [25] Ghasemi, I. and Farsi, M., 2010. Interfacial behavior of wood plastic composite: effect of chemical treatment on wood fibers. *Iran Polymer Journal*, 19, pp.10.811-818.
- Tamarisk, Palms and Musa Trees Case Study: Sistan and Baluchestan province. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 6(1), pp.13-29.
- [6] Balart, R., Montanes, N., Dominici, F., Boronat, T. and Torres-Giner, S., 2020. Environmentally friendly polymers and polymer composites. *Materials*, 13(21), pp.4892.
- [7] Shahreki, A., Nosrati Sheshkal, B., Jonoobi, M., Abdouss, M. and Dahmardeh Ghalehno, M., 2021. Poly-capro-lactone/poly-lactic acid/cellulose nano crystal three-component nanocomposites: Manufacturing, mechanical, dynamic-mechanical and morphological investigation. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 12(2), pp.217-234.
- [8] Rihayat, T. and Aidy, N., 2023. The role of poly (lactic acid)/chitosan nanocomposites blend in manufacture non-cytotoxic basic bio scaffold. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2431, No. 1). AIP Publishing.
- [9] Hossain, M.S., Mobarak, M.B., Rony, F.K., Sultana, S., Mahmud, M. and Ahmed, S., 2020. Fabrication and characterization of banana fiber reinforced unsaturated polyester resin-based composites. *Nano Hybrids and Composites*, 29, pp.84-92.
- [10] Tan, C., Rudd, C., Parsons, A., Sharmin, N., Zhang, J., Chen, W. and Ahmed, I., 2018. Chitosan as a coupling agent for phosphate glass fibre/polycaprolactone composites. *Fibers*, 6(4), pp.97.
- [11] Kathiresan, S. and Meenakshisundaram, O., 2022. Effect of alkali treated and untreated cellulose fibers and human hair on FTIR and tensile properties for composite material applications. *SN Applied Sciences*, 4(3), pp.74.
- [12] Piekarska, K., Sikora, M., Owczarek, M., Jóźwik-Pruska, J. and Wiśniewska-Wrona, M., 2023. Chitin and Chitosan as Polymers of the Future—Obtaining, Modification, Life Cycle Assessment and Main Directions of Application. *Polymers*, 15(4), pp.793.
- [13] Dan, S., Banivaheb, S., Hashempour, H. and Kalantari, M., 2021. Synthesis, characterization and absorption study of chitosan-g-poly (acrylamide-co-itaconic acid) hydrogel. *Polymer Bulletin*, 78, pp.1887-1907.
- [14] Megashah, L.N., Ariffin, H., Zakaria, M.R. and Ando, Y., 2018. Characteristics of cellulose from oil palm mesocarp fibres extracted by multi-step pretreatment methods. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 368, No. 1, p. 012001). IOP Publishing.
- [15] Sepe, R., Bollino, F., Boccarusso, L. and Caputo, F., 2018. Influence of chemical treatments on mechanical properties of hemp fiber reinforced composites. *Composites Part B: Engineering*, 133, pp.210-217.

- [30] Céline, A., Gonçalves, O., Jacquemin, F. and Fréour, S., 2014. Qualitative and quantitative assessment of water sorption in natural fibres using ATR-FTIR spectroscopy. *Carbohydrate Polymers*, 101, pp.163-170.
- [31] Stolov, A.A., Simoff, D.A. and Li, J., 2008. Thermal stability of specialty optical fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 26(20), pp.3443-3451.
- [32] Berhanu, T., Kumar, P. and Singh, I., 2014. Mechanical behaviour of jute fibre reinforced polypropylene composites. In *Proceedings of 5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014) December 12th-14th, IIT Guwahati, Assam, India*.
- [33] Joutsimo, O., 2004. Effect of mechanical treatment on softwood kraft fiber properties. Helsinki University of Technology.
- [26] Kalagar, M., Baziyar, B., Khademi Eslam, H., Ghasmi, E. and Hemmasi, A.H., 2015. The investigation on composites produced using polylactic acid/wheat straw fibers treated with silane. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 30(2), pp.207-219. (In Persian)
- [27] Petroni, S., Tagliaro, I., Antonini, C., D'Arienzo, M., Orsini, S., Mano, J.F., Brancato, V., Borges, J., Cipolla, L., 2023. Chitosan-Based Biomaterials: Insights into Chemistry, Properties, Devices, and Their Biomedical Applications. *Marine Drugs*, 21(3), pp.147-147. doi: 10.3390/md21030147
- [28] Garside, P. and Wyeth, P., 2003. Identification of cellulosic fibres by FTIR spectroscopy-thread and single fibre analysis by attenuated total reflectance. *Studies in Conservation*, 48(4), pp.269-275.
- [29] Dayan, A.R., Habib, M., Kaysar, M.A. and Uddin, M., 2020. Study on the physico-mechanical properties of okra fibre at different harvesting time. *Saudi Journal of Engineering and Technology*, 5, pp.304-309.