

Evaluation of Almond Shell Powder as a Biomass Waste on the Mechanical-Physical Properties of Polyester Biocomposites

Mohsen Sadroddini^{1*}

*1. Polymer Engineering Department, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

*Email Address: m.sadroddini@urmia.ac.ir

Article Info

Article Type:
Research Paper

Article History:

Received Date:

2025/12/15

Revised Date:

2026/02/03

Accepted Date:

2026/02/24

Published Date:

2026/04/16

Keywords:

Biocomposite,
Almond Shell Powder,
Biomass,
Polyester,
Mechanical Properties.

ABSTRACT

The use of agricultural biomass waste as a reinforcing filler in polymer composites is of considerable importance in waste management and the development of sustainable and environmentally friendly biocomposites. The main objective of the present study is to investigate the effect of almond shell powder (ASP) on the mechanical-physical properties of unsaturated polyester (UPE) biocomposites. In this regard, biocomposites containing different amounts of ASP were manufactured by casting molding method and evaluated by various tests. The FTIR test results indicated a suitable interaction between polymer/filler. The addition of almond shell powder increased both tensile and flexural modulus in the biocomposites. A slight decrease (8.29%) in the tensile strength of the biocomposites was observed compared to the pure polymer, which is negligible. Notably, the highest flexural strength was obtained in the UPE/ASP20 biocomposite (containing 20 wt% ASP) at 1.59 MPa. The microstructure of the biocomposites, the distribution of ASP within the polymer matrix, and the various reinforcement mechanisms were investigated using SEM images. Regarding impact strength, a relatively large decrease occurred with the addition of ASP, which was attributed to the more brittle mechanical behavior of the biocomposites due to the presence of rigid ASP. Although the amount of water absorption increased with the addition of ASP, the resulting biocomposites still had acceptable performance in this regard. It is expected that the findings of the present study can be used for the development of environmentally friendly biocomposites.

Cite this article: Mohsen Sadroddini (2026) , Evaluation of Almond Shell Powder as a Biomass Waste on the Mechanical-Physical Properties of Polyester Biocomposites , Journal of Environmental Sciences Studies , 10(4) , Pages 10977 – 10991.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Particulate polymer composites are among the most important composite materials that have diverse applications in transportation, urban furniture, construction materials and equipment, toys, and household appliances. Common mineral particles can pose environmental hazards such as contamination from persistent chemicals and the production of fine particulate dust that can be dangerous if inhaled or spread. Nowadays, due to the increasing emergence of environmental challenges, the demand for the development of sustainable and environmentally friendly materials, especially polymer composites reinforced with natural materials such as agricultural wastes, has increased more than ever. In addition to reducing the amount of agricultural waste, this can provide various benefits such as reducing pollution, biodegradability, and reducing the cost of the final composite. Almond hard shell is a type of renewable lignocellulosic biomass that is one of the most abundant agricultural wastes, and this valuable bio-filler seems to be a suitable candidate for the development of polymer biocomposites. Accordingly, the aim of the present study is to evaluate the effect of almond shell powder as a biomass waste on the mechanical and physical properties of polyester biocomposites.

Materials and methods

General-purpose unsaturated polyester resin of orthophthalic type, under the trade name RESITAN UP 747.7, was purchased from Resitan Co. Hard almond shells were also collected and prepared after consumption, and then ground into powder in several stages using an industrial grinder. First, to manufacture the composites, a certain amount of the accelerating agent was added to the polyester resin and mixed. Then, a certain amount of ASP was added to the above mixture and stirred well. Next, the curing agent was added and the mixture were stirred thoroughly. A vacuum pump was used to remove air bubbles resulting from the mixing process. Finally, the biocomposites were molded using a silicone mold and the casting method. Various mechanical tests such as tensile, bending, impact, as well as SEM, FTIR, and water absorption tests were performed on the samples.

Results and discussion

The FTIR results indicated the existence of suitable interactions between the UPE and the ASP, which were mainly physical. These suitable interactions will manifest themselves in the mechanical properties of the composites. The tensile behavior of the composites generally shifted to brittle behavior with the addition of ASP. In addition, the strain at failure decreased with ASP, which is mainly due to the high rigidity of ASP. It was observed that the maximum tensile strength of the biocomposites generally decreased with increasing ASP content. However, this decrease was very small, especially in the two biocomposites UPE/ASP10 and UPE/ASP20. This could indicate a good polymer/filler interaction. Of note, the tensile modulus of the composites increased with increasing ASP content. In this case, the inherent nature of ASP in terms of higher rigidity compared to UPE was suggested to be the main reason for the increase in the tensile modulus of the biocomposites. In general, the flexural strength and flexural modulus are influenced by the amount of ASP filler in the matrix and follow the same trend, both increasing with increasing ASP content. The UPE/ASP20 biocomposite showed the highest flexural strength and flexural modulus (even compared to pure UPE). ASP particles can improve the flexural strength by changing the direction of crack growth within the matrix, as shown in the SEM images of this position. The impact strength of the composites decreased with increasing ASP content. It was observed that the impact strength of the biocomposites increased from 5% to 10% and then decreased from 10% to 20% with increasing ASP content. This could be attributed to the addition of ASP which played the role of heterogeneous nucleation. The water absorption value increased with the increase of ASP content, which is mainly due to the large number of hydroxyl groups on the ASP surface. However, their water absorption values (all below 2%) are still acceptable for practical applications.

Conclusion

Polyester/almond shell powder biocomposites consisting of different weight fractions of ASP were manufactured. In short, mechanical evaluations showed an improvement in the tensile and flexural modulus as well as the flexural strength of the biocomposites with the gradual addition of almond shell powder. Scanning electron microscopy (SEM) images clearly showed that the ASP had a good distribution within the polymer matrix. The biocomposites also exhibited acceptable performance in terms of water absorption.



ارزیابی پودر پوسته بادام به عنوان یک پسماند زیست توده بر خواص مکانیکی - فیزیکی بیوکامپوزیت های پلی استر

محسن صدرالدینی^{*۱}

*۱- گروه مهندسی پلیمر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

*ایمیل نویسنده مسئول: m.sadroddini@urmia.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>استفاده از ضایعات کشاورزی زیست توده به عنوان پرکننده تقویت کننده در کامپوزیت های پلیمری از اهمیت قابل توجهی در مدیریت پسماند و توسعه بیوکامپوزیت های پایدار و دوستدار محیط زیست برخوردار است. هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی تأثیر پودر پوسته سخت بادام (ASP) بر خواص مکانیکی-فیزیکی بیوکامپوزیت های پلی استر غیراشباع است. در این راستا، بیوکامپوزیت هایی حاوی مقادیر مختلف از پودر پوسته بادام با روش قالب گیری ریخته گری ساخته شدند و با آزمون های گوناگون مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج آزمون FTIR از برهمکنش مناسب میان پلیمر/پرکننده حکایت داشت. افزودن پودر پوسته بادام باعث افزایش هر دو مدول کششی و خمشی در بیوکامپوزیت ها شد. کاهش جزئی (۸/۲۹ درصدی) در استحکام کششی بیوکامپوزیت ها در مقایسه با پلیمر خالص مشاهده شد که مقداری قابل چشم پوشی به شمار می رود. نکته قابل توجه اینکه، بالاترین استحکام خمشی در بیوکامپوزیت UPE/ASP20 (حاوی ۲۰٪ وزنی پودر پوسته بادام) به میزان ۵۹/۱ MPa به دست آمد. ریزساختار بیوکامپوزیت ها، توزیع پودر پوسته بادام درون ماتریس پلیمری و نیز سازوکارهای تقویت کنندگی مختلف با به کارگیری تصاویر SEM مورد بررسی قرار گرفتند. در مورد مقاومت ضربه ای، کاهش نسبتاً زیادی با افزودن پودر پوسته بادام اتفاق افتاد که به رفتار مکانیکی شکننده تر بیوکامپوزیت ها، ناشی از حضور ذرات صلب پودر پوسته بادام نسبت داده شد. اگرچه میزان جذب آب با افزودن پودر پوسته بادام بیشتر شد، اما بیوکامپوزیت های حاصل همچنان از عملکرد قابل قبولی در این زمینه برخوردار بودند. انتظار می رود یافته های مطالعه حاضر، بتواند برای توسعه بیوکامپوزیت های دوستدار محیط زیست بکار گرفته شود.</p>	<p>نوع مقاله: مقاله علمی پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۴</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۱۴</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۵</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۲۷</p> <p>کلیدواژه ها: بیوکامپوزیت، پودر پوسته بادام، زیست توده، پلی استر، خواص مکانیکی.</p>

کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با ذره^۱ از جمله مهم‌ترین دسته مواد کامپوزیتی به شمار می‌روند که کاربردهای متنوعی در صنایع مختلف حمل‌ونقل زمینی دریایی و هوایی، مبلمان شهری، لوازم و مصالح ساختمانی، اسباب‌بازی‌ها و لوازم‌خانگی دارند. پرکننده‌هایی نظیر کلسیم کربنات، کائولین، سیلیکا، خاک رس و دوده جزء رایج‌ترین پرکننده‌ها هستند که عمدتاً برای کاهش قیمت محصول نهایی و گاهی کنترل برخی خواص رئولوژیکی پلیمرها اضافه می‌شوند. با وجود این، خطرات زیست‌محیطی این پرکننده‌های رایج، شامل آلودگی بالقوه ناشی از مواد شیمیایی پایدار و زیست‌تجمع‌پذیر^۲ و تولید گردوغبار ذرات ریز است که در صورت استنشاق یا پخش شدن می‌تواند خطرناک باشند. امروزه، به دلیل ظهور روزافزون چالش‌های زیست‌محیطی همراه با مقررات سخت‌گیرانه، تقاضا برای توسعه مواد پایدار دوستدار محیط‌زیست بیش از هر زمان دیگری افزایش یافته است. بر این اساس، جهان شاهد انجام تحقیقات گسترده در فناوری سبز در حوزه علم مواد از طریق توسعه بیوکامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با پرکننده‌های طبیعی عمدتاً با منشأ گیاهی است. این کار علاوه بر کاهش میزان ضایعات کشاورزی، می‌تواند مزایای گوناگونی نظیر کاهش آلودگی، زیست‌تخریب‌پذیری و کاهش هزینه کامپوزیت نهایی را فراهم آورد. سالانه حجم قابل توجهی از ضایعات کشاورزی در مراحل کاشت، داشت، برداشت و پس از مصرف تولید می‌شود. پوسته‌های آجیل مانند بادام، گردو، بادام‌زمینی و پسته منابع ارزشمندی از مواد لیگنوسولوزی و فرآورده‌های جانبی کشاورزی هستند. آنها عمدتاً در کمپوست، مالچ، کود و خوراک دام استفاده می‌شوند. با وجود این، اخیراً به دلیل مزایایی مانند مقرون‌به‌صرفه بودن، فراوانی، تجدیدپذیری و زیست‌تخریب‌پذیری، به‌عنوان پرکننده‌های تقویت‌کننده توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. پوسته سخت بادام نوعی زیست‌توده لیگنوسولوزی تجدیدپذیر است که جزء فراوان‌ترین ضایعات کشاورزی به شمار می‌رود. در میان انواع مختلف پوست آجیل، پوست بادام با تولید جهانی تقریباً ۳/۴ میلیون تن، دسته غالب را تشکیل می‌دهد. بیش از ۵۰ تا ۷۰ درصد وزن میوه خشک بادام از پوسته خشک و سخت آن تشکیل شده است. از این رو، به نظر می‌رسد این پرکننده زیستی ارزشمند، کاندیدای مناسبی برای توسعه بیوکامپوزیت‌های پلیمری باشد. در این راستا، چندین گروه تحقیقاتی، تأثیر افزودن پوسته بادام را بر رفتار مکانیکی ماتریس‌های متنوع پلیمری از جمله پلی‌پروپیلن (PP)، پلی‌اتیلن خطی با چگالی کم (LLDPE)، آکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS)، پلی‌لاکتید و پلیمر مبتنی بر نشاسته بررسی کرده‌اند. به‌طور کلی، نتایج آنها حاکی از افزایش/ثابت ماندن مدول مکانیکی بیوکامپوزیت‌ها بود که عمدتاً ناشی از خواص مکانیکی ذاتی بالای بادام در مقایسه با ماتریس پلیمری بوده است. با این حال، در مورد استحکام مکانیکی و مقاومت در برابر ضربه شاهد نتایج کاهشی بوده‌اند. به‌طور خلاصه، نویسندگان پژوهش‌های فوق، این کاهش را به عواملی نظیر چسبندگی ضعیف پلیمر/پرکننده، کلوخه شدن ذرات و نیز افزایش شکنندگی ماتریس پلیمری به دلیل وجود ذرات صلب پودر بادام نسبت داده‌اند. رزین پلی‌استر غیراشباع اورتوفتالیک^۳ نوعی رزین پلی‌استر است که از واکنش یک یا چند پلی‌ال (الکل دو یا چندعاملی) با یک یا چند اسید دو یا چندعاملی، همراه محصول جانبی آب تولید می‌شود. الکل و اسیدهای مصرفی می‌توانند یک یا چند عامل فعال داشته باشند، در نتیجه طیف وسیعی از انواع پلی‌استر از اسیدها، گلیکول‌ها و مونومرهای مختلف ساخته شده‌اند که دارای خواص متفاوتی هستند. این رزین یک ماده گرماسخت^۴ است، به این معنی که پس از سخت شدن طی فرایند موسوم به پخت^۵، دیگر قابل ذوب یا شکل‌دهی مجدد نیست. از ویژگی‌های این رزین می‌توان به مقاومت مکانیکی بالا، مقاومت شیمیایی مناسب، مقاومت حرارتی خوب و مقاومت بالا در برابر آب اشاره کرد. رزین‌های پلی‌استر به‌طور کلی به‌عنوان پرکاربردترین ماتریس پلیمری گرماسخت در تهیه و ساخت کامپوزیت‌های پلیمری در دنیا به شمار می‌روند. از جمله این کاربردها عبارت‌اند از: خودروسازی (پنل‌ها، سپرها، قطعات داخلی)، ساختمانی (لوله‌های آب و فاضلاب، سنگ مصنوعی، کف‌پوش‌های محافظ، بازسازی ساختمان‌ها)، دریایی (قایق‌ها، شناورها، تجهیزات ماهیگیری)، مبلمان (خانگی، شهری) و مجسمه‌ها و آثار هنری. هدف مطالعه حاضر، ارزیابی تأثیر پوسته سخت بادام به‌عنوان یک پسماند زیست‌توده بر خواص مکانیکی و فیزیکی بیوکامپوزیت‌های پلی‌استر است. بدین منظور، بیوکامپوزیت‌های پلی‌استر متشکل از مقادیر مختلف پودر پوسته بادام با روش قالب‌گیری ریخته‌گری^۶ ساخته شدند. آزمون‌های مکانیکی رایج مانند آزمون کششی، خمشی، ضربه و نیز آزمون‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی و جذب آب بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. به‌طور خلاصه، نتایج نشان داد پودر پوسته بادام می‌تواند خواص مکانیکی را بهبود بخشیده و به‌عنوان یک پرکننده تقویت‌کننده زیستی، جایگزین مناسبی برای پرکننده‌های رایج معدنی در نظر گرفته شود.

¹ Particulate composites

² Bio accumulative chemicals

³ Ortho phthalic unsaturated polyester resin

⁴ Thermoset

⁵ Curing

⁶ Casting

۲- مواد و روش‌ها

• مواد

رزین پلی‌استر غیراشباع از نوع اورتوفتالیک با کاربری عمومی، با نام تجاری RESITAN UP 747.7 از شرکت رزیتان خریداری شد. پوسته سخت بادام نیز پس از مصرف، جمع‌آوری و تهیه شد.

• تهیه پودر پوسته بادام

پوسته سخت بادام توسط یک دستگاه آسیاب صنعتی، در چند مرحله آسیاب و به پودر تبدیل شد. به دلیل اندازه بسیار متغیر ذرات پودر حاصل، از مجموعه الک‌های صنعتی برای دانه‌بندی ذرات استفاده شد (شکل ۱). توزیع و میانگین اندازه ذرات توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ تعیین شدند.



شکل ۱. پوسته سخت بادام، ذرات درشت پوسته بادام و ذرات ریز پوسته بادام

• ساخت بیوکامپوزیت‌ها

پیش از ساخت، مقادیر مدنظر از ماتریس پلی‌استر (رزین، عامل پخت و شتاب‌دهنده) و پودر پوسته بادام محاسبه شدند.

جدول ۱ نمادگذاری و ترکیب درصد بیوکامپوزیت‌ها را نشان می‌دهد. ابتدا، مقدار محاسبه‌شده از عامل شتاب‌دهنده (کبالت نفتانات ۱٪) به رزین پلی‌استر اضافه و مخلوط شد. سپس، مقدار معینی از پودر پوسته بادام به مخلوط فوق افزوده و به خوبی هم زده شد. در گام بعد، عامل پخت (متیل اتیل کتون پروکسید ۱/۵٪) اضافه و محتویات مخلوط کاملاً هم زده شدند. برای خروج حباب‌های هوا ناشی از فرایند اختلاط، از پمپ خلأ استفاده شد. درنهایت، بیوکامپوزیت‌ها با استفاده از یک قالب سیلیکونی و روش قالب‌گیری ریخته‌گری^۲ ساخته شدند.

جدول ۱. نمادگذاری بیوکامپوزیت‌ها و ترکیب درصد آنها

کامپوزیت	نمادگذاری	پلی‌استر (درصد وزنی)	پودر پوسته بادام (درصد وزنی)
Polyester	UPE	۱۰۰	۰
Polyester/ASP5	UPE/ASP5	۹۵	۵
Polyester/ASP10	UPE/ASP10	۹۰	۱۰
Polyester/ASP20	UPE/ASP20	۸۰	۲۰

¹ Scanning electron microscope (SEM)

² Casting

• آزمون‌ها

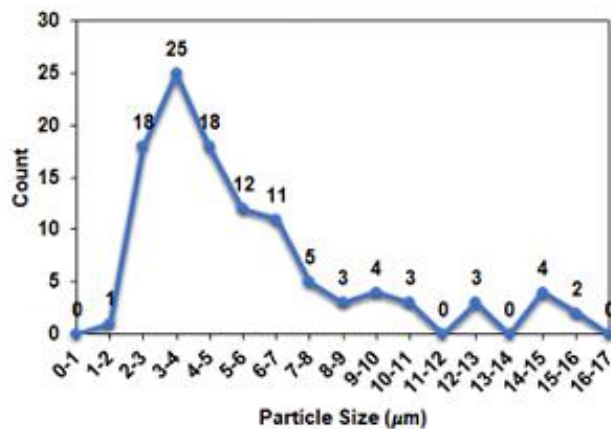
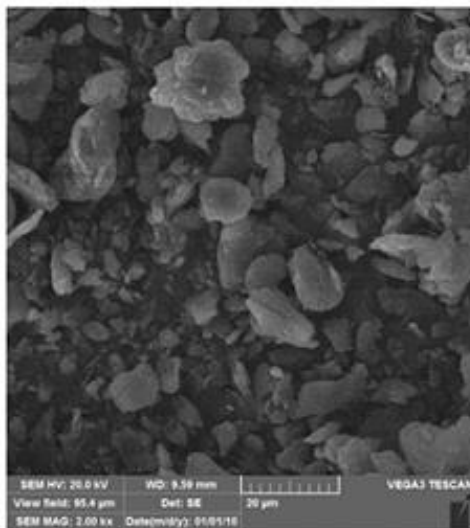
آزمون طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه^۱ (FTIR) برای شناسایی گروه‌های عاملی موجود در ساختار رزین پلی‌استر، پودر پوسته بادام و بیوکامپوزیت حاصل، استفاده شد. طیف‌های حاصل در بازه اعداد موجی $4000-600 \text{ cm}^{-1}$ ثبت شدند. مورفولوژی و ریزساختار بیوکامپوزیت‌ها پس از آزمون کشش، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد. همچنین، برای تعیین توزیع و میانگین اندازه ذرات پودر پوسته بادام نیز بکار گرفته شد. خواص کششی بیوکامپوزیت‌ها مطابق با استاندارد ASTM D638، با استفاده از دستگاه کشش یونیورسال (SANTAM STM-20) اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها به شکل دمبل‌هایی با ابعاد معین ساخته شدند. آزمون کشش با سرعت 10 mm/min انجام شد. برای هر بیوکامپوزیت، سه نمونه آزمایش انجام شد و مقدار میانگین گزارش شده است. آزمون خمشی سه‌نقطه‌ای بر اساس استاندارد ASTM D790، با دستگاه کشش یونیورسال (SANTAM STM-20) انجام پذیرفت. نمونه‌ها به شکل مکعب مستطیل - هایی با ابعاد $127 \times 13 \times 3 \text{ mm}^3$ ساخته شدند. سرعت پین بارگذاری، برابر با 10 mm/min تنظیم شد. خروجی اولیه این آزمون، به‌صورت نمودار نیرو-انحراف به دست آمد. سپس، پارامترهای خمشی مانند استحکام خمشی و مدول خمشی با استفاده از روابط ریاضی موجود در استاندارد مربوطه محاسبه شدند. برای هر بیوکامپوزیت، سه نمونه آزمایش انجام شد و مقدار میانگین گزارش شده است. برای تعیین استحکام ضربه‌ای بیوکامپوزیت‌ها از دستگاه ضربه (SIT-20E Cap. 20J) استفاده شد. ابعاد نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM D256 (روش آیزود) به‌صورت مکعب مستطیل‌هایی با ابعاد $65 \times 13 \times 3 \text{ mm}^3$ بودند. نمونه‌ها به‌صورت عمودی در دستگاه ضربه قرار گرفتند و انرژی ضربه‌ای (J) موردنیاز برای شکست اندازه‌گیری شد. با استفاده از ابعاد نمونه‌ها، استحکام ضربه‌ای (kJ/m^2) آنها تعیین شد. برای هر بیوکامپوزیت، سه نمونه آزمایش انجام شد و مقدار میانگین گزارش شده است. روش ارشمیدس مطابق با استاندارد ASTM D570 برای تعیین میزان جذب آب بیوکامپوزیت‌ها بکار گرفته شد. نمونه‌ها به‌طور کامل درون ظرفی حاوی آب مقطر غوطه‌ور شدند. پس از یک روز، نمونه‌ها را از آب خارج کرده و پس از پاک کردن آب اضافی روی سطح آنها، توزین شدند. میزان جذب آب (به‌صورت درصد)، با اختلاف وزن نمونه‌ها قبل و بعد از غوطه‌وری محاسبه و گزارش شده‌اند. برای هر بیوکامپوزیت، سه نمونه آزمایش انجام شد و مقدار میانگین گزارش شده است.

۳- نتایج و بحث

- مورفولوژی پودر پوسته بادام

شکل ۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پودر پوسته بادام و توزیع اندازه ذرات آن را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ذرات به‌صورت منفرد و کلوخه‌هایی متشکل از ذرات میکرونی وجود دارند. شکل هندسی ذرات، عمدتاً نامنتظم بوده و سطح آنها زبر است که ناشی از فرایند آسیاب مکانیکی است. با وجود این، شکل بیشتر ذرات را می‌توان با تقریب مناسبی به‌صورت ذرات کروی در نظر گرفت. برای تعیین اندازه ذرات از نرم‌افزار آنالیز تصویر ImagJ استفاده شد. بر این اساس، اندازه بیشتر ذرات در بازه تقریبی ۸-۲ میکرون قرار گرفتند، البته ذرات بزرگ‌تر از ۱۰ میکرون نیز در تصویر مشاهده می‌شوند که فراوانی آنها کمتر است.

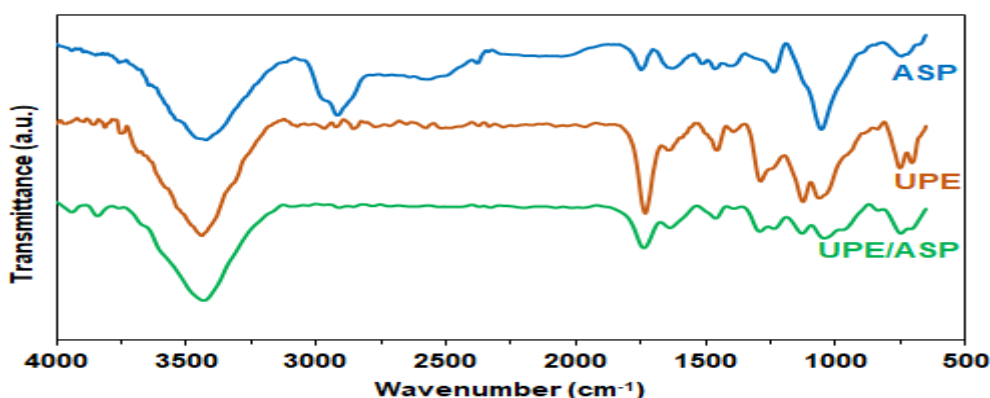
¹ Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)



شکل ۲. تصویر میکروسکوپ الکترونی پودر پوسته بادام با بزرگنمایی ۲۰۰۰ و توزیع اندازه ذرات آن

- تحلیل مادون قرمز تبدیل فوریه

طیف FTIR پودر پوسته بادام (ASP)، رزین پلی استر (UPE) و بیوکامپوزیت (UPE/ASP) در شکل ۳ نشان داده شده است. این آزمون درک برهمکنش‌های میان اجزای بیوکامپوزیت را تسهیل می‌کند و پیک‌های مشخصه موجود در طیف‌ها را ارائه می‌دهد. اجزای اصلی تشکیل‌دهنده پوسته سخت بادام عبارت‌اند از سلولز، همی سلولز و لیگنین. این اجزا دارای گروه‌های عاملی متنوعی هستند که به خوبی در طیف FTIR مشخص می‌شوند. در مورد ماهیت برهمکنش میان پلی استر و پودر پوسته بادام از لحاظ شیمیایی یا فیزیکی، با توجه به اینکه در کامپوزیت UPE/ASP پیک جدیدی حذف یا اضافه نشده است، می‌توان نتیجه گرفت برهمکنش میان این دو از نوع فیزیکی و جذب سطحی است. در مقابل، با دقت در اعداد موجی گروه‌های عاملی در جدول ۲، مشاهده می‌شود که با افزودن ASP، موقعیت پیک‌های اصلی UPE کمی جابجا شده است. این می‌تواند حاکی از وجود برهمکنش فیزیکی از نوع هیبریداسیون ابر الکترونی و ممان‌های دوقطبی پیوندها و نیز تمایل مناسب میان اجزای بیوکامپوزیت یعنی ذرات ASP و ماتریس UPE باشد. به‌ویژه اینکه، اغلب گروه‌های موجود بر سطح ASP از نوع گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار و لذا قطبی هستند. تعدادی از آنها عبارت‌اند از: 1731 به 1737 ($C=O$)، 1642 به 1636 ($C=C$) و 1287 به 1291 ($C-O$). این اتفاق خود را در ریزساختار و خواص کششی بیوکامپوزیت‌ها نشان خواهد داد که در ادامه مقاله ارائه خواهند شد. تعدادی از منابع پژوهشی، دلیل جابجایی جزئی موقعیت پیک‌های هیدروکسید و استر را ناشی از اثر کاتالیزوری گروه‌های هیدروکسید موجود بر سطح پرکننده بر واکنش پخت ماتریس نیز دانسته‌اند.



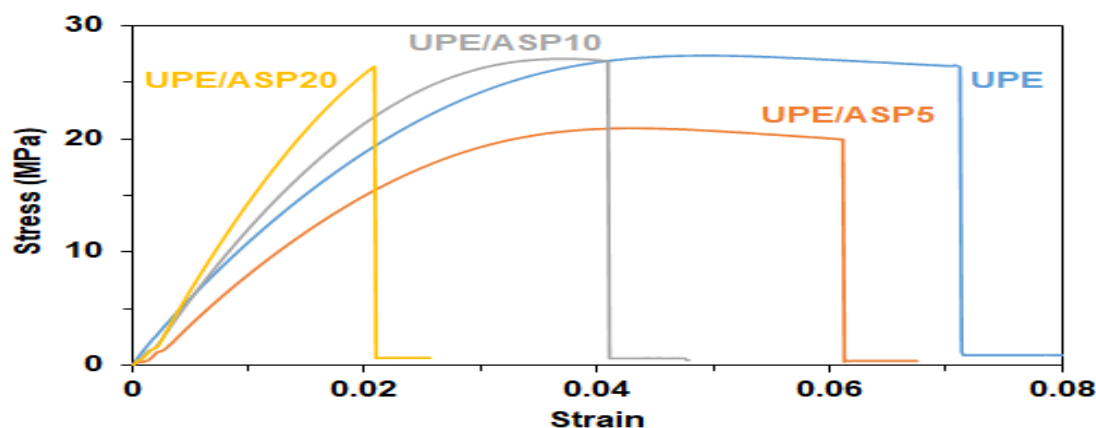
شکل ۳. طیف FTIR پودر پوسته بادام (ASP)، رزین پلی استر (UPE) و بیوکامپوزیت (UPE/ASP)

نمونه	گروه‌های عاملی
ASP	OH stretching (3424 cm^{-1}) -CH in methyl and methylene groups (2918 cm^{-1}) C=O of ester, ketone and carbonyl groups (1747 cm^{-1}) C=C (1628 cm^{-1}) C-H asymmetric stretching of -CH ₃ and -CH ₂ (1463 cm^{-1}) C-OH of alcoholic and carboxylic acids ($1237, 1053\text{ cm}^{-1}$)
UPE	O-H stretching (3441 cm^{-1}) C=O (1731 cm^{-1}) C=C (1642 cm^{-1}) CH ₂ bending and aromatic ring (1455 cm^{-1}) C-O ($1287, 1124, 1061\text{ cm}^{-1}$) ortho substitution (750 cm^{-1})
UPE/ASP	O-H stretching (3433 cm^{-1}) C=O (1737 cm^{-1}) C=C (1636 cm^{-1}) C-O ($1291, 1127, 1042\text{ cm}^{-1}$) ortho substitution (747 cm^{-1})

جدول ۲. پیک‌های مشخصه موجود در طیف FTIR

- خواص کششی

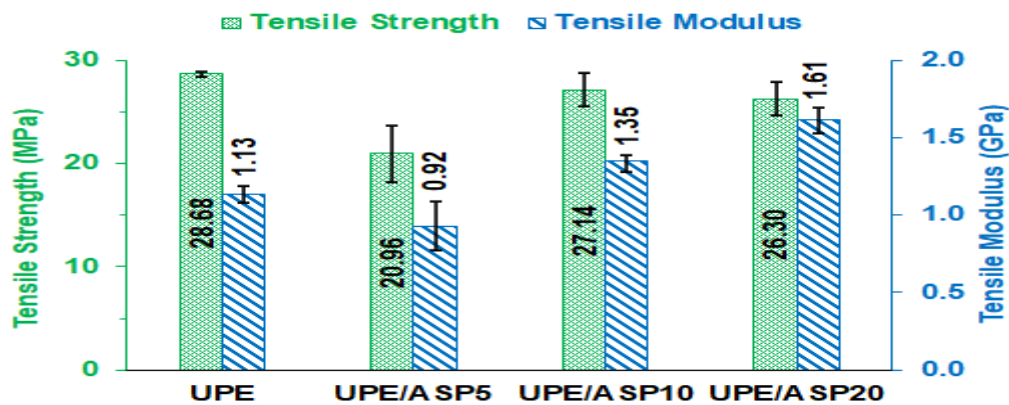
منحنی تنش-کرنش کششی UPE و بیوکامپوزیت‌های آن در شکل ۴ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که UPE خالص، دارای تغییر شکل پلاستیک است، البته در بخش ابتدایی همچنان از رفتار خطی هوک پیروی می‌کند. با افزایش مقدار پودر پوسته بادام، از میزان رفتار پلاستیک کاسته شده و رفتار شکننده^۱ بیشتر خودنمایی می‌کند، به‌ویژه در بیوکامپوزیت با مقدار بیشتر ASP، یعنی بیوکامپوزیت UPE/ASP20. این اتفاق از صلیبت^۲ بالای ذرات ASP نشئت می‌گیرد که از تغییر شکل پلاستیک UPE خالص ممانعت به عمل می‌آورد. پدیده مشابهی در کامپوزیت پلی‌اتیلن سبک خطی پر شده با پودر بادام توسط گروه تحقیقاتی Boujelben و همکاران نیز گزارش شده است. میزان کرنش در شکست^۳ نیز با افزایش میزان ASP به‌طور تدریجی کاهش یافته است. ذرات پرکننده می‌توانند نقاط تمرکز تنش در اطراف خود ایجاد کرده و به‌نوعی مانند نقاط نقص ساختاری عمل کنند که نهایتاً باعث کاهش میزان کرنش در شکست بیوکامپوزیت‌ها شوند. نتیجه مشابهی توسط Liminana و همکارانش با افزودن آرد پوسته بادام به ماتریس پلی‌بوتیلن سوسینات نیز گزارش شده است.



شکل ۴. منحنی تنش-کرنش کششی UPE و بیوکامپوزیت‌های آن

¹ Brittle² Rigidity³ Strain at break

آزمون کشش اطلاعات زیادی از جمله بیشینه استحکام کششی و مدول کششی ماده را در اختیار می‌گذارد. شکل ۵ استحکام کششی و مدول کششی UPE و بیوکامپوزیت‌های آن را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود، بیشینه استحکام کششی بیوکامپوزیت‌ها به‌طور کلی با افزایش مقدار ASP کاهش یافته است. با وجود این، این مقدار کاهش به‌ویژه در دو بیوکامپوزیت UPE/ASP10 و UPE/ASP20 بسیار ناچیز است. گروه‌های تحقیقاتی متعددی شاهد کاهش قابل توجه استحکام کششی و مدول کششی کامپوزیت‌ها با افزودن پودر بادام و پودر گردو بوده‌اند. آنها اشاره کرده‌اند که استحکام کششی بیشترین تأثیر را از برهمکنش بین سطحی ماتریس/پرکننده می‌پذیرد، لذا آن را به سطح مشترک ضعیف پلیمر/پرکننده نسبت داده‌اند. علاوه بر آن، Garcia و همکارانش، آن را ناشی از توزیع و پراکنش ناکافی پودر پوسته بادام درون ماتریس پایه نشاسته‌ای و در نتیجه تشکیل کلوخه‌ها دانسته‌اند. در پژوهش دیگری، Chaudhary و همکارانش نشان داده‌اند که افزودن پودر پوسته بادام منجر به کاهش قابل توجه در مدول کامپوزیت‌های اپوکسی شده است، به‌عنوان مثال با افزایش میزان ASP از ۱۰٪ به ۳۰٪ شاهد کاهش مدول یانگ از ۱۶۵۲ مگا پاسکال به ۱۲۸۸ مگا پاسکال بوده‌اند که معادل ۲۲٪ کاهش است. در مورد استحکام کششی دو کامپوزیت فوق نیز کاهش از مقدار ۳۷ مگا پاسکال به ۲۶ مگا پاسکال را گزارش کرده‌اند که معادل حدود ۳۰٪ کاهش است. این در حالی است که در مطالعه حاضر، استحکام کششی دو بیوکامپوزیت UPE/ASP10 و UPE/ASP20 نیز تقریباً ثابت مانده است. این می‌تواند بیانگر وجود برهمکنش مناسب پلیمر/پرکننده است. در ادامه، این نکته در تصاویر SEM ریزساختار بیوکامپوزیت‌ها نشان داده شده است. دیگر نکته حائز اهمیت، افزایش مدول کششی کامپوزیت‌ها با افزودن مقدار ASP است. در این مورد، ماهیت ذاتی ذرات ASP از لحاظ سختی بالاتر نسبت به رزین پلی‌استر، به‌عنوان دلیل اصلی افزایش مدول کششی بیوکامپوزیت‌ها پیشنهاد شده است. این اتفاق منجر به کاهش تغییر شکل پلاستیک ماتریس می‌شود و لذا مدول کششی بیوکامپوزیت افزایش می‌یابد.



شکل ۵. استحکام کششی و مدول کششی UPE و بیوکامپوزیت‌های آن

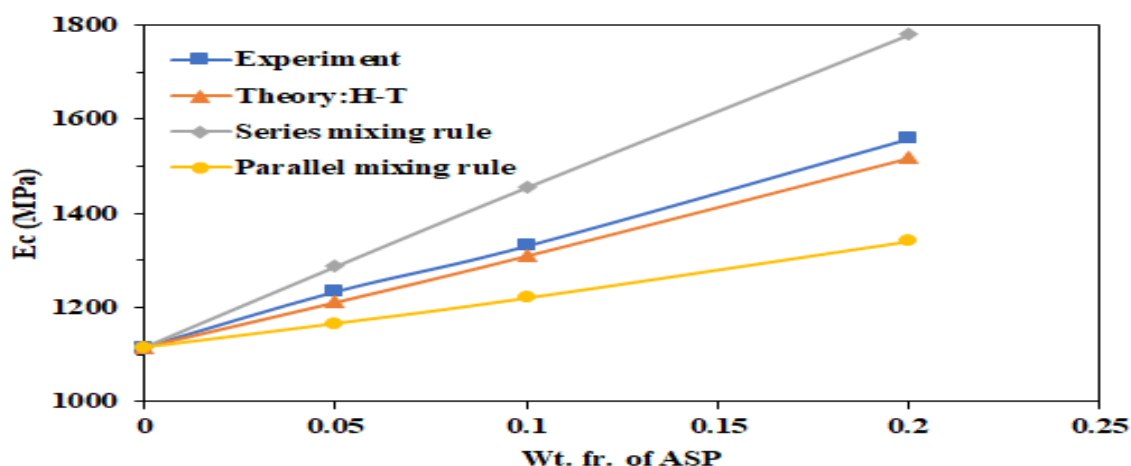
در کامپوزیت‌های تقویت‌شده لیفی و ذره‌ای پیش‌بینی خواص مکانیکی به‌ویژه مدول یانگ از اهمیت بالایی برخوردار است و بخش مهمی از مطالعه علمی آنها به شمار می‌رود. در این راستا، مدل ساده قانون مخلوط‌ها به دو صورت قانون مخلوط سری^۱ و قانون مخلوط موازی^۲ وجود دارد. این دو بسیار ساده هستند و پیش‌بینی دقیقی از مدول یانگ کامپوزیت‌ها ندارند، اما باین‌حال برای تخمین‌های اولیه از آنها استفاده می‌شود. در مقابل، مدل نیمه تجربی شناخته‌شده هالپین-تسای^۳ از دقت بسیار مناسبی برای پیش‌بینی مدول یانگ کامپوزیت‌های تقویت‌شده با تقویت‌کننده‌های با هندسه‌های مختلف (میله‌ای، صفحه‌ای و کروی) برخوردار است. این مدل با در نظر گرفتن هندسه فاز تقویت‌کننده، مدول یانگ ماتریس، مدول یانگ و کسر حجمی فاز تقویت‌کننده قادر به پیش‌بینی دقیق مدول یانگ کامپوزیت‌هاست. علاوه بر آن، این مدل برای آرایش‌های مختلف فاز تقویت‌کننده (طولی، عرضی و تصادفی) نیز قابل استفاده است. معادلات ریاضی قانون مخلوط‌ها و مدل هالپین-تسای در جدول ۳ نشان داده شده است. پارامترهای موجود در جدول ۳ به‌اختصار عبارت‌اند از: E_m مدول یانگ ماتریس، E_f مدول یانگ پرکننده، ν_f کسر حجمی پرکننده، E_{11} مدول یانگ طولی، E_{22} مدول یانگ عرضی، ξ_{11} پارامتر اندازه شکلی در جهت طولی، ξ_{22} پارامتر اندازه شکلی در جهت عرضی و E_c مدول یانگ کامپوزیت نهایی. لازم به ذکر است ضریب اندازه شکلی برای شکل‌های گوناگون فاز تقویت‌کننده دارای روابط ریاضی مختلفی است که مقدار این ضرایب برای هندسه کروی برابر با ۱ است. در نهایت، مدول یانگ کامپوزیت تقویت‌شده با ذرات دارای آرایش تصادفی از قانون (3/8, 5/8) قابل محاسبه است.

¹ Series mixing rule
² Parallel mixing rule
³ Halpin-Tsai

جدول ۳. معادلات قانون مخلوطها و مدل هالپین-تسای

قانون مخلوط سری	$E_{11} = E_m + v_f(E_f - E_m)$
قانون مخلوط موازی	$E_{22} = \frac{E_f E_m}{E_f - v_f(E_f - E_m)}$
مدل هالپین-تسای	$E_{11} = \frac{1 - \xi_{11} \eta_{11} v_f}{1 - \eta_{11} v_f} E_m, \eta_{11} = \frac{(E_f/E_m) - 1}{(E_f/E_m) + \xi_{11}}$ $E_{22} = \frac{1 + \xi_{22} \eta_{22} v_f}{1 - \eta_{22} v_f} E_m, \eta_{11} = \frac{(E_f/E_m) - 1}{(E_f/E_m) + \xi_{22}}$ $\xi_{11} = \xi_{22} = 1 \text{ for spherical filler}$ $E_c = \frac{3}{8} E_{11} + \frac{5}{8} E_{22}$

به اختصار، پارامترهای ورودی عبارتند از: $E_m = 1115 \text{ MPa}$ و $E_f = 3956 \text{ MPa}$. مدول یانگ ماتریس توسط خودمان اندازه گیری و محاسبه شده که در اینجا نشان داده نشده است. مدول یانگ ذرات ASP نیز با برازش خطی نتایج تجربی مدول یانگ کامپوزیت‌های UPS/ASP تعیین شد. در مورد چگالی نیز از مقادیر $\rho_m = 1.15 \text{ g/cm}^3$ و $\rho_f = 941 \text{ g/cm}^3$ برای تبدیل کسر وزنی به کسر حجمی بهره گرفته شد. شکل ۶ نتایج پیش‌بینی قانون مخلوطها و مدل هالپین-تسای و مقایسه آنها با نتایج تجربی را نمایش می‌دهد. قانون مخلوط سری مقادیر زیادتر و قانون مخلوط موازی مقادیر کمتری را برای مدول یانگ کامپوزیت‌ها پیش‌بینی کرده‌اند که دقت بالایی ندارند. در مقابل، مشاهده می‌شود پیش‌بینی مدل هالپین-تسای از توافق بسیار مناسبی با نتایج تجربی برخوردار است.

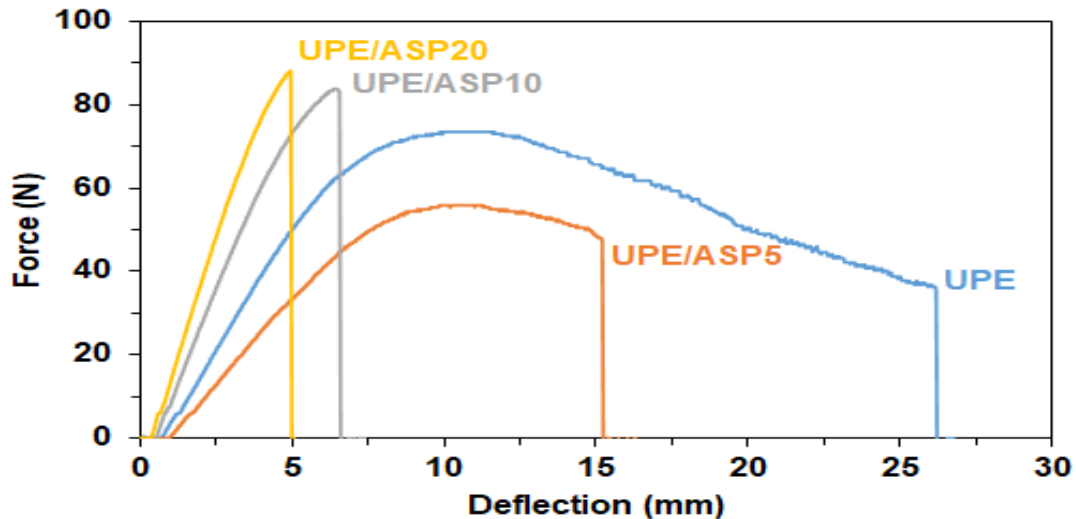


شکل ۶. پیش‌بینی قانون مخلوطها و معادله هالپین-تسای و مقایسه آنها با نتایج تجربی

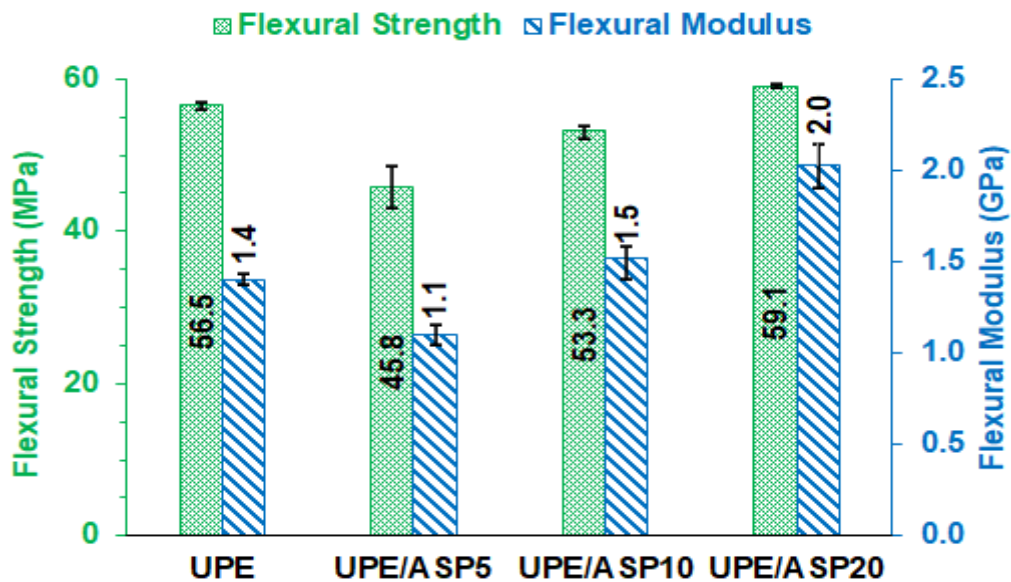
- خواص خمشی

شکل ۷ منحنی نیرو-انحراف UPE و بیوکامپوزیت‌های آن را نمایش می‌دهد. با دقت در رفتار خمشی بیوکامپوزیت‌ها، می‌توان تشابه بسیاری را با رفتار کششی آنها مشاهده کرد. در اینجا نیز، پلی‌استر خالص دارای رفتار تغییر شکل پلاستیک با میزان ازدیاد طول نسبتاً زیاد است. با افزایش مقدار ASP، تغییر رفتار بیوکامپوزیت‌ها از تغییر شکل پلاستیک به شکننده به‌وضوح روی داده است. علاوه بر آن، میزان کرنش در نقطه شکست نیز با افزایش مقدار ASP رفته‌رفته کاهش یافته است. نکته متمایز در مقایسه با روند مشاهده‌شده در استحکام کششی، بالاتر بودن استحکام خمشی دو کامپوزیت UPE/ASP10 و UPE/ASP20 در مقایسه با UPE خالص است. استحکام خمشی و مدول خمشی UPE و بیوکامپوزیت‌های آن در شکل ۸ مشاهده می‌شود. این دو با استفاده از منحنی نیرو-انحراف و از طریق معادلات اشاره‌شده در بخش تجربی محاسبه شده‌اند. به‌طور کلی، استحکام خمشی و مدول خمشی تحت تأثیر مقدار پرکننده ASP موجود در ماتریس قرار دارند و از روند یکسانی پیروی می‌کنند و هر دو با افزایش مقدار ASP روند صعودی دارند. اما در مقایسه با UPE خالص، مشاهده می‌شود که با افزودن ASP، ابتدا خواص خمشی کاهش و سپس رفته‌رفته افزایش می‌یابد. علاوه بر آن، بیوکامپوزیت UPE/ASP20 بالاترین استحکام خمشی و مدول خمشی را (حتی در مقایسه با UPE خالص) از خود نشان داده است. در مورد تأثیر پرکننده‌های ذره‌ای بر خواص خمشی پلیمرها، گروه‌های تحقیقاتی مختلف دریافته‌اند که افزودن آرد پوسته بادام به‌طور قابل توجهی استحکام خمشی انواع پلیمرها، از جمله اکریلونیتریل بوتادین (ABS)، پلی‌لاکتید و پلیمر مبتنی بر نشاسته را کاهش می‌دهد. آنها این موضوع را به عوامل مختلفی از جمله چسبندگی ضعیف پلیمر/پرکننده، تشکیل کلوخه‌های ذرات و حفره‌هایی که در نتیجه افزایش محتوای پرکننده ایجاد می‌شوند، نسبت داده‌اند. پلیمر مورد استفاده

در مطالعه حاضر، رزین پلی‌استر غیراشباع است. یافته‌های مشابهی در مورد تأثیر کاهش پودر پوسته گردو و پودر پوسته پسته بر استحکام خمشی کامپوزیت‌های پلی‌استر نیز ثبت شده است.



شکل ۷. منحنی نیرو- انحراف UPE و بیوکامپوزیت‌های آن



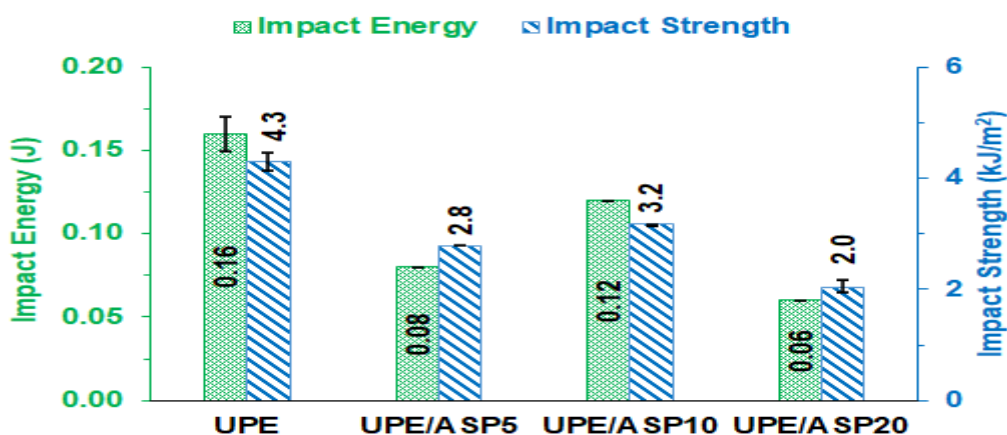
شکل ۸. استحکام خمشی و مدول خمشی UPE و بیوکامپوزیت‌های آن

در آزمون خمش سه نقطه‌ای، ترک‌ها معمولاً در ماتریس شروع می‌شوند و سپس گسترش می‌یابند. این ترک‌ها در مسیر انتشار خود با مانعی جامد به نام ذرات سخت بادام مواجه می‌شوند. در نتیجه، ترک‌ها مجبور به تغییر مسیر خود می‌شوند که منجر به افزایش طول ترک می‌شود که انرژی لازم برای شکست و به نوبه خود استحکام خمشی را افزایش می‌دهد. این اتفاق به ویژه در مقادیر بیشتر از ASP روی می‌دهد، لذا کامپوزیت UPE/ASP20 بالاترین استحکام خمشی را از خود نشان داده است. این سازوکار در تصاویر SEM بیوکامپوزیت فوق در ادامه نشان داده شده است. در مورد مدول خمشی بیوکامپوزیت‌ها نیز می‌توان استدلال مشابهی با مدول کششی اقامه کرد. به عبارت دیگر، افزودن ذرات بادام باعث سفت‌تر شدن ماتریس از لحاظ مقاومت در برابر تغییر شکل می‌شود که در نهایت منجر به افزایش مدول خمشی خواهد شد.

- خواص ضربه‌ای

توانایی تحمل بارهای ضربه‌ای یکی از ویژگی‌های اساسی کامپوزیت‌ها است و اغلب با استفاده از آزمایش ضربه آیزود گزارش می‌شود. شکل ۹ انرژی ضربه‌ای جذب شده و استحکام ضربه‌ای بیوکامپوزیت‌ها را نشان می‌دهد. به طور کلی، میزان انرژی جذب شده و در نتیجه استحکام ضربه‌ای با افزایش مقدار ASP کاهش یافته است. مشاهده می‌شود استحکام ضربه‌ای بیوکامپوزیت‌ها با افزایش میزان ASP از ۵٪ به

۱۰٪ افزایش و سپس از ۱۰٪ به ۲۰٪ کاهش می‌یابد. این امر می‌تواند به افزودن ASP که نقش هسته‌زایی ناهمگن را ایفا می‌کند، نسبت داده شود. در مقدار کم ASP (یعنی ۵٪) میزان هسته‌زایی کمتر و در ۱۰٪ بیشتر می‌شود. در ادامه، با افزایش مقدار ASP به ۲۰٪، تجمع بین ذرات افزایش می‌یابد، اتصال بین ماتریس پلیمری و ذرات ضعیف شده و نقطه اتصال به نقطه ضعف تبدیل می‌شود و استحکام ضربه‌ای مجدداً کاهش می‌یابد. لذا، بیشترین کاهش مربوط به کامپوزیت UPE/ASP20 است که مطابق با نتایج آزمون کشش (شکل ۴)، شکننده‌ترین رفتار و کمترین میزان کرنش در شکست در این کامپوزیت مشاهده شدند. این واقعیت می‌تواند به محتوای بالای ASP (۲۰ درصد وزنی) مربوط باشد که به‌طور بالقوه تنش‌های کششی بالا و میزان تغییر شکل بسیار کم در طول قطعه ایجاد می‌کند و منجر به جذب انرژی کم در اثر ضربه می‌شود. تحقیقات دیگری نیز کاهش شدید استحکام ضربه‌ای را هنگام افزودن پودر پوسته بادام به پلیمرهای مبتنی بر نشاسته ثبت کرده‌اند (از $29/9 \text{ kJ/m}^2$ برای پلیمر خالص به $2-4 \text{ kJ/m}^2$ برای کامپوزیت پلیمر/بادام). Carrillo و همکارانش، کاهش استحکام ضربه‌ای را پس از افزودن آرد پوسته بادام به کامپوزیت پلی‌لاکتید/بادام نیز مشاهده کردند. نویسندگان این موضوع را به مقاومت کششی بالای ماده همراه با تغییر شکل کم آن (کرنش کم در هنگام شکست) نسبت دادند. کاهش استحکام ضربه‌ای کامپوزیت‌های اپوکسی/پودر گردو با افزودن پودر گردو نیز در مطالعه‌ی دیگری ثبت شده است. نویسندگان این اتفاق را به‌عنوان یک رفتار رایج در کامپوزیت‌هایی که شامل پرکننده‌های ذره‌ای هستند، در نظر گرفتند.



شکل ۹. انرژی ضربه‌ای و استحکام ضربه‌ای UPE و بیوکامپوزیت‌های آن

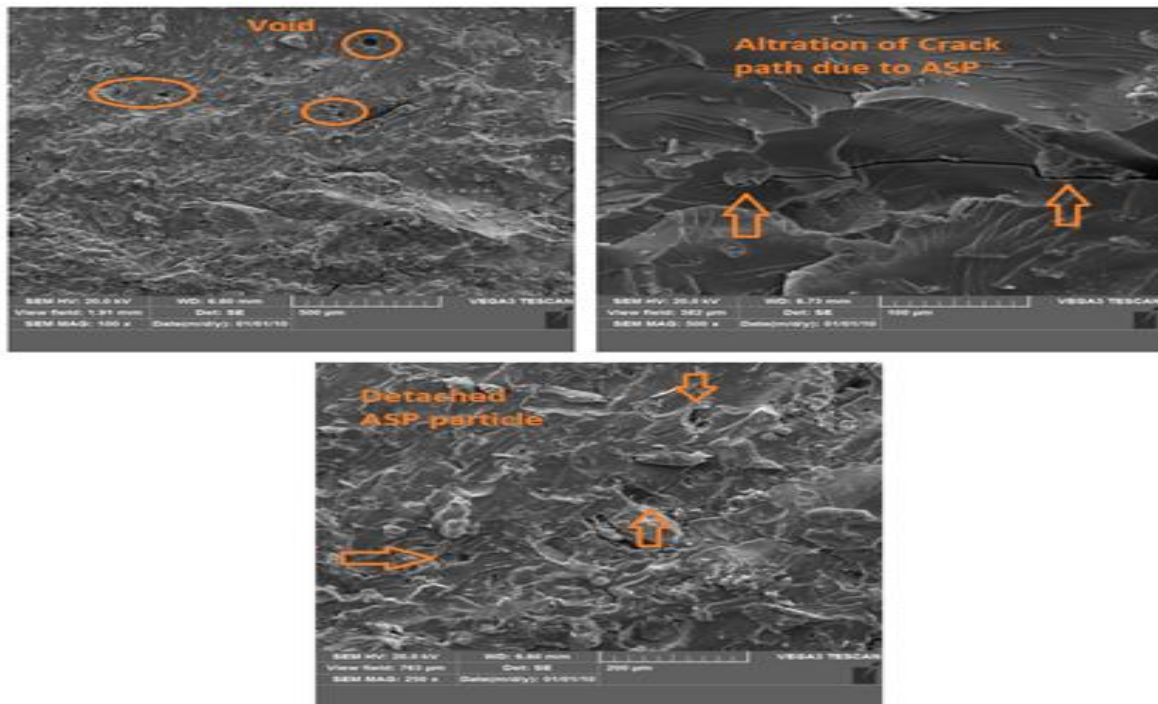
– ریزساختار بیوکامپوزیت‌ها

مورفولوژی شکست کامپوزیت‌های هیبریدی پس از آزمون کشش، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد. تصاویر میکروسکوپی بیوکامپوزیت‌ها در شکل ۱۰ نشان داده شده است. تصاویر به‌وضوح حکایت از توزیع و پراکندگی مناسب ذرات ASP درون ماتریس پلیمری دارند و سطح ذرات به‌خوبی توسط لایه‌ای از پلیمر پوشانده شده‌اند. این می‌تواند نشانه‌ای از برهمکنش مناسب میان پلیمر/ذره باشد که پیش‌تر در آنالیز FTIR نیز بررسی و تصدیق شد. ناحیه عدم پیوند^۱ میان ذرات و ماتریس مشاهده نمی‌شود، این در حالی است که در مطالعات گوناگونی توسط محققان این ناحیه به‌وضوح روئیت و گزارش شده است. پدیده‌های مختلفی نظیر وجود حفرات، ذرات جداشده^۲ و تغییر مسیر رشد ترک ناشی از نتایج آزمون خمشی مشاهده می‌شود. شاهد تغییر رشد مسیر ترک به دلیل وجود ذرات ASP هستیم که یک سازوکار اتلافی مهم به شمار می‌رود و باعث بهبود استحکام خمشی و کششی بیوکامپوزیت شده است. علاوه بر آن، جدا شدن ذرات از درون ماتریس در کامپوزیت‌های ذره‌ای، مشابه با پدیده بیرون کشیدگی الیاف^۳ در کامپوزیت‌های لیفی، از جمله سازوکارهای اتلاف انرژی محسوب می‌شود که تا حدی عاملی کمک‌کننده است. حفرات می‌توانند ناشی از هوای به دام افتاده در حین فرایند اختلاط و ساخت باشند که در نهایت بر استحکام مکانیکی کامپوزیت‌ها تأثیر منفی گذاشته است.

¹ Debonding area

² Detached

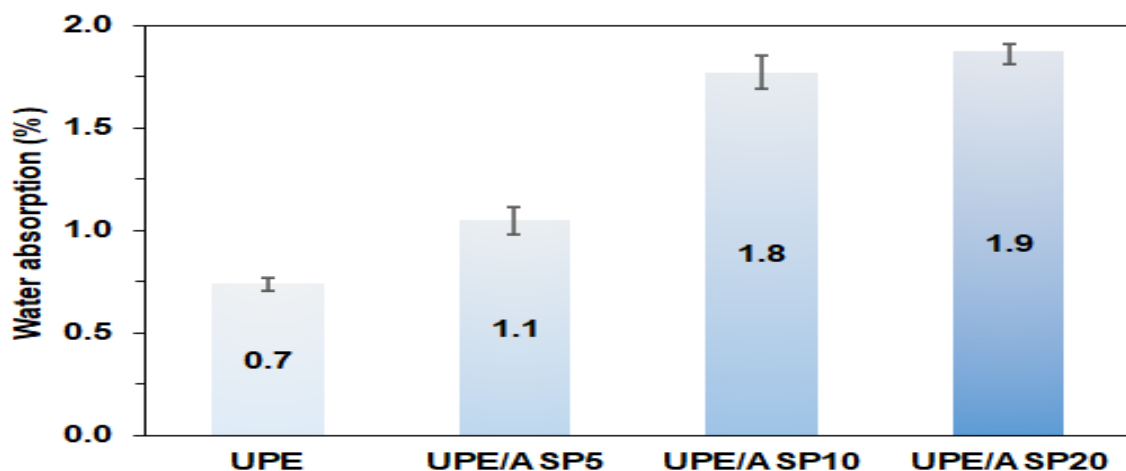
³ Fiber pull-out



شکل ۱۰. تصاویر SEM بیوکامپوزیت‌های پلی‌استر/بادام

- جذب آب

از جمله مهم‌ترین ملزومات کامپوزیت‌ها، به‌ویژه برای کامپوزیت‌های پلی‌استر که یکی از اصلی‌ترین کاربردهای آنها در قایق‌ها، سازه‌های دریایی و در محیط‌های در تماس با آب است، مقدار جذب آب است. به‌خصوص با توجه به اینکه گروه‌های استری موجود در رزین پلی‌استر در برابر هیدرولیز بسیار آسیب‌پذیر هستند. از طرفی، دیواره سلولی مواد لیگنوسلولزی که به‌عنوان تقویت‌کننده در کامپوزیت‌ها استفاده می‌شوند، حاوی گروه‌های هیدروکسید و سایر گروه‌های اکسیژن‌دار هستند که می‌توانند رطوبت را از طریق پیوند هیدروژنی جذب کنند. همی سلولز عمدتاً مسئول رطوبت جذب‌شده است؛ باین‌حال، سلولز سطحی در معرض دید، سلولز غیر بلوری، لیگنین و سلولز بلوری نیز می‌توانند نقش‌های مهمی ایفا کنند. شکل ۱۱ میزان جذب آب UPE و بیوکامپوزیت‌های آن را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که میزان جذب آب به‌طور صعودی با افزایش مقدار پودر پوسته بادام، افزایش یافته است. با افزایش محتوای ASP، تعداد گروه‌های هیدروکسید قادر به تشکیل پیوندهای هیدروژنی با آب نیز افزایش می‌یابد. علی‌رغم میزان بیشتر جذب آب بیوکامپوزیت‌ها از UPE خالص، هنوز هم مقادیر جذب آب آنها برای کاربردهای عملی، قابل‌قبول است. مقادیر جذب آب به‌دست‌آمده در مطالعه حاضر، بسیار نزدیک به مقادیر گزارش‌شده توسط Shejkar و همکارانش در کامپوزیت‌های اپوکسی/پودر گردو (حاوی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی پرکننده) است که اعدادی در بازه ۱/۹۵-۰/۸۱ و Ikladious و همکارانش در کامپوزیت‌های پلی‌استر/پودر بادام پوسته زمینی (حاوی ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درصد وزنی پرکننده) که اعدادی در بازه ۰/۵-۰/۵٪ را گزارش کرده‌اند.



شکل ۱۱. درصد جذب آب UPE و بیوکامپوزیت‌های آن

۴- نتیجه گیری

بیوکامپوزیت‌های متشکل از رزین پلی‌استر غیراشباع و مقادیر مختلف پودر پوسته بادام با به‌کارگیری روش قالب‌گیری ریخته‌گری با موفقیت ساخته شدند. به‌اختصار، ارزیابی‌های مکانیکی نشان از ارتقای مدول‌های کششی و خمشی و نیز استحکام خمشی بیوکامپوزیت‌ها با افزودن تدریجی پودر پوسته بادام بودند. به‌عنوان مقایسه تطبیقی، در پژوهشی توسط Chaudhary و همکارانش مشخص شد با افزایش میزان ASP از ۱۰٪ به ۳۰٪، مدول یانگ از ۱۶۵۲ مگا پاسکال به ۱۲۸۸ مگا پاسکال (معادل ۲۲٪) کاهش یافته است. در مورد استحکام کششی دو کامپوزیت فوق نیز کاهش از مقدار ۳۷ مگا پاسکال به ۲۶ مگا پاسکال را گزارش کرده‌اند که معادل حدود ۳۰٪ کاهش است. این در حالی است که در مطالعه حاضر، استحکام کششی دو بیوکامپوزیت UPE/ASP10 و UPE/ASP20 نیز تقریباً ثابت مانده است. این می‌تواند بیانگر وجود برهمکنش مناسب پلیمر/پرکننده است. در مورد مدول کششی نیز نکته حائز اهمیت، افزایش مدول کششی کامپوزیت‌ها با افزودن مقدار ASP است. در مورد استحکام خمشی در یک مقایسه تطبیقی با تحقیقات انجام‌شده، گروه‌های تحقیقاتی مختلف دریافته‌اند که افزودن آرد پوسته بادام به‌طور قابل‌توجهی استحکام خمشی انواع پلیمرها، از جمله اکریلونیتریل بوتادین (ABS)، پلی‌لاکتید و پلیمر مبتنی بر نشاسته را کاهش می‌دهد. این در حالی است که در مطالعه حاضر شاهد بهبود استحکام خمشی در کامپوزیت UPE/ASP20 بودیم. در مورد استحکام در برابر ضربه، روند نزولی با افزودن پودر پوسته بادام اتفاق افتاد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی به‌خوبی نشان داد که ذرات پوسته بادام از توزیع مناسبی درون ماتریس پلیمری برخوردار بودند. در مورد جذب آب نیز بیوکامپوزیت‌ها عملکرد قابل‌قبولی از خود به نمایش گذاشتند.

تقدیر و تشکر

از دانشگاه ارومیه بابت فراهم نمودن فضا و امکانات پژوهشی تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

منابع

- Alsaadi M, Erklığ A, Albu-khaleefah K. Effect of pistachio shell particle content on the mechanical properties of polymer composite. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2018;43(9):4689-4696.
- Arzumanova NB. Polymer biocomposites based on agro waste: Part iii. shells of various nuts as natural filler for polymer composites. *New Materials, Compounds and Applications*. 2021;5(1):19-44.
- Baller J, Thomassey M, Ziehmer M, Sanctuary R. The catalytic influence of alumina nanoparticles on epoxy curing. *Thermochemica acta*. 2011;517(1-2):34-39.
- Boujelben M, Abid M, Kharrat M, Dammak M. Production and mechanical characterization of LLDPE biocomposite filled with almond shell powder. *Polymers and Polymer Composites*. 2021;29(4):271-276.
- Chaudhary AK, Gope P, Singh V. Effect of almond shell particles on tensile property of particleboard. *J Mater Environ Sci*. 2013;4(1):109-112.
- Das O, Babu K, Shanmugam V, et al. Natural and industrial wastes for sustainable and renewable polymer composites. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022;158:112054.
- Doğan A, Güneş Ç. Improvement of mechanical, dynamic mechanical, and thermal properties of almond shell powder reinforced acrylonitrile butadiene styrene composites by addition of cerium oxide. *Polymer Composites*. 2025;
- Essabir H, Nekhlaoui S, Malha M, et al. Bio-composites based on polypropylene reinforced with Almond Shells particles: Mechanical and thermal properties. *Materials & Design*. 2013;51:225-230.
- Halpin J. Stiffness and expansion estimates for oriented short fiber composites. *Journal of composite materials*. 1969;3(4):732-734.
- Ibáñez García A, Martínez García A, Ferrándiz Bou S. Study of the influence of the almond shell variety on the mechanical properties of starch-based polymer biocomposites. *Polymers*. 2020;12(9):2049.
- Ibáñez-García A, Martínez-García A, Ferrándiz-Bou S. Influence of almond shell content and particle size on mechanical properties of starch-based biocomposites. *Waste and Biomass Valorization*. 2021;12(11):5823-5836.
- Ikladious N, Shukry N, El-Kalyoubi S, et al. Eco-friendly composites based on peanut shell powder/unsaturated polyester resin. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2019;233(5):955-964.
- Isam Bakr Albaker R, Kocaman S, Marti ME, Ahmetli G. Application of various carboxylic acids modified walnut shell waste as natural filler for epoxy-based composites. *Journal of Applied Polymer Science*. 2021;138(31):50770.
- Jose AS, Athijayamani A, Jani S. A review on the mechanical properties of bio waste particulate reinforced polymer composites. *Materials Today: Proceedings*. 2021;37:1757-1760.

- Koul B, Yakoob M, Shah MP. Agricultural waste management strategies for environmental sustainability. *Environmental Research*. 2022;206:112285.
- Kundie F, Azhari CH, Muchtar A, Ahmad ZA. Effects of filler size on the mechanical properties of polymer-filled dental composites: A review of recent developments. *J Phys Sci*. 2018;29(1):141-165.
- Liminana P, Quiles-Carrillo L, Boronat T, Balart R, Montanes N. The effect of varying almond shell flour (ASF) loading in composites with poly (butylene succinate (PBS) matrix compatibilized with maleinized linseed oil (MLO). *Materials*. 2018;11(11):2179.
- Manikumar R, Rao T. Unsaturated polyester resin synthesis for enhanced fiber-reinforced composite performance. *Digest Journal of Nanomaterials & Biostructures (DJNB)*. 2024;19(3):1-12.
- Manu T, Nazmi AR, Shahri B, Emerson N, Huber T. Biocomposites: A review of materials and perception. *Materials Today Communications*. 2022;31:103308.
- Pradhan P, Satapathy A. Physico-mechanical characterization and thermal property evaluation of polyester composites filled with walnut shell powder. *Polymers and Polymer Composites*. 2022;30:09673911221077808.
- Quiles-Carrillo L, Montanes N, Garcia-Garcia D, Carbonell-Verdu A, Balart R, Torres-Giner S. Effect of different compatibilizers on injection-molded green composite pieces based on polylactide filled with almond shell flour. *Composites Part B: Engineering*. 2018;147:76-85.
- Quiles-Carrillo L, Montanes N, Sammon C, Balart R, Torres-Giner S. Compatibilization of highly sustainable polylactide/almond shell flour composites by reactive extrusion with maleinized linseed oil. *Industrial Crops and Products*. 2018;111:878-888.
- Raman A, Kushwah K, Goyal S, Gangil B, Ranakoti L. Development and characterization of walnut/vinyl ester filled homogeneous and their functionally graded composites. *Materials Today: Proceedings*. 2021;47:7121-7126.
- Ramos M, Dominici F, Luzi F, et al. Effect of almond shell waste on physicochemical properties of polyester-based biocomposites. *Polymers*. 2020;12(4):835.
- Ramraji K, Rajkumar K, Sabarinathan P. Tailoring of tensile and dynamic thermomechanical properties of interleaved chemical-treated fine almond shell particulate flax fiber stacked vinyl ester polymeric composites. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2019;233(11):2311-2322.
- Sadroddini M, Hosseini KA. A review of recycling and reuse of vinyl advertising banners with the approach of reducing environmental challenges. *Journal of environmental Sciences Studies*. 2025;10(2):10245-10257.
- Safari G H, Safari M, Mussakhani N. An overview of production sources, advantages and disadvantages of biofuels as a renewable energy source. *Journal of Environmental Sciences Studies*. 2024;9(1):8054-8071.
- Salasinska K, Barczewski M, Górny R, Kloziński A. Evaluation of highly filled epoxy composites modified with walnut shell waste filler. *Polymer Bulletin*. 2018;75(6):2511-2528.
- Shaikhiev IG, Kraysman NV, Sverguzova SV. Review of almond (*Prunus dulcis*) shell use to remove pollutants from aquatic environments. *Biointerface Research in Applied Chemistry*. 2021;11(6):14866-14880.
- Shejkar SK, Agrawal B, Agrawal A. Effect of particle size on physical properties of epoxy composites filled with micro-size walnut shell particulates. *Materials Today: Proceedings*. 2021;47:2657-2661.
- Sutivisedsak N, Cheng HN, Burks CS, et al. Use of nutshells as fillers in polymer composites. *Journal of Polymers and the Environment*. 2012;20(2):305-314.
- Thipperudrappa S, Ullal Kini A, Hiremath A. Influence of zinc oxide nanoparticles on the mechanical and thermal responses of glass fiber-reinforced epoxy nanocomposites. *Polymer Composites*. 2020;41(1):174-181.
- Webb C, Qi K, Anguilano L, Rivera XS. Mechanical and environmental evaluation of ground calcium carbonate (CaCO₃) filled polypropylene composites as a sustainable alternative to virgin polypropylene. *Results in Materials*. 2024;22:100562.
- Zhao S, Zhao Z, Yang Z, Ke L, Kitipornchai S, Yang J. Functionally graded graphene reinforced composite structures: A review. *Engineering Structures*. 2020;210:110339.
- Zheng H, Sun Z, Zhang H. Effects of walnut shell powders on the morphology and the thermal and mechanical properties of poly (lactic acid). *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2020;33(10):1383-1395.