



میکرو کامپوزیت‌های پلیمری فوق جاذب ضربه بر پایه الیاف طبیعی- پلی استر

مهدي كاروان^{۱*}، محمد زينلي^۲، حديث عباسي دره بیدی^۳

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: mkarevan@iut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۸ مهر ۱۴۰۲

پذیرش: ۷ دی ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

کامپوزیت ترموست

انرژی ضربه

وزنه سقوطی

الیاف کنف

فوق جاذب

خواص تردی کامپوزیت‌های ترموست، منجر به محدودیت در کاربردهای وسیع‌تر این مواد شده است. در حالی که تردی این کامپوزیت‌ها با افزودن مواد تقویت‌کننده بحرانی تر هم می‌گردد. از طرفی استفاده از مواد بازگشت‌پذیر به طبیعت در استفاده از کامپوزیت‌ها به دلیل چالش‌های زیستی، مد نظر قرار گرفته شده‌است. با این وجود به دلیل عدم سازگاری مناسب فازهای تقویت‌کننده‌ی طبیعی با فاز پلیمر و افزودن الیاف طبیعی، باعث کاهش انرژی جذب و ضربه کامپوزیت می‌شود. این تحقیق به‌مواد و روش ساخت میکروکامپوزیت ترموست پلی‌استر تقویت‌شده با الیاف طبیعی کنف تا ۲۰ درصد وزنی بطور لایه‌گذاری موازی، هم‌راستا و متعامد می‌پردازد که با تقویت رزین پایه اولیه منجر به افزایش خواص ضربه‌پذیری پلیمر پایه تا ۲۴۰۰ درصد و قابلیت جذب انرژی نمونه‌ها با تا ۴۰ درصد بهبودی می‌گردد. نتایج مشاهده شده مرتبط با افزایش مشارکت الیاف طبیعی در انتقال نیرو و جذب انرژی در راستای الیاف بوده که در حین فرآیند ساخت و افزایش نفوذ رزین بین لایه‌ها و الیاف کنف صورت گرفته که قابلیت تهیه کامپوزیت با درصد بالای الیاف نیز در گروه‌بندی این نوع کامپوزیت‌ها را مهیا می‌کند.

High energy absorbent Polyester/Natural Kenaf based polymer micro-composites

Mehdi Karevan^{1*}, Mohammad Zeinali², Hadis Abbasi Dareh Bidi³

1- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

2- BSc Student, Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

3- BSc Student, Department of Agricultural Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

* Corresponding Author's Email: mkarevan@iut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 20 October 2023

Accepted: 28 December 2023

Keywords:

Thermosetting Composites

Impact Energy

Drop Weight

Kenaf Fiber

High Energy Absorbent

Abstract

The brittleness behavior of thermosetting composites has resulted in limitations in their wider applications. The said composites brittleness even becomes more critical upon the addition of reinforcing materials. Moreover, the use of materials recyclable to the environment in the use of composites has been considered to address challenges regarding bio-aspects, nevertheless die to the incompatibility of natural reinforcements with the polymer phase, the addition of natural fibers leads to the decrease in absorption energy and impact resistance of composites. The present study aims at the materials and the fabrication technique of polyester micro-composites reinforced with natural kenaf fiber up to 20 wt% laminated aligned or crossed perpendicularly, which has resulted in the increase in the impact resistance of the base polymer by 2400% and the energy absorption capability by 40% improvement. The observed enhancement is correlated to the increase in contribution of the natural fiber phase in load transfer and energy absorption aligned the fiber direction during the fabrication process and the improvement in the resin penetration within the kenaf fibers which also leads to the penetration ability of resin within the layers of high fiber ratio in this classification of composites.

Please cite this article using:

Karevan M, Zeinali M, Abbasi Dareh Bidi H. High energy absorbent Polyester/Natural Kenaf based polymer micro-composites. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 May 22;10(3):54-61. doi: 10.22034/IJME.2023.420948.1860 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

با افزایش سطح آگاهی عمومی، مواد پلیمری پایه نفتی جای خود را به مواد بازیافتی و مواد سبز داده‌اند. از مهمترین دلایل این جایگزینی، زیست سازگاری و زیست تخریب پذیری مواد طبیعی و همچنین کاهش مصرف انرژی است که کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از قبیل کربن دی‌اکسید را به همراه دارد [۱]. از طرف دیگر در کاربردهای مهندسی اغلب، تلفیق خواص در قطعات مورد نیاز است که ضمن ارائه استحکام بالا، سبک بوده و مقاومت به ضربه‌ی خوبی نیز داشته باشند [۲، ۳].

الیاف شیشه و کربن از متداولترین الیاف تقویت کننده در ساختارهای کامپوزیتی به شمار می‌روند. این کامپوزیت‌ها با وجود دارا بودن خواص مکانیکی بسیار خوب، به دلیل عدم زیست تخریب پذیری، موجب آلودگی محیطی می‌شوند؛ از این رو، استفاده از الیاف طبیعی در تولید کامپوزیت‌های پلیمری با راهبردهایی نظیر اصلاح سطح سعی در افزایش خواص مکانیکی این کامپوزیت‌ها مورد توجه قرار گرفته است [۴، ۵]. الیاف بامبو، سیسال، جوت، کتان و شاه‌دانه از جمله الیاف شناخته شده در تولید زیست کامپوزیت‌ها هستند [۶]. البته الیاف طبیعی در کنار این مزایا، معایبی نیز دارند. ماهیت آب دوست و چسبندگی ضعیف بین سطحی لیف-ماتریس، جذب رطوبت، ناهمگونی در خواص و پایداری گرمایی کم از جمله مهمترین مشکلات استفاده از این الیاف در کامپوزیت‌های پلیمری است [۷].

وازن^۱ و همکاران اثر درصد حجمی و نحوه‌ی توزیع الیاف نخل خرما بر خواص مکانیکی کامپوزیت پلی‌استر را بررسی کرده‌اند. در این پژوهش، در برخی نمونه‌ها الیاف با توزیع تک جهتی و در سایر نمونه‌ها به شکل پارچه در کامپوزیت استفاده شدند. طبق نتایج با افزایش درصد حجمی الیاف، استحکام کششی، ازدیاد طول و مدول کامپوزیت در تمام نمونه‌ها افزایش یافته است. اما کامپوزیت‌های دارای الیاف تک جهتی مقادیر بیشتری را در مقایسه با نمونه‌های حاوی پارچه نشان می‌دهند. الکابی^۲ و همکاران قابلیت استفاده از الیاف نخل خرما را به عنوان تقویت کننده در ماتریس پلی‌استر بررسی کرده‌اند [۸]. در این پژوهش، آرایش یافتگی الیاف به‌طور تصادفی بوده و نمونه‌های کامپوزیت به روش قالب‌گیری تولید شده است. طبق نتایج، خواص کامپوزیت به شدت تحت تأثیر طول و درصد وزنی الیاف قرار دارد. نتایج نشان می‌دهد که استحکام خمشی در نمونه‌های حاوی الیاف به طول ۲ سانتی‌متر، ۲۶٪ بیشتر از نمونه‌های حاوی الیاف به طول ۰/۵ سانتی‌متر بوده است. همچنین، کامپوزیت‌های دارای الیاف به طول ۱ و ۳ سانتی‌متر استحکام خمشی کمتری نسبت به الیاف دارای طول ۲ سانتی‌متر نشان دادند. رفیق^۳ و همکاران خواص مکانیکی و گرمایی کامپوزیت اپوکسی تقویت شده با الیاف نخل خرما و ذرات پوسته‌ی نارگیل به عنوان پرکننده را مطالعه کردند [۹]. در این پژوهش، الیاف نخل خرما موجود در تنه‌ی درخت، بدون جداسازی از یکدیگر استفاده شده‌اند. کامپوزیت‌ها به روش دستی تولید شده و درصد وزنی ماتریس در کلیه نمونه‌ها ۸۰٪ انتخاب شده بود. نتایج این تحقیق نشان داده است که در نمونه‌ی ۲۰٪ وزنی از الیاف نخل خرما، مدول خمشی تا ۷۵٪ بهبود یافته است. حق^۴ و همکاران اثر درصد وزنی الیاف را بر خواص مکانیکی کامپوزیت الیاف نخل خرما-پلی‌پروپیلن بررسی کرده‌اند [۱۰]. ابوالحسنی و همکاران کامپوزیت با زمینه‌ی رزین اپوکسی، تقویت شده با الیاف کنف را با روش دستی ساخته و تأثیر پارامترهای مختلف مانند طول الیاف (۵ میلی‌متر و ۹ میلی‌متر)، درصد جرمی الیاف (۵٪، ۱۰٪، ۱۲/۵٪ و ۱۵٪) و اصلاح الیاف روی خواص کششی، خمشی و جذب آب کامپوزیت را بررسی کردند [۱۱].

در روش‌های ترکیب مذاب نظیر پرس گرم و سرد در ساخت ترموپلاستیک‌های تقویت شده به دلیل عدم امکان ایجاد تنش برشی شدید و جریان پلیمر، امکان ایجاد کامپوزیت با خواص هموزن چه از نظر ظاهری چه از نقطه نظر خواص مکانیکی وجود نداشته و در حالت استفاده از درصدهای بالای ذرات تقویت کننده این موضوع حادث می‌گردد [۱۲، ۱۳]. از سوی دیگر کاهش خاصیت ترکندگی پلیمر در درصدهای بالای تقویت کننده به خصوص تقویت کننده‌ها با چگالی پائین که درصد حجمی بالایی را ایجاد می‌کند یک چالش جدی محسوب می‌شود. همچنین، استفاده از مواد تقویت کننده به طور الیاف، به دلیل کاهش سازگاری الیاف طبیعی/پلیمر خواص ضربه‌پذیری کامپوزیت را تا حد زیادی کاهش می‌دهد [۱۴]. این تحقیق، نسل جدیدی از کامپوزیت‌ها با لایه‌گذاری الیاف طبیعی با درصد نسبتاً بالای ۲۰ درصد را گزارش می‌دهد که تا ۲۴۰۰ درصد باعث بهبود خواص ضربه‌پذیری و تا ۴۰ درصد منجر به افزایش خواص جذب انرژی می‌گردد. به منظور دستیابی به حداکثر خواص ضربه‌پذیری، الیاف طبیعی به صورت پیوسته در ساختار فاز زمینه

¹ Wazzan

² Al-Kaabi

³ Rafeeq

⁴ Haque

جای‌گذاری شده و رزین ترموست قبل از ایجاد ترکندگی و یا نفوذ در داخل الیاف طبیعی هم راستا، تحت تنش‌های فشاری قرار گرفته و منجر به افزایش فصل مشترک الیاف طبیعی و رزین ترموست می‌گردد.

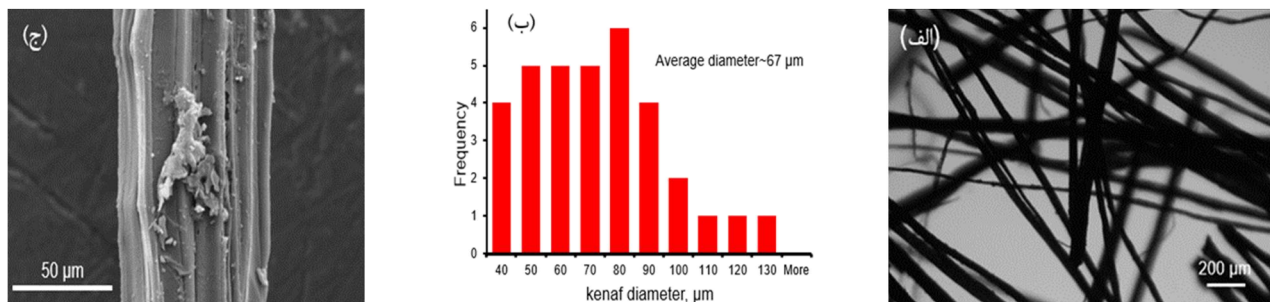
۲- نمونه‌سازی و آزمایش‌ها

۲-۱- مواد مورد استفاده

رزین پلی‌استر صنعتی با اجزاء رزین، هاردنر و کاتالیست کبالت به عنوان فاز ماتریس مورد استفاده قرار گرفت. الیاف کنف طبیعی با اندازه متوسط قطر الیاف، هیستوگرام توزیع ذرات و تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مطابق با شکل ۱ (الف) تا (ج) به ترتیب مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۲- روش ساخت

لایه‌گذاری الیاف کنف در داخل حفره قالب سیلیکون به صورت هم راستا در آرایش‌های چند لایه موازی (صفر درجه) و یا ۹۰ درجه چند لایه به صورت لایه نشانی متعام صورت گرفت. ترکیب کامپاند (ترکیب) با جزء هاردنر یا سخت‌کننده و کاتالیست رزین ترموست بر اساس دستورالعمل سازنده معادل درصد‌های وزنی ۲۰ درصد الیاف کنف انجام شد.



شکل ۱ تصاویر (الف) میکروسکوپ نوری، (ب) هیستوگرام توزیع ذرات و (ج) میکروسکوپ الکترونی روبشی کنف مورد استفاده در این تحقیق



شکل ۲ سمت راست قالب‌گیری و نحوه قراردادی همراستای الیاف کنف در قالب سیلیکون (رزین شفاف بر روی الیاف) و سمت چپ نمونه‌های تهیه شده طبق استاندارد ASTM D256 در آزمون ضربه در آرایش هم راستا

پس از لایه‌گذاری الیاف کنف به منظور تهیه کامپوزیت الیاف طبیعی/پلی‌استر، ریخته‌گری رزین کامپوزیت بر روی لایه‌های الیاف کنف بطور تناوبی تا ضخامت مورد نظر و به طور مشخص ۳-۶ میلی‌متر بستگی به خواص ضربه‌پذیری هدف و ضخامت لایه و چگالی مورد نظر و یا بستگی به ویسکوزیته رزین صورت گرفت. ایجاد فشار و پخت همزمان (پخت تحت فشار) بر روی نمونه داخل قالب معادل ۲-۵ مگاپاسکال یا بیشتر توسط وزنه در دمای محیط تا پخت کامل رزین در دمای اتاق انجام شد. عملیات پخت رزین می‌تواند در دمای ۵۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد در کوره خلاء صورت پذیرد که منجر به کاهش زمان ساخت نمونه می‌گردد. شکل ۲ چگونگی قالب‌گیری و نمونه‌های تهیه شده الیاف طبیعی/رزین پلی‌استر در قالب سیلیکونی را نمایش می‌دهد. به منظور بررسی اثر جهت الیاف، نمونه‌ها در دو راستای متعام برش خورده‌اند.

۲-۳- آزمايش‌ها و مشخصه‌یابی

۲-۳-۱- آزمون ضربه

برای اندازه‌گیری استحکام ضربه نمونه‌های کامپوزیتی با و بدون الیاف کنف از دستگاه ضربه ۲۲ ژول استفاده شد. نمونه‌های آزمون مطابق استاندارد ASTM D256 به ابعاد تقریبی $70 \times 12 \times 3/2$ (میلی‌متر مکعب) تهیه شد. قبل از انجام آزمون ضربه لازم است با استفاده از ابزار شکاف‌زن، شکافی با زاویه ۴۵ درجه بر روی نمونه‌های آزمون ضربه ایجاد شود. عمق شکاف مورد نظر مطابق استاندارد ASTM D256، در نظر گرفته شد [۱۵].

۲-۳-۲- انرژی ضربه سقوطی

به منظور بررسی جذب کامپوزیت‌های پلی‌استر/کنف، از سامانه ضربه سقوطی استفاده شد که بر اساس تغییر فرم تیر یکسرگیردار و میزان انتقال انرژی از نمونه به تیر با توجه به پتانسیل اولیه وزنه رها شده بر اساس حسگرهای لوسل نیروسنج و تبدیل نیرو به انرژی ذخیره شده استفاده شد [۱۶-۱۷]. در این سامانه نمونه بر روی تیر توسط گیره‌های چهارگانه متصل شده و با رهائش وزنه به جرم مشخص، آسیب بر روی نمونه صورت می‌پذیرد. در این آزمون از وزنه سقوطی به جرم ۶۷۵ گرم با ارتفاع سقوط ۱ متر استفاده شد. تصویر ۳ نمایانگر گیره‌بندی نمونه قبل و پس از برخورد وزنه سقوطی در حالت شکست می‌باشد.



(ب)



(الف)

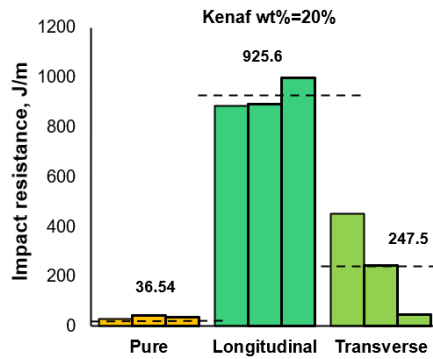
شکل ۳ الف) گیره بندی نمونه کامپوزیت و ب) آسیب نمونه پس از رهائش وزنه سقوطی

۳- نتایج و بحث

۳-۱- استحکام ضربه

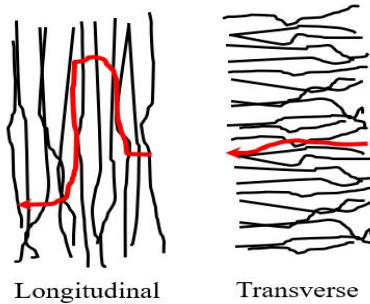
شکل ۴ مقادیر استحکام ضربه در آزمون ضربه آیزود را بر حسب مقدار درصد الیاف و جهت بارگذاری الیاف نسبت به نیروی ضربه نمایش می‌دهد. همانطور که مشخص است با افزودن الیاف در جهت عمود بر نیروی ضربه، متوسط استحکام ضربه به اندازه ۲۴۰۰ درصد افزایش پیدا کرده و این افزایش در خصوص نمونه‌ها با جهت الیاف موازی با نیروی ضربه حدود ۵۸۰ درصد می‌باشد. دلیل تغییر در استحکام ضربه در حالت الیاف موازی انرژی ضربه مرتبط با سهولت در رشد ترک به موازات الیاف بدون امکان جذب انرژی در اثر کشیده شدن^۱ الیاف از فاز زمینه و ایجاد تنش برشی با تمرکز تنش در راستای الیاف است [۱۸، ۱۹]. با این وجود به دلیل حرکت و مسیر ترک در راستای انحرافی نسبت به جهت الیاف مسیر تحت شکست گسترش یافته که منجر به افزایش استحکام شکست می‌شود. در این حالت، الیاف نقش کمتری را بر روی ایجاد یک کامپوزیت دو فازی داشته چرا که ترک می‌تواند به سادگی در کنار الیاف رشد کند. دلیل اختلاف در استحکام ضربه در حالت الیاف موازی انرژی ضربه مطابق با شکل ۴ می‌تواند معطوف به این دلیل باشد. با این وجود در حالتی که جهت الیاف عمود بر راستای نیرو است، علاوه بر ایجاد مسیر طولانی‌تر در ایجاد ترک توسط الیاف، انرژی ضربه صرف بیرون کشیدن الیاف از فاز زمینه شده که خود باعث صرف انرژی بیشتر به منظور توسعه ترک می‌شود. آزمایشات همچنین نشان می‌دهد اثر آگلومره الیاف در حالت الیاف موازی با جهت ضربه اثر بیشتری بر روی کاهش خواص ضربه‌پذیری کامپوزیت دارد.

¹ Fiber Pull-out



شکل ۴ انرژی ضربه در تست آیزود نمونه‌های کامپوزیتی در دو راستای هم محور عمود و موازی نیروی ضربه در درصد الیاف ۲۰ درصد

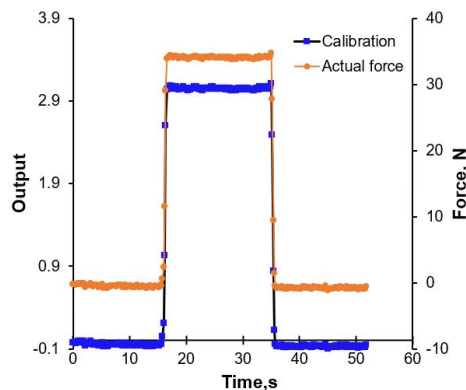
شکل ۵ معرف تصویرواره پیشنهادی رشد ترک در دو حالت الیاف موازی و عمود نسبت به جهت نیروی ضربه می‌باشد. همانطور که نشان داده شده است، انتظار می‌رود الیاف موازی با جهت نیروی ضربه ممانعت کمتری در خصوص رشد ترک نسبت به حالت الیاف عمود بر جهت نیروی ضربه ایجاد نماید چرا که واماندگی الیاف بر صورت کشش از فاز زمینه و یا برش آن می‌تواند صورت بگیرد [۲۰].



شکل ۵ مسیر رشد ترک در آزمون ضربه نسبت به جهت الیاف در تصویرواره

۳-۲- انرژی جذب

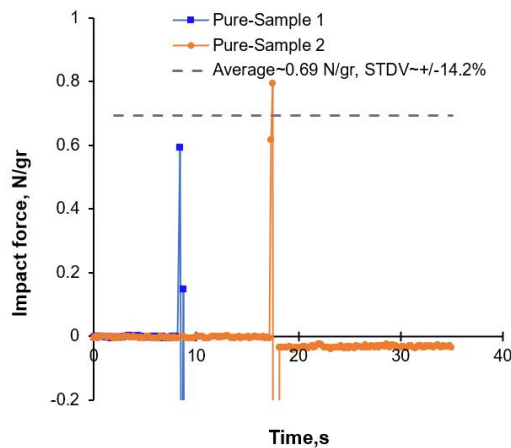
شکل ۶ نمودارهای کالیبراسیون سامانه حسگر نیرو^۱ آزمون وزنه سقوطی را نشان می‌دهد که در آن ضریب مورد نظر به منظور اصلاح خروجی حسگر نیرو در آزمون سقوطی به دست می‌آید. همانطور که مشخص است به منظور دستیابی به ضریب کالیبراسیون، وزنه مشخص با جرم مشخص بر روی حسگر نیرو قرار داده شده و با هدف دستیابی به خروجی معادل وزن جرم مورد استفاده، خروجی حسگر نیرو در هر نیرو (نمودار آبی رنگ) با ضرب در ضریب کالیبراسیون به مقدار آن بر حسب نیوتن (نمودار نارنجی رنگ) تبدیل می‌گردد.



شکل ۶ نمودارهای کالیبراسیون حسگر نیرو وزنه سقوطی

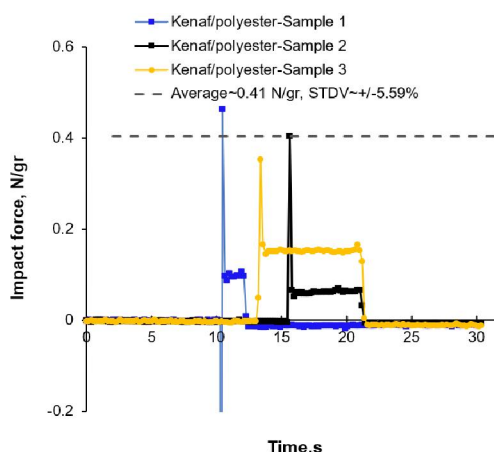
^۱ Load Cell

شکل ۷ مقادیر انرژی جذب توسط نمونه‌های پلیمری خالص نمایش می‌دهد. همانطور که مشخص است با اعمال وزنه سقوطی، مقدار نیروی انتقالی به حسگر نیرو بر واحد جرم نمونه برابر $0/69$ نیوتن بر گرم است. شایان ذکر است به دلیل حذف اثر جرم نمونه‌ها، مقدار نیروی اندازه‌گیری شده بر واحد جرم نمونه، نرمالایز شده است. شکل ۸ نمایشگر نیروی جذب توسط نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف بوده، همانطور که مشاهده می‌گردد، با افزودن الیاف مقدار نیروی انتقالی به حسگر نیرو به میزان ۴۰ درصد کاهش می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهد که با قرارگیری نمونه بر روی سامانه وزنه سقوطی، میزان بیشتری از انرژی توسط نمونه جذب شده و در نتیجه مقدار کمتری از نیروی ضربه به حسگر نیرو منتقل شده است.



شکل ۷ جذب انرژی در وزنه سقوطی بر روی نمونه‌های ترموست خالص

این نتایج مطابق با نتایج حاصل از نتایج استحکام ضربه بوده نشان می‌دهد به طور کل، افزودن لایه‌های الیاف کنف باعث افزایش چشمگیر در استحکام ضربه و انرژی جذب توسط نمونه‌های کامپوزیتی می‌گردد [۲۱]. نتایج شکل ۷ در خصوص انحراف از مقدار متوسط نشان می‌دهد که با توجه به ضربه وزنه سقوطی با رهایش و جهت عمودی نیرو بر راستای الیاف، مقادیر انرژی جذب کمتر از مقادیر استحکام ضربه به عواملی چون راستای الیاف و فازهای آگلومره الیاف با مقادیر احتمالی ترشدگی کمتر الیاف حساس است [۲۲، ۲۳]. شکل ۳ (ب) همچنین نشان می‌دهد که جهت رشد آسیب در آزمون وزنه سقوطی مستقل از جهت الیاف بوده و الیاف بطور تصادفی باعث رشد ترک می‌گردد [۲۴].



شکل ۸ جذب انرژی در وزنه سقوطی بر روی نمونه‌های ترموست تقویت شده با الیاف کنف

۴- نتیجه‌گیری

کامپوزیت‌های لمینت الیاف کنف/پلی‌استر ترموست با ۲۰ درصد الیاف به منظور بررسی اثر راستای الیاف بر روی استحکام ضربه و خواص جذب انرژی کامپوزیت‌ها ساخته شد. نتایج نشان داد هم‌راستایی و جهت الیاف عمود بر جهت نیروی ضربه در آزمون آیزود منجر به تولید کامپوزیت‌های الیاف طبیعی با ۲۴۰۰ درصد افزایش در استحکام ضربه شده در حالیکه در کامپوزیت‌ها با جهت الیاف در راستای نیروی ضربه این افزایش معادل ۵۸۰ درصد بهبود نسبت به نمونه‌های خالص است. مشاهدات همچنین در آزمون وزنه سقوطی نشان داد مقدار انرژی جذب توسط نمونه‌های کامپوزیتی حدود ۴۰ درصد بهبود نسب به نمونه‌های پلیمری خالص دارد. افزایش مقدار استحکام شکست و انرژی جذب کامپوزیت‌های الیاف طبیعی با مقدار صرف انرژی به منظور کشیدن الیاف به خارج از بستر فاز زمینه، گسترش مسیر رشد ترک و کیفیت چسبندگی الیاف/پلیمر تحت تاثیر فازهای آگلومره الیاف مرتبط شد. نتایج تحقیق، روش ساخت و افزایش انرژی ضربه به منظور توسعه کامپوزیت‌های الیاف طبیعی در ساخت سازه‌ها و قطعات تحت ضربه را ارائه داده که در عین حال در راستای توسعه فناوری‌های سبز و کامپوزیت‌های دوستدار طبیعت معرفی شده است.

تشکر و قدردانی

با تشکر از آزمایشگاه پلیمر و نانوکامپوزیت دانشگاه صنعتی اصفهان-دانشکده مهندسی مکانیک به منظور حمایت مالی، تجهیزاتی و علمی در انجام این تحقیق.

References

- [1] Islam MZ, Sarker ME, Rahman MM, Islam MR, Ahmed AF, Mahmud MS. Green composites from natural fibers and biopolymers: A review on processing, properties, and applications. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*: 2022 Jul;41(13-14):526-57. doi: 10.1177/073168442110587
- [2] Koppaarthi SD, Netravali AN. Green composites for structural applications. *Composites Part C: Open Access*: 2021 Oct 1;6:100169. doi: 10.1016/j.jcomc.2021.100169
- [3] Kamble Z, Behera BK, Mishra R, Behera PK. Influence of cellulosic and non-cellulosic particle fillers on mechanical, dynamic mechanical, and thermogravimetric properties of waste cotton fibre reinforced green composites. *Composites Part B: Engineering*: 2021 Feb 15;207:108595. doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108595
- [4] Negawo TA, Polat Y, Kilic A. Effect of compatibilizer and fiber loading on ensete fiber-reinforced HDPE green composites: Physical, mechanical, and morphological properties. *Composites Science and Technology*: 2021 Sep 8;213:108937. doi: 10.1016/j.compscitech.2021.108937
- [5] Asumani O, Paskaramoorthy R. Fatigue and impact strengths of kenaf fibre reinforced polypropylene composites: Effects of fibre treatments. *Advanced Composite Materials*: 2021 Mar 4;30(2):103-15. doi: 10.1080/09243046.2020.1733308
- [6] Thakur VK, Thakur MK, Gupta RK. Raw natural fiber-based polymer composites. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*: 2014 Apr 3;19(3):256-71. doi: 10.1016/j.jmrt.2019.04.012
- [7] Verma R, Shukla M, Shukla DK. Effect of glass fibre hybridization on the water absorption and thickness of alkali treated kenaf-epoxy composites. *Materials Today: Proceedings*: 2021 Jan 1;44:2093-6. doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.181
- [8] Al-Kaabi K, Al-Khanbashi A, Hammami A. Date palm fibers as polymeric matrix reinforcement: DPF/polyester composite properties. *Polymer composites*: 2005 Oct;26(5):604-13. doi: 10.1002/pc.20118
- [9] Rafeeq SN, Abdulmajeed IM, Saeed AR. Mechanical and thermal properties of Date Palm Fiber and Coconut shell particulate filler reinforced Epoxy composite. *Indian J. Appl. Res*: 2013 Apr;3(4):89-92. doi: 10.1016/j.matdes.2013.06.022
- [10] Haque MM, Hasan M, Islam MS, Ali ME. Physico-mechanical properties of chemically treated palm and coir fiber reinforced polypropylene composites. *Bioresource technology*: 2009 Oct 1;100(20):4903-6. doi: 10.1016/j.biortech.2009.04.072
- [11] Abolhasani S, Fallah F, Akbari J. Manufacturing and Investigating Mechanical Properties of Polymeric Composites Reinforced with Natural Fibers %J Modares Mechanical Engineering: 2019;19(1):75-83. doi: 10.1002/mame.201300008

- [12] Kumar S, Gupta D, Sharma V, Chaudhary AK, Meena ML. Recent development in natural fiber composites, testing and fabrication methods: A review. *Materials Today: Proceedings*: 2023 Feb 16. doi: [10.1016/j.matpr.2023.02.073](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.073)
- [13] Dev B, Rahman A, Alam R, Repon R, Nawab Y. Mapping the progress in natural fiber reinforced composites: Preparation, mechanical properties, and applications. *Polymer Composites*: 2023 May 4. doi: [10.1002/pc.27376](https://doi.org/10.1002/pc.27376)
- [14] Kamatchi T, Saravanan R, Rangappa SM, Siengchin S. Effect of filler content and size on the mechanical properties of graphene-filled natural fiber-based nanocomposites. *Biomass Conversion and Biorefinery*: 2023 Feb 10:1-0. doi: [10.1007/s13399-023-03911-9](https://doi.org/10.1007/s13399-023-03911-9)
- [15] Prasanthi PP, Srinag T, Ram NR, Krishna TR, Chaitanya N. Energy-absorbing capacity of natural hybrid fiber-epoxy composites under impact loading. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*: 2022;44(6):236. doi: [10.1007/s40430-022-03537-4](https://doi.org/10.1007/s40430-022-03537-4)
- [16] Rahman MZ, Jayaraman K, Mace BR. Impact energy absorption of flax fiber-reinforced polypropylene composites. *Polymer Composites*: 2018;39(11):4165-75. doi: [10.1002/pc.24486](https://doi.org/10.1002/pc.24486)
- [17] López-Alba E, Schmeer S, Díaz F. Energy absorption capacity in natural fiber reinforcement composites structures. *Materials*: 2018;11(3):418. doi: [10.3390/ma11030418](https://doi.org/10.3390/ma11030418)
- [18] Salleh Z, Hyie KM, Berhan MN, Taib YM, Hassan M, Isaac D. Effect of low impact energy on kenaf composite and kenaf/fiberglass hybrid composite laminates. *Applied Mechanics and Materials*: 2013;393:228-33. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMM.393.228](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.393.228)
- [19] Malingam SD, Ng LF, Chan KH, Subramaniam K, Selamat MZ, Zakaria KA. The static and dynamic mechanical properties of kenaf/glass fibre reinforced hybrid composites. *Materials Research Express*: 2018;5(9):095304. doi: [10.1088/2053-1591/aad58e](https://doi.org/10.1088/2053-1591/aad58e)
- [20] Nor MAM, Sapuan SM, Yusoff MZM, Zainudin ES. Mechanical, thermal and morphological properties of woven kenaf fiber reinforced polylactic acid [PLA] composites. *Fibers and Polymers*: 2022;23(10):2875-84. doi: [10.1007/s12221-022-4370-2](https://doi.org/10.1007/s12221-022-4370-2)
- [21] Stephen C, Shivamurthy B, Mohan M, Mourad A-HI, Selvam R, Thimmappa B. Low velocity impact behavior of fabric reinforced polymer composites-A review. *Engineered Science*. 2022;18:75-97. doi: [10.30919/es8d670](https://doi.org/10.30919/es8d670)
- [22] Mohammed M, Oleiwi JK, Mohammed AM, Jawad AJ, Osman AF, Adam T, Betar BO, Gopinath SC, Dahham OS, Jaafar M. Comprehensive Insights on Mechanical Attributes of Natural-Synthetic Fibres in Polymer Composites. *Journal of Materials Research and Technology*: 2023 Jun 20. doi: [10.1016/j.jmrt.2023.06.148](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.148)
- [23] Nijjar S, Sudhakara P, Sharma S, Saini S. Overview on the latest trend and development on mechanical, tribological & microstructural properties of natural fibre polymer composites. *Materials Today: Proceedings*: 2022;63:663-72. doi: [10.1016/j.matpr.2022.04.733](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.733)
- [24] Abbas A-GN, Aziz FNAA, Abdan K, Mohd Nasir NA, Norizan MN. Kenaf fibre reinforced cementitious composites. *Fibers*: 2022;10 (1):3. doi: [10.3390/fib10010003](https://doi.org/10.3390/fib10010003)