جلد 8، شماره 4، ص‌ص 1871-1861

نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری **کامپوزیت**

http://jstc.iust.ac.ir

جذب انرژی کامپوزیت‌های هیبرید پلی‌استر/الیاف طبیعی کنف/کربن‌سیاه تحت تأثیر نسبت‌اندازه الیاف

مهدی کاروان[1*]، محمدصادق میرزایی سیچانی[2] علی اکبری دستگردی[2]

1- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

2- کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

* اصفهان، صندوق پستی 84156-83111، mkarevan@iut.ac.ir

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1401/04/27

پذیرش: 1401/06/03

کلیدواژگان

میکروکامپوزیت، الیاف طبیعی کنف، مقاومت ضربه، جذب انرژی، هم‌افزایی

چکیده

مقاومت به ضربه و جذب انرژی کامپوزیت‌های گرماسخت نه تنها به دلیل تردی ذاتی فاز زمینه یک چالش جدی محسوب می‌گردد، بلکه تقویت این فاز زمینه با دیگر مؤلفه‌های کامپوزیتی به دلیل وجود فازهای کلوخه‌ای و برهمکنش‌های ضعیف در غیاب اصلاح‌کننده‌ها و عامل‌های کوپلینگ (جفت‌کننده) و در نتیجه انتقال نیروی ضعیف در فصل‌مشترک می‌تواند خواص جذب انرژی کامپوزیت‌های گرمانرم را بحرانی‌تر نماید. یکی از کمیت‌های هندسی مهم بر روی عوامل مذکور، ضریب‌اندازه مؤثر الیاف می‌باشد. در این مطالعه، میکروکامپوزیت‌های هیبرید الیاف طبیعی کنف/پلی‌استر توسط روش ترکیب مستقیم با نسبت‌اندازه نامی الیاف کنف معادل 160، 250 و 320 ساخته شده و به‌منظور بررسی خواص هم‌افزایی، میکروذرات کربن‌سیاه با صفر تا 8 درصد وزنی به نمونه‌ها با درصد الیاف 5 افزوده شد. نتایج تأثیر مستقیم ضریب‌اندازه و درصد وزنی الیاف بر روی استحکام ضربه را با افزایش تا 203٪ نشان داد. اثر هم‌افزایی کربن‌سیاه بر روی نمونه‌های مرجع با طول الیاف 0.5 و 1 سانتی‌متر با درصد 5 منجر به 108٪ افزایش در استحکام ضربه در طول الیاف 0.5 سانتی‌متر شد ولیکن در طول الیاف بلندتر منجر به کاهش ضربه‌پذیری و عدم تأثیر چشمگیر بر انرژی جذب کامپوزیت‌ها شد. مشاهده 28 و 65 درصد بهبود انرژی جذب به ترتیب نسبت به پلی‌استر خالص و نمونه‌های مرجع 5٪ کنف با طول 0.5 سانتی‌متر در 5٪ کربن‌سیاه اثر هم‌افزایی کربن‌سیاه/کنف را تائید نمود.

Energy absorption of polyester/kenaf fiber/carbon black hybrid composites affected by fibers aspect ratio

Mehdi Karevan[1*], Mohammad-Sadegh Mirzaei Sichani[1], Ali Akbari Dastgerdi[1]

1- Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

* P.O.B. 84156-83111 Isfahan, Iran, mkarevan@iut.ac.ir

Keywords

Microcomposites, Natural kenaf fiber, Impact resistance, Energy absorption, Synergy

Abstract

Impact resistance and energy absorption of thermosetting composites is not only due to the inherent brittleness of the matrix, but also reinforcing the matrix with other composite components due to agglomerated phases, weak interfacial interaction at the absence of functionalization and coupling agents and thus weak interfacial load transfer could result in more deteriorated thermosetting composites energy absorption behavior. One important geometrical quantity is the effective aspect ratio (AR) of fillers. In this study, hybrid microcomposites of natural kenaf fiber/polyester was prepared through a direct mixing technique using nominal fiber's ARs of 160, 250 and 320. To evaluate the synergistic effects, micro-particles of carbon black (CB) at the loading of 0 to 8 wt% were added to specimens with kenaf wt% of 5. The results demonstrated the direct influence of AR and wt% of fibers on the impact resistance with up to 203% improvement. The synergistic effect of CBs on the reference sample containing 5 wt% of fibers of 0.5 and 1 cm and 5 wt% led to 108% increase in the impact resistance in the case of 0.5 cm long fibers; however, at longer fibers the addition of CB resulted in the decrease in impact resistance and no significant changes in absorbed energy. The observed 28 and 65% enhancement in the absorbed energy of behavior of samples filled 5wt% of CB and 5 wt% of kenaf with the length of 0.5 cm compared to neat polyester and the reference kenaf/polyester parts, respectively, confirmed the synergistic effect of CBs and kenaf.

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

Karevan, M., Mirzaei Sichani, M. S., Akbari Dastgerdi, A., "Energy absorption of polyester/kenaf fiber/carbon black hybrid composites affected by fibers aspect ratio," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 4, pp. 1861-1871, 2022.

https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.557725.1794

1- مقدمه

الیاف طبیعی که به کامپوزیت‌های سبز نیز معروف هستند، با محیط‌زیست سازگاری مناسبی دارند. از این رو استفاده از کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف طبیعی به طور گسترده‌ای در بخش‌های مختلف مانند خودروسازی، صنایع دریایی، بسته‌بندی مواد و موارد دیگر گسترش یافته است. این موضوع عمدتاً به دلیل مزایای الیاف طبیعی در مقایسه با الیاف مصنوعی از جمله هزینه کم، چگالی پایین، آسیب‌رسانی کمتر به تجهیزات فرآوری، خواص مکانیکی نسبی خوب، تجدیدپذیری منابع و تجزیه‌پذیری، بوده است [1, 2].

از شایع‌ترین گیاهان طبیعی مورد استفاده به عنوان فاز تقویت‌کننده در کامپوزیت‌ها، می‌توان الیافی مانند جوت[1]، کتان[2]، کناف و سیسال[3] را نام برد [3, 4]. با این‌وجود علیرغم کاربردهای وسیع الیاف طبیعی در تقویت کردن پلیمرها به‌منظور ساخت کامپوزیت‌ها با خواص بهبود یافته، تردی ذاتی پلیمرهای ترموست و چالش‌های متعدد دیگر از فرآیند ساخت تا تفرق الیاف، سازگاری شیمیایی پلیمر/الیاف و مشخصه‌یابی دقیق و ارتباط بین خواص مکانیکی-ساختار توسعه گسترده کامپوزیت‌های الیاف طبیعی را هنوز به ویژه در مبحث استحکام ضربه آن‌ها محدود کرده است [5-8].

رامش و همکاران [9] خواص مکانیکی کامپوزیت اپوکسی تقویت‌شده با الیاف ترکیبی شیشه-سیسال و شیشه-جوت را بررسی کردند. این محققان از رزین اپوکسی به‌منظور ساخت نمونه‌ها استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که نمونه‌های حاوی الیاف شیشه-سیسال دارای مقاومت کششی برتر و نمونه‌های حاوی الیاف شیشه-جوت بیشترین بار خمشی را تحمل می‌کنند. ردی و همکاران [10] خواص مکانیکی نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده از الیاف طبیعی جوت، برگ آناناس[4] و الیاف شیشه را با نسبت 1:1:1 و رزین‌های پلی‌استر و اپوکسی بررسی کردند. کسر حجمی الیاف در کامپوزیت از 0.18 تا 0.42 متغیر بوده و تغییر خواص مکانیکی مانند کشش، خمش، ضربه در هر مورد، مطالعه شده است. نتایج نشان داده است که نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده از الیاف طبیعی و رزین اپوکسی نسبت به رزین پلی‌استر خواص بهتری را از خود بروز می‌دهند.

پریت سینگ و همکاران [11] مطالعاتی در زمینه تعیین خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پایه پلیمری تقویت‌شده با الیاف طبیعی مختلف از جمله جوت، موز و سیسال انجام دادند. الیاف طبیعی به کار برده شده به صورت تک جهته و ساخت نمونه‌ها به روش لایه‌گذاری دستی انجام شده است. در این پژوهش خواص مکانیکی مانند استحکام کششی، مقاومت خمشی و مقاومت به ضربه برای کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف طبیعی عمل‌آوری شده و غیر عمل‌آوری شده بررسی و مقایسه شده است. آن‌ها دریافتند که استحکام کششی کامپوزیت‌ها با به کارگیری الیاف طبیعی بهبود یافته است. علاوه بر این، افزایش قابل توجهی در مقاومت کششی و خمشی با استفاده از اصلاح سطحی الیاف مشاهده شده است. با این وجود مطابق با تحقیقات قبلی، کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف جوت بالاترین استحکام کششی بیشتری را ارائه داده‌اند. وامبوآ و همکاران [12] خواص مکانیکی الیاف طبیعی مختلف (سیسال، کنف، جوت، شاهدانه و پوست نارگیل[5]) را در کامپوزیت‌های پلی‌پروپیلن بررسی کردند. نتایج مطالعات تجربی آن‌ها نشان داده است که مدول کششی، مقاومت به ضربه و تنش کششی نهایی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کنف با افزایش نسبت حجمی الیاف افزایش می‌یابد. همچنین، کامپوزیت‌های لایه‌ای پلی‌پروپیلن/نارگیل دارای کمترین خواص مکانیکی هستند. بعلاوه، مشاهده شد که کامپوزیت‌های حاوی الیاف شاهدانه دارای بیشترین مقاوم کششی 52 مگاپاسکال و استحکام خمشی 54 مگاپاسکال و مدول کششی 6.2 مگاپاسکال در مقایسه با دیگر کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف طبیعی است. خواتانه و همکاران [13] خواص مکانیکی و حرارتی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف شاهدانه محلی (آفریقایی) و الیاف تولیدی کشور فرانسه را مقایسه کردند. در تمامی نمونه‌ها مشاهده شد که با افزایش مقدار الیاف، استحکام کششی، مدول الاستیک و استحکام خمشی افزایش یافته است و مقاومت به ضربه کاهش می‌یابد. در این تحقیق، خواص حرارتی با استفاده از روش ترموگرافی اندازه‌گیری شد. نشان داده شد کامپوزیت‌های تشکیل شده از الیاف شاهدانه و فاز زمینه پلی‌پروپیلن خواص برتری در مقایسه با رزین خالص دارند. موهان و کومار [14] مطالعاتی تجربی بر روی کامپوزیت‌های پلیمری زیستی انجام داده‌اند. آن‌ها از پودر پوست نارگیل، پوست گردو و پوست برنج به عنوان فاز تقویت‌کننده با رزین اپوکسی برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی هیبریدی استفاده کرده‌اند. ترکیبات الیاف در هر نمونه با نسبت 1:1 بوده است. خواص مکانیکی از جمله استحکام کششی، مقاومت خمشی، مقاومت برشی و مقاومت به ضربه برای نمونه‌ها در حضور رطوبت و بدون رطوبت را بررسی کرده‌اند. آن‌ها دریافتند که ادغام پوست گردو و نارگیل می‌تواند خواص را بهبود بخشد.

ایزا و همکاران [15] از برگ آناناس پودر شده به عنوان تقویت‌کننده و پرکننده در ساخت کامپوزیت‌های پلی‌اتیلن سنگین استفاده کردند. آن‌ها اثر پودر برگ آناناس را بر خواص مکانیکی نمونه‌های کامپوزیتی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمون‌های مکانیکی بر روی نمونه‌ها، افزایش در استحکام کششی، مدول کششی، مقاومت خمشی، مقاومت سایشی و سختی را نشان داده است. نتایج مطالعات بیانگر آن است که مقاومت کششی با 6.49 درصد به ازای 2 درصد وزنی پرکننده و 3.39 درصد به ازای 10 درصد وزنی پرکننده افزایش یافته است. همچنین، با افزودن 2 و 10 درصد وزنی از برگ آناناس پودر شده به ترتیب 2.4 و 10.24 درصد کاهش کرنش شکست به دست آمده است.

سنتیل و سیریستی [16] خواص مکانیکی کامپوزیت پلیمری تقویت‌شده با الیاف طبیعی (جوت، نارگیل و علف) را با انجام آزمون‌های خمش، سختی سنجی، جذب آب و سایش به دست آوردند. با توجه به خواص به دست آمده، استفاده از الیاف طبیعی را در تولید صندلی خودرو بررسی کردند. مشخص شد کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف علف خشک شده، بهترین مورد در تولید روکش صندلی خودرو نسبت به الیاف جوت و لیفت نارگیل می‌باشد.

مطابق با تحقیقات صورت گرفته و مطالعات گزارش شده بر روی کامپوزیت‌های گرماسخت تقویت‌شده با الیاف طبیعی می‌توان اینچنین برداشت کرد که موضوع ضربه‌پذیری کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف طبیعی همچنان یکی از چالش‌های توسعه این کامپوزیت‌ها در کاربرد آن‌ها و همچنین مباحث مدل‌سازی تحلیلی و یا محاسباتی این نسل از کامپوزیت‌ها بوده چراکه به دلیل وجود فاکتورهای متعدد در تناقض با فرض و فرضیات فرمولاسیون و ساخت نمونه، روند تغییرات در خواص مکانیکی به ویژه خواص مرتبط با چقرمگی و ضربه‌پذیری مورد ابهام و یا عدم پاسخگویی قرار می‌گیرد. بطور مثال، یکی از محدودیت‌های جدی در خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف طبیعی عموماً کاهش خواص ضربه‌پذیری کامپوزیت‌ها به دلیل عیوب پدید آمده در فرآیند ساخت یا ماهیت تقویت‌کننده‌ها از جمله خواص فیزیکی-مکانیکی

[1] Jute
[2] Flax
[3] Sisal
[4] Pineapple leaf
[5] Hemp and coir

آن‌ها و تغییر در هندسه تقویت‌کننده، مانند نسبت ضریب‌اندازه مؤثر[1] آن‌ها (نسبت طول مؤثر به قطر الیاف در راستای اعمال نیرو) می‌باشد. این امر هنگامی‌که طول مؤثر الیاف تحت عملیات ساخت و یا طراحی کامپوزیت تغییر یابد (عموماً کاهش یابد) منجر به کاهش میزان انتقال نیرو از زمینه پلیمری به الیاف می‌گردد. این چالش باعث کاهش خواص مکانیکی شده و راندمان تقویت‌کنندگی را علیرغم انتظار دچار افت می‌کند [17, 18].

کاهش نسبت ضریب‌اندازه مؤثر همچنین می‌تواند متأثر از عوامل دیگر نظیر کیفیت فاز میانی[2] در فصل‌مشترک الیاف/پلیمر حاصل از میزان چسبندگی و سازگاری الیاف پلیمر بوده که هنگامی‌که عدم استفاده از سازگارکننده شیمیایی و یا عامل‌های جفت کننده (کوپلینگ) مد نظر باشد، به ویژه در حالیکه آب‌گریزی متفاوت الیاف و فاز زمینه پلیمر مداخله نماید، کاهش انتقال نیروی مؤثر از پلیمر به الیاف بحرانی‌تر می‌گردد [19].

مطابق با تحقیقات پیشین [20, 21]، فرضیه این تحقیق به‌منظور بهبود خواص جذب انرژی و ضربه‌پذیری کامپوزیت‌های هیبرید سه‌فازی بررسی اثر نسبت ضریب‌اندازه الیاف در کامپوزیت‌های الیاف طبیعی کنف/پلی‌استر بوده بطوریکه اثر هم‌افزایی فاز ثانوی تقویت‌کننده یعنی کربن‌سیاه در ارتباط با جذب انرژی و ضربه‌پذیری تحت مطالعه قرار گیرد. در این مطالعه به‌منظور بررسی خواص جذب انرژی کامپوزیت‌های پایه الیاف طبیعی، الیاف کنف با درصدهای وزنی صفر تا 20 درصد به عنوان تقویت‌کننده اصلی فاز رزین پلی‌استر مورد استفاده قرار گرفته و مکانیزم‌های ثانوی و هم‌افزایی در بهبود خواص جذب انرژی با افزودن فاز کربن‌سیاه تا درصد وزنی 8 درصد مورد قرار می‌گیرد. به‌منظور ارتباط بین نسبت ضریب‌اندازه، درصد وزنی و فاز تقویت‌کننده ثانوی، مقدار نسبت ضریب‌اندازه الیاف کنف از 160 تا 320 تغییر یافته و اثر تغییرات در نسبت ضریب‌اندازه در کنار افزودن فاز تقویت‌کننده ثانوی کربن‌سیاه بر روی مقاومت ضربه و جذب انرژی نمونه‌های تهیه شده بررسی می‌گردد. یکی از خواص مهم و چالش برانگیز به دلیل افزودن فازهای تقویت‌کننده و در نتیجه تغییر در ساختار زنجیره‌های پلیمری در سطح فصل‌مشترک فیلر/پلیمر و ایجاد عیوب ساختاری نظیر میکروحباب‌ها در سطح مشترک و خواص ذاتی تقویت‌کننده‌ها، کاهش خواص ضربه‌پذیری است. از نوآوری‌های این تحقیق می‌توان به بررسی اثر هم‌افزایی و هم‌زمان دو نوع افزودنی رایج در فاز رزین از دیدگاه مؤلفه‌های ترکیب کامپوزیتی و از سوی دیگر بررسی خواص جذب انرژی در مقایسه با ضربه‌پذیری و ارتباط این دو کمیت مکانیکی مهم در کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کوتاه و ذرات با دو نسبت‌اندازه متفاوت از دیدگاه خواص نهایی اشاره کرد. کاربرد کامپوزیت‌های مورد مطالعه در این تحقیق با خواص ضربه‌پذیری بالا در طراحی و توسعه قطعات بدنه خودرو، بدنه و سازه کشتی‌ها و سامانه‌ها فضایی در برابر برخورد سنگ‌ریزه‌ها و اجرام و یا برخورد پرندگان می‌باشد.

2- ساخت و مشخصه‌یابی کامپوزیت‌های هیبرید

2-1- مواد پلیمری فاز زمینه و تقویت‌کننده‌های میکرو

پلی‌استر گرید صنعتی سه‌جزئی با فازهای رزین، کاتالیست و سخت‌کننده به عنوان فاز زمینه بر اساس درصد ترکیبات توصیه شده توسط سازنده استفاده شد. الیاف کنف بدون اعمال اصلاح سطح (وارداتی از مالزی) به عنوان فاز الیاف تقویت‌کننده اصلی با تصاویر فیزیکی الیاف و هندسه نمایش داده شده در شکل 1 مورد استفاده قرار گرفت که در آن، شکل 1 (الف) الیاف طبیعی تهیه شده بصورت هم‌راستا، شکل 1 (ب) و (ج) الیاف به ترتیب با طول 2 و 0.5 سانتی‌متر، شکل 1 (د) تصویر میکروسکوپ نوری با نمایش توزیع قطر و شکل 1 (و) هیستوگرام توزیع قطر الیاف و قطر متوسط الیاف کنف مورد استفاده را نمایش می‌دهد. کربن‌سیاه به عنوان فاز تقویت‌کننده ثانوی از شرکت دوده صنعتی (پارس-ایران) گرید صنعتی N330 CB با سطح ویژه 80-90 m2/gr تهیه شد.

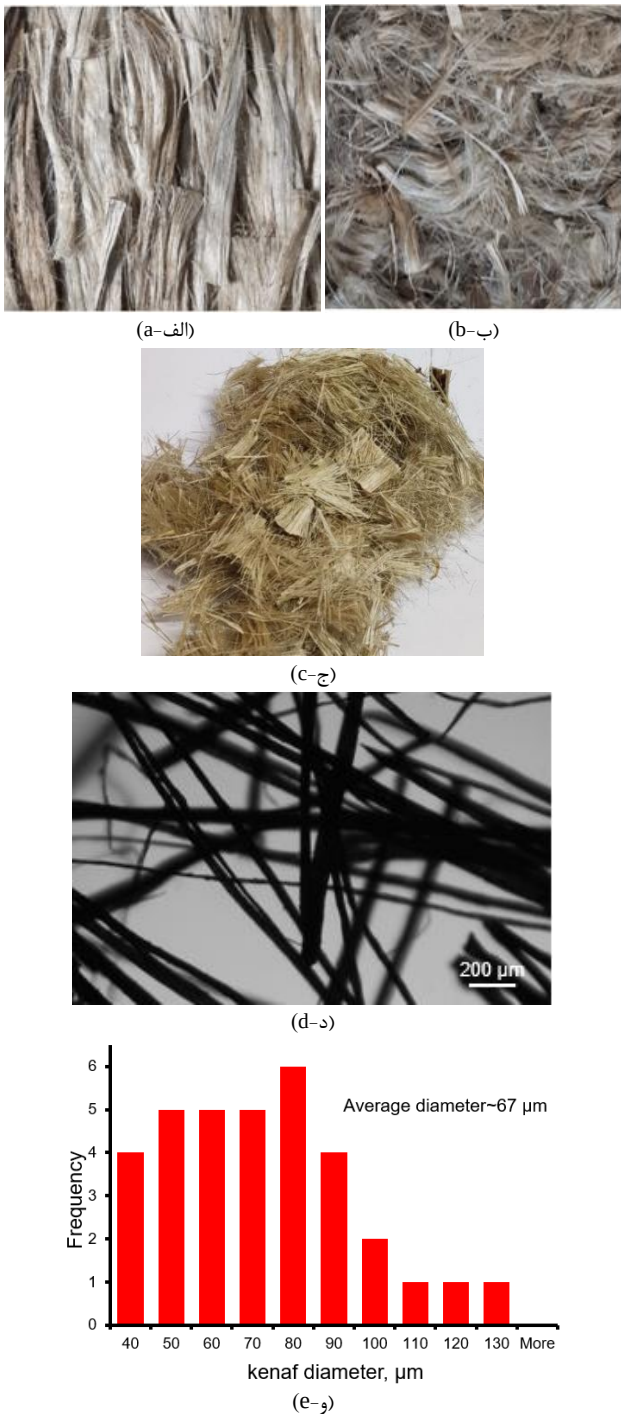

Fig. 1 (a) unidirectionally aligned kenaf fiber, (b) fibers of 2 and (c) 0.5 cm length, (d) optical microscope image of kenaf fibers exhibiting fibers diameter distribution and (e) kenaf fibers diameter histogram

شکل 1 (الف) تصویر الیاف کنف در حالت هم‌راستا، (ب) الیاف با طول 2 و (ج) 0.5 سانتی‌متر، (د) تصویر میکروسکوپ نوری با نمایش توزیع قطر الیاف و (و) هیستوگرام توزیع قطر و قطر متوسط الیاف کنف در این مطالعه

[1] Effective aspect ratio (AR)

[2] Interphase

2-2- ساخت میکروکامپوزیت‌های هیبرید پلی‌استر/الیاف کنف/کربن‌سیاه

به‌منظور بررسی تأثیر نسبت‌اندازه الیاف طبیعی بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت، الیاف کناف در سه طول مختلف به طول‌های 0.5، 1و 2 سانتی‌متر به میزان کافی بریده شدند (شکل 1). با توجه به قطر متوسط الیاف کنف معادل 60 میکرومتر و طول مورد نظر، نسبت‌اندازه نامی الیاف طبیعی (برابر با نسبت طول به قطر الیاف) و درصد وزنی الیاف کنف و کربن‌سیاه با توصیف و تحلیل در بخش‌های بعدی مطابق با جدول 1 در نظر گرفته شد. شایان ذکر است که در انجام این تحقیق، طول در نظر گرفته شده برای بررسی اثر اندازه الیاف بزرگ‌تر از طول بحرانی الیاف کنف در نظر گرفته شده که در تحقیقات قبل مقدار و چگونگی محاسبه آن گزارش شده است [22].

جدول 1 مشخصات هندسی و درصد وزنی مواد تقویت‌کننده

Table 1 Geometric specifications and wt% of reinforcements

کربن‌سیاه	الیاف کنف		
درصد وزنی (wt%)	درصد وزنی (wt%)	طول الیاف (cm)	ضریب‌اندازه نامی
1 to 8	5 to 20	0.5	80
1 to 8	5 to 20	1	160
-	5 to 20	2	320

به‌منظور بررسی تأثیر درصد وزنی الیاف بر روی خواص ضربه‌پذیری و جذب انرژی نمونه‌های کامپوزیتی، به ازای هر طول الیاف 4 نمونه با درصدهای وزنی 5٪ ، 10٪ ، 15٪ و 20٪ ساخته شد. بدین منظور، مقادیر الیاف با درصد وزنی مذکور در رزین پلی‌استر بطور مستقیم ترکیب شده و با مقادیر توصیه شده کاتالیست و سخت‌کننده مخلوط شدند. به‌منظور انجام آزمایش‌ها، از قالب‌های سیلیکون و ریخته‌گری ترکیبات کامپوزیتی استفاده گردید. به‌منظور ارزیابی اثر تقویت‌کننده ثانوی (کربن‌سیاه) بر روی خواص ضربه، رزین پلی‌استر با درصدهای وزنی صفر، 1، 5 و 8 درصد کربن‌سیاه با همزن برشی انرژی بالا به مدت زمان 15 دقیقه مخلوط شد. به‌منظور ساخت کامپوزیت‌های سه‌جزئی با مؤلفه‌های کربن‌سیاه و الیاف کنف، ترکیب کامپوزیتی دوجزئی رزین/کربن‌سیاه به عنوان فاز زمینه مورد نظر قرار گرفته و پس ترکیب با درصد مشخص الیاف طبیعی کنف در سطح درصد وزنی بهینه الیاف در داخل بشر در قالب‌های سیلیکون با ابعاد 120×120 (میلی‌متر مربع) و ضخامت 3.2 میلی‌متر طبق استاندارد ASTM ریخته‌گری شده و نمونه‌ها تحت نیروی فشاری معادل 4 کیلوپاسکال قالب‌گیری شدند.

شکل 2 نمایشگر نمونه‌های کامپوزیتی تهیه شده با آرایش تصادفی الیاف کنف در داخل فاز زمینه را نشان داده که در آن شکل 2 (الف) و (ب) به ترتیب کامپوزیت با الیاف 2 و 1 سانتی‌متر بصورت تصادفی، شکل 2 (ج) ریخته‌گری الیاف/کربن‌سیاه/پلی‌استر در داخل قالب سیلیکون قبل از اعمال وزنه و شکل 2 (د) نمونه نهایی هیبرید حاصل از مرحله (ج) در ترکیب پلی‌استر/کنف/کربن‌سیاه می‌باشد.

2-3- مشخصه‌یابی میکروکامپوزیت‌ها

-آزمون ضربه

برای اندازه‌گیری استحکام ضربه نمونه‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف کنف و کربن‌سیاه از دستگاه ضربه 22 ژول استفاده شد. نمونه‌های آزمون مطابق استاندارد ASTM D256 به ابعاد تقریبی 70×12×3.2 (میلی‌متر مکعب) با برش بلوک‌های کامپوزیتی با ابعاد 120×120 (میلی‌متر مربع) با ضخامت 3.2 میلی‌متر مطابق با روش توصیف شده در قسمت قبل تهیه شد. قبل از انجام آزمون ضربه لازم است با استفاده از ابزار شکاف‌زن، شکافی با زاویه 45 درجه بر روی نمونه‌های آزمون ضربه‌ایجاد شود. عمق شکاف مورد نظر مطابق استاندارد ASTM D256، در نظر گرفته شد.

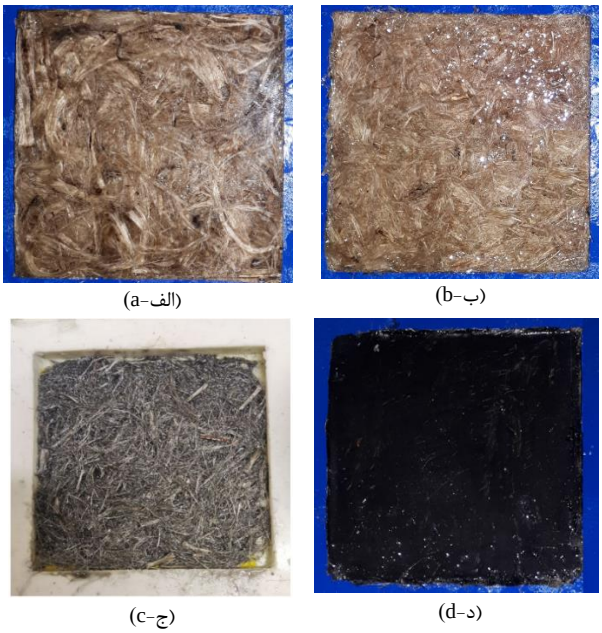

Fig. 2 (a) polyester reinforced with kenaf fiber with the length of 2 and (b) 1 cm, (c) composite compound casting within silicon mold cavity and (d) three component polyester/kenaf/carbon black final composite part

شکل 2 (الف) پلی‌استر تقویت‌شده با الیاف به طول 2 و (ب) 1 سانتی‌متر، (ج) ریخته‌گری ترکیب کامپوزیتی در قالب سیلیکون و (د) نمونه نهایی هیبرید سه‌جزئی پلی‌استر/کنف/کربن‌سیاه

-آزمون وزنه سقوطی

به‌منظور بررسی انرژی جذب کامپوزیت‌های پلی‌استر/کنف/کربن‌سیاه، 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 لودسل نیروسنج و تبدیل نیرو به انرژی ذخیره‌شده عملکرد دارد. در این سامانه نمونه بر روی تیر توسط گیره‌های چهارگانه متصل شده و با رهایش وزنه به جرم مشخص، آسیب بر روی نمونه صورت می‌پذیرد. در این آزمون از وزنه سقوطی به جرم 2200 گرم با ارتفاع سقوط 1 متر با اعمال ضربه بر روی نمونه‌ها با ابعاد 120×120 (میلی‌متر مربع) و ضخامت 3.2 تا 10 میلی‌متر بستگی به نوع استاندارد استفاده شد.

تصویر 3 نمایانگر گیره‌بندی نمونه‌ها در آزمون وزنه سقوطی بوده که در آن شکل 3 (الف) تصویر سازه سلول لودسل وزنه سقوطی با نمایش نمونه قبل از برخورد وزنه سقوطی، شکل 3 (ب) نمونه شکسته شده پس از ایجاد آسیب بر روی نمونه پلی‌استر خالص و شکل 3 (ج) و (د) به ترتیب گیره‌بندی نمونه کامپوزیتی قبل و بعد از شکست نمونه را ارائه می‌دهد. به‌منظور ارائه نتایج قابل مقایسه و حذف اثر ضخامت بر روی میزان انرژی جذب در شکست نمونه‌ها، مقادیر نیروی ضربه نسبت به ضخامت هر نمونه نرمالایز شده است[1]. این نکته قابل ذکر است که به دلیل اینکه مبنای اندازه‌گیری نیرو، خیز تیر یک‌سرگیردار و کرنش اعمالی بر روی نقاط کرنشی المان الاستیک لودسل می‌باشد، هرچه

[1] Normalized

مقدار جذب انرژی نمونه کامپوزیتی مستقر بر روی لودسل بیشتر باشد، مقدار نیروی منتقل شده به لودسل کمتر و خروجی کمتری را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، صلبیت و تردی بیشتر نمونه باعث انتقال نیروی بیشتری بر روی لودسل شده که بیانگر مقدار جذب انرژی کمتر نمونه کامپوزیتی است.

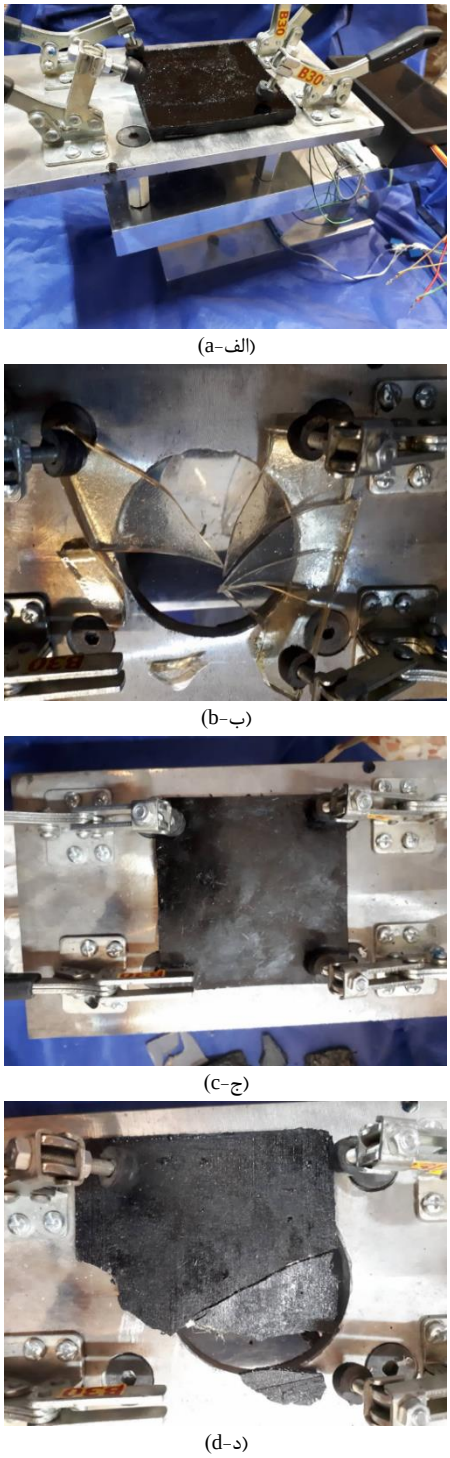

Fig. 3 (a) representation of the drop weight loadcell system with specimen clamped, (b) damaged pure polyester part in drop weight test, (c) the composite specimen before drop weight test and (d) after damage

شکل 3 (الف) نمایش سامانه لودسل با گیره بندی نمونه در آزمون وزنه سقوطی، (ب) نمونه پلی‌استر خالص پس از آسیب در آزمون جذب انرژی، (ج) نمونه کامپوزیتی تحت آزمون وزنه سقوطی قبل و (د) بعد از آسیب

با این توصیف، مقدار جذب انرژی نمونه‌ها با مقدار نیروی قرائت شده توسط لودسل رابطه عکس دارد. در این تحقیق، مقدار نیروی خروجی لودسل معیاری برای جذب انرژی کامپوزیت‌ها بوده بطوریکه مقدار انرژی الاستیک ذخیره‌شده (انرژی کرنشی)، U_E، در المان الاستیک لودسل مطابق با روابط (1) و (2) متناسب با مجذور نیروی اعمالی بر آن است.

$$U_E = \frac{P^2 L^2}{6EI} \quad (1)$$

و در نتیجه

$$U_E \propto P^2 \quad (2)$$

که در آن P نیروی انتقالی به لودسل، L طول المان الاستیک لودسل وزنه سقوطی، E مدول یانگ و I ممان اینرسی سطح المان الاستیک می‌باشد. بنابراین، طبق این روابط و مفهوم انرژی پتانسیل می‌توان بیان نمود مقدار انرژی جذب شده توسط نمونه کامپوزیتی، U_C، معادل تفاضل میزان کل انرژی پتانسیل وزنه سقوطی، U_P، و انرژی کرنشی الاستیک در المان الاستیک لودسل است (رابطه (3)).

$$U_C = U_P - U_E \quad (3)$$

که در آن

$$U_P = mgh \quad (4)$$

بطوریکه h معادل ارتفاع وزنه سقوطی تا لودسل و m جرم وزنه سقوطی است.

شکل 4 نمایشگر نمودار کالیبراسیون لودسل مورد استفاده در این تحقیق است. بدین منظور وزنه 10 نیوتن مورد استفاده قرار گرفته (با خروجی مطابق با منحنی قرمز) و خروجی لودسل (منحنی آبی رنگ) بر حسب مقدار واقعی در ارتباط با مقدار قرائت شده با ضریب کالیبراسیون با خروجی بر حسب نیوتن اصلاح شد.

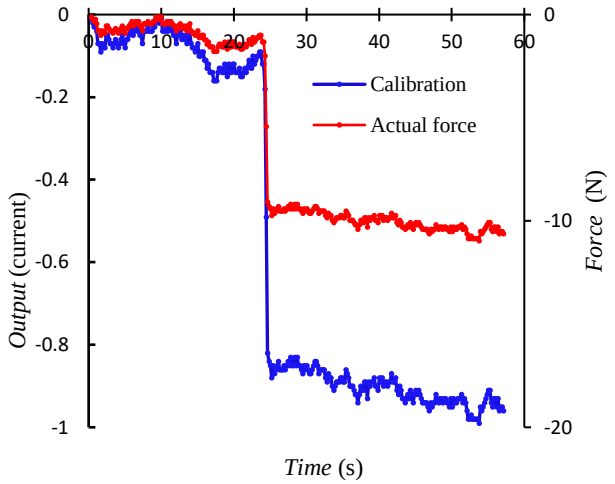

Fig. 4 Drop weight loadcell calibration curve with mass of 1 Kg in determination of calibration coefficient

شکل 4 نمودار کالیبراسیون لودسل وزنه سقوطی با وزنه 1 کیلوگرم در تعیین ضریب کالیبراسیون

3- نتایج و بحث

3-1- خواص مکانیکی در ضربه‌پذیری کامپوزیت‌های هیبرید

همانطور که اشاره شد نه تنها درصد وزنی مواد پرکننده بلکه رویدادهایی نظیر خواص فصل‌مشترک، آگلوموراسیون الیاف، چسبندگی و سازگاری شیمیایی فاز زمینه پلیمر/الیاف بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها تأثیر مستقیم دارد [23]. در این تحقیق، در کنار تغییر در درصد وزنی الیاف، مقدار نسبت ضریب‌اندازه نامی الیاف در سه سطح تغییر داده شد و اثر ضریب‌اندازه نامی بر روی خواص جذب انرژی و استحکام ضربه‌پذیری مطالعه گردید. اثر درصدهای وزنی مختلف پرکننده الیاف طبیعی کنف بر روی مقدار استحکام ضربه‌ایزود تحت تأثیر طول الیاف در اشکال 5 تا 7 نمایش داده شده است. شکل 5 بیانگر تغییرات استحکام ضربه در درصد وزنی 5 تا 20 الیاف کنف با طول 0.5 سانتی‌متر بوده که در آن درصد وزنی الیاف 10 درصد منجر به بیشترین استحکام ضربه شده که نسبت به نمونه خالص پلی‌استر با استحکام ضربه معادل 57.5 ژول‌برمتر (شکل 8) بیش از 115 درصد افزایش از خود نشان می‌دهد در حالیکه بطور متوسط دیگر درصدهای وزنی استحکام ضربه افزایش ناچیز و یا حتی کمتر از مقدار آن در نمونه پلیمر خالص است. مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر روی کامپوزیت‌های الیاف طبیعی کاهش راندمان تر کنندگی رزین پلیمری در درصدهای بالای الیاف بوده که خود باعث کاهش مقدار فاز میانی و در نتیجه انتقال نیرو و از طرفی وجود عیوب و میکروحباب‌ها در داخل بدنه کامپوزیت است. همچنین درصدهای بالای الیاف منجر به کاهش نسبت ضریب‌اندازه مؤثر الیاف شده که در فرآیند مورد مطالعه در این تحقیق بطور تصادفی آرایش‌شده و اعوجاج متعدد الیاف با طول بزرگ‌تر را محتمل‌تر می‌نماید (کاهش طول مؤثر) [19].

کاهش استحکام ضربه در درصدهای پائین تر نظیر 5 درصد وزنی الیاف معرف حضور مکانیزم‌های دیگر در بهبود استحکام ضربه کامپوزیت‌های پایه ترموست بوده که مرتبط با تغییر در درصد چگالی پیوندهای عرضی می‌باشد. در صورتیکه حضور الیاف منجر به تغییر درصد ترکیب رزین/سخت‌کننده گردد، مقدار چگالی پیوندهای عرضی کاهش یافته که باعث پیدایش فاز میانی نرم‌تر می‌گردد. این امر خود موجب افزایش خواص ضربه‌پذیری کامپوزیت به دلیل اثر میرائی انرژی در فاز میانی نرم‌تر است. این نتایج نشان می‌دهد در درصدهای بالاتر وزنی الیاف (10 درصد وزنی) وجود عوامل مؤثر مثبت در راستای بهبود استحکام ضربه نظیر فاز میانی نرم در اثر برهمکنش‌های سطح مشترک[1] بر موارد نامطلوب نظیر وجود فاز کلوخه‌ای، عیوب و چسبندگی ناقص پلیمر/الیاف غلبه دارد.

مطابق با شکل 6 با افزایش طول الیاف به 1 سانتی‌متر و افزایش نسبت‌اندازه مؤثر الیاف (معادل 160 مطابق با جدول 1) در 5 درصد وزنی الیاف، استحکام ضربه نسبت به پلیمر خالص افزایش یافته و به بیشترین مقدار خود با افزایش 184٪ نسبت به نمونه‌های تقویت نشده می‌رسد. نتایج ارائه‌شده در شکل 6 نشان می‌دهد افزایش طول الیاف، استحکام ضربه را نسبت به درصد الیاف حساس‌تر کرده، همانطور که در این طول الیاف برخلاف طول 0.5، بیشترین افزایش استحکام در 5 درصد وزنی ایجاد شده است. نتایج همچنین بیان می‌کند در این طول الیاف، افزایش درصد الیاف کنف به 20 درصد منجر به دامنه تغییرات زیاد در استحکام ضربه حول مقادیر متوسط‌شده (129 ژول‌برمتر) که نمایانگر عدم یکنواختی نمونه‌های ساخته شده از نقطه نظر عیوب، مسائل فصل‌مشترک پلیمر/الیاف و فاز میانی شده که ناشی از عدم هموژن‌بودن ترکیب می‌باشد. ذکر این نکته در خصوص تغییرات غیر قابل انتظار در خواص استحکام کششی و خواص ضربه‌پذیری در خصوص تقویت رزین با الیاف کوتاه شایان توجه است که همانطور که در مبحث مکانیک کامپوزیت‌ها به همراه تقویت‌کننده‌ها با طول کوتاه مطرح است، عوامل رقابتی[2] در خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها مشارکت دارند. عواملی همچون ضریب‌اندازه مؤثر الیاف، فصل‌مشترک کامل به همراه چسبندگی مناسب، تغییر در چگالی پیوندهای عرضی در فصل‌مشترک (با افزایش آن) و تغییر در درصد کریستال‌ها و اندازه آن‌ها در خصوص پلیمرهای نیمه- بلورین از یک طرف و از طرف دیگر وجود فاز کلوخه‌ای در فاز زمینه، اتصال جزئی و یا اساساً عدم اتصال الیاف/پلیمر به دلیل کاهش خاصیت ترکنندگی رزین که در درصدهای بالای الیاف مورد انتظار است و تغییر در همراستایی الیاف نسبت به جهت نیروی وارده در تقابل با یکدیگر بوده که مقادیر استحکام کششی و ضربه که به ویژه وابسته به میکروساختار کامپوزیت است (بر عکس مدول یانگ که به ویژگی‌های بالک یا حجمی وابسته است). لذا، چگونگی غلبه عوامل فوق منجر به مشاهده روند تغییرات غیرخطی و یا غیر قابل انتظار از کامپوزیت‌ها می‌باشد.

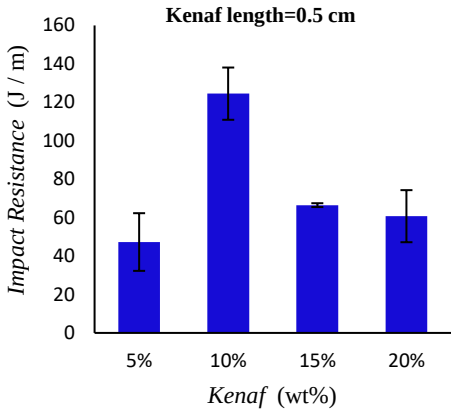

Fig. 5 Impact resistance of polyester/kenaf with fiber length of 0.5 cm against fibers wt%

شکل 5 استحکام ضربه نمونه‌های پلی‌استر/کنف با الیاف به طول 0.5 سانتی‌متر در برابر درصد وزنی الیاف

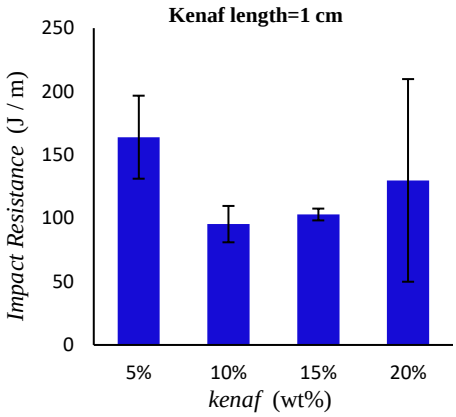

Fig. 6 Impact resistance of polyester/kenaf with fiber length of 1 cm against fibers wt%

شکل 6 استحکام ضربه نمونه‌های پلی‌استر/کنف با الیاف به طول 1 سانتی‌متر در برابر درصد وزنی الیاف

[1] Interfacial interactions

[2] Competing factors

با افزایش درصد الیاف در کنار افزایش طول، این عدم همگن بودن نمونه‌ها به دلیل چالش‌های ترکیب الیاف و رزین پلی‌استر قابل نتیجه‌گیری بوده همانطور که در مورد کامپوزیت‌های تقویت‌شده با طول 2 سانتی‌متر (ضریب‌اندازه 320) در شکل 7 نیز قابل مشاهده است. نتایج ارائه‌شده در شکل 7 نشان می‌دهد افزایش طول الیاف به 2 سانتی‌متر نیز منجر به افزایش خواص استحکام ضربه کامپوزیت‌ها نسبت به پلیمر خالص شده و این مقدار (175 ژول‌برمتر) بطور چشمگیر با 203 درصد افزایش در نمونه‌های تقویت‌شده با 15 درصد الیاف کنف قابل مشاهده است.

از دیگر نتایج قابل مشاهده با مقایسه خواص استحکام ضربه با تمرکز بر روی طول الیاف این است که طول الیاف بیشتر در حالت کلی باعث افزایش بیشتر خواص ضربه‌پذیری شده ولیکن در درصدهای بالای الیاف همانطور که انتظار می‌رود به دلیل کاهش مقادیر نسبت‌اندازه مؤثر، آگلوموراسیون، کاهش فصل‌مشترک مؤثر الیاف/پلیمر و کاهش هم‌راستایی الیاف افزایش در خواص ضربه‌پذیری نسبت به درصدهای کمتر متوقف شده و یا خواص اساساً دچار کاهش می‌گردند (به عنوان مثال درصد وزنی 20 الیاف کنف در همه طول‌های مورد مطالعه). به‌منظور فهم بهتر اثر طول الیاف و درصد وزنی الیاف، شکل 8 نتایج حاصل از خواص استحکام ضربه را نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد، ضریب‌اندازه 320 (طول 2 سانتی‌متر الیاف) عموماً باعث بیشترین استحکام ضربه در کامپوزیت‌ها شده است. این خواص در این طول در درصد وزنی 5 الیاف کنف مقادیر کاهشی از خود نشان داده که به دلیل کاهش سطح کلی مؤثر الیاف در فصل‌مشترک پلیمر/رزین و فاز میانی می‌باشد [24]. نتایج ارائه‌شده در شکل 8 همچنین بیانگر روند غیرخطی در تغییرات استحکام ضربه کامپوزیت‌ها نسبت به درصد الیاف و طول الیاف بوده بطوریکه در هر درصد وزنی با توجه به چگونگی تقابل اثرات استحکام بخشی مانند خواص ذاتی الیاف، برهمکنش‌های کامل و فاز میانی نرم از یک طرف و اثرات نامطلوب نظیر فازهای کلوخه‌ای، میکروحباب‌ها، فصل‌مشترک ناقص و کاهش ضریب‌اندازه مؤثر از طرف دیگر، خواص ضربه‌پذیری بیشینه در یک طول بهینه معین حاصل می‌شود [25، 26].

شکل 9 نمایشگر سطح مقطع شکست نمونه بالک تحت آزمون ضربه در درصد وزنی 10 پلی‌استر/کنف و با طول الیاف 1 سانتی‌متر بوده که درصد حجمی قابل توجه الیاف کنف را نسبت به فاز زمینه پلی‌استر به دلیل چگالی نسبتی پائین کنف نشان می‌دهد (1.08 گرم بر میلی‌متر مکعب). درصد حجمی الیاف در فاز رزین باعث کاهش مقدار ترکنندگی[1] و در نتیجه فصل‌مشترک غیرکامل با وجود میکروعیوب می‌گردد [27].

3-2- خواص مکانیکی در آزمون وزنه سقوطی کامپوزیت‌های دوجزئی الیاف کنف/پلی‌استر

به‌منظور بررسی خواص جذب انرژی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کنف در هر درصد وزنی، نمونه‌ها با نمایش بیشترین استحکام ضربه مطابق با نتایج شکل 8 انتخاب شده و تحت آزمون وزنه سقوطی قرار گرفتند. همانطور که پیش‌تر اشاره شد، مقادیر نیروی دریافتی کمتر توسط لودسل معادل خواص جذب انرژی بیشتر کامپوزیت بوده چرا که مقدار انرژی کل دریافتی توسط لودسل پس از رهایش وزنه کمتر بوده و در عوض مقادیر جذب انرژی توسط نمونه بیشتر بوده است. شکل 10 مقادیر نیروی ضربه در آزمون سقوطی را ارائه می‌دهد که در آن مقادیر نیروی کمتر در کامپوزیت تقویت‌شده با 15 درصد وزنی کنف با طول 2 سانتی‌متر (معادل ضریب‌اندازه نامی 320) به منزله خواص جذب انرژی بیشتر این کامپوزیت نسبت به دیگر نمونه‌ها و پلیمر ترموست (گرماسخت) خالص پلی‌استر است.

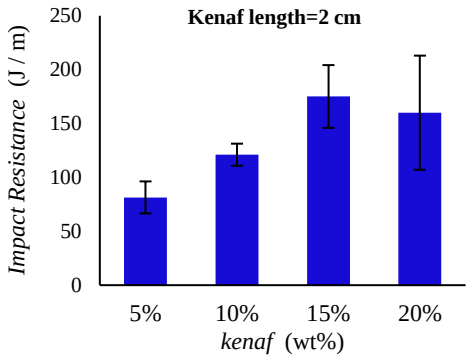

Fig. 7 Impact resistance of polyester/kenaf with fiber length of 2 cm against fibers wt%

شکل 7 استحکام ضربه نمونه‌های پلی‌استر/کنف با الیاف به طول 2 سانتی‌متر در برابر درصد وزنی الیاف

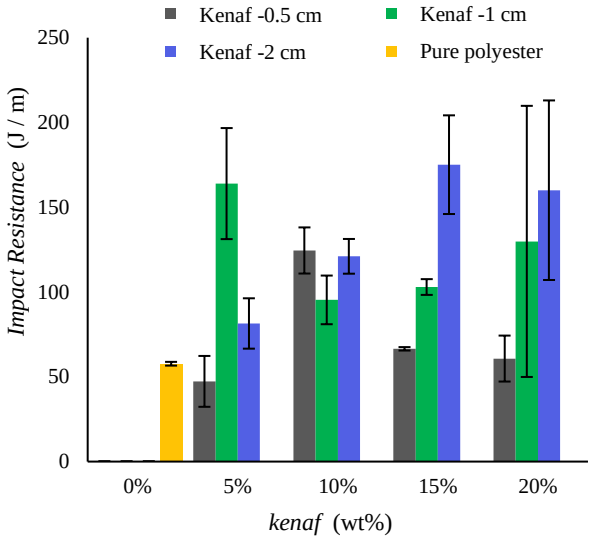

Fig. 8 Comparison of impact resistance of polyester/kenaf with fiber length of 0.5, 1 and 2 cm

شکل 8 مقایسه استحکام ضربه نمونه‌های پلی‌استر/کنف با طول الیاف 0.5، 1 و 2 سانتی‌متر

Fig. 9 Impact fractured surface of polyester/kenaf filled with 20 wt% of 1 cm fibers

شکل 9 سطح مقطع شکست نمونه‌های کامپوزیتی پلی‌استر/الیاف کنف با 20 درصد وزنی و طول 1 سانتی‌متر تحت بار ضربه‌ای

[1]Wetting ability

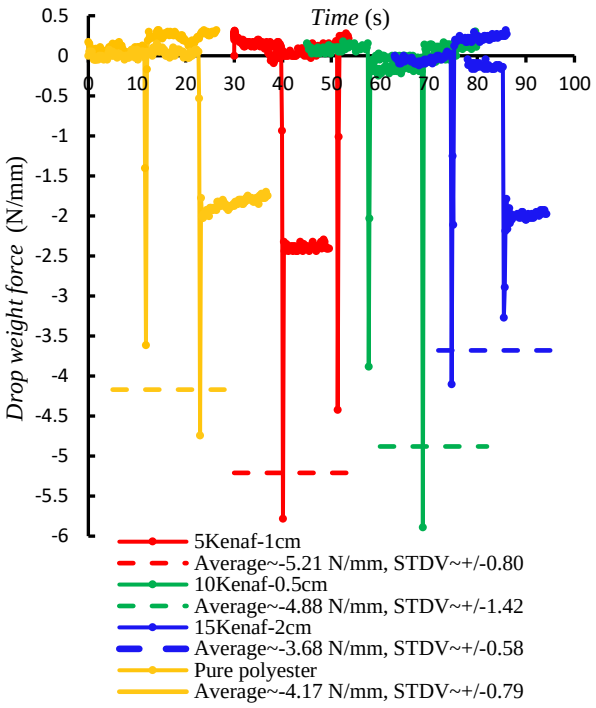

Fig. 10 Impact force in drop weight test in polyester/kenaf fiber based on optimized wt% and kenaf aspect ratio

شکل 10 نیروی ضربه در آزمون وزنه سقوطی در کامپوزیت‌های پلی‌استر/الیاف کنف بر اساس مقادیر بهینه درصد وزنی و ضریب‌اندازه کنف

با توجه به مقادیر متوسط کسب شده در این آزمون، اینطور استنباط می‌شود که با توجه به رابطه (2)، مقدار جذب انرژی نمونه 15 درصد وزنی نسبت به نمونه مرجع 22 درصد افزایش داشته در حالیکه در نمونه‌های تقویت‌شده با 10 و 5 درصد وزنی الیاف مقدار جذب انرژی تا نسبت به نمونه خالص تا 56 درصد کاهش می‌یابد. نکته مهم در این ارزیابی این است که خواص استحکام ضربه کامپوزیت‌ها الزاماً دارای روند کاهشی و یا افزایشی در مقایسه با خواص جذب انرژی نداشته و به دلیل مداخله مکانیزم‌های متفاوت در آسیب و شکست، ارائه خواص ضربه بالاتر لزوماً منجر به خواص جذب انرژی کامپوزیت نمی‌گردد. یکی از دلایل این امر نوع ایجاد شکست در دو آزمون بوده بطوریکه در آزمون ایزود، رشد ترک در ادامه مسیر شیار ایجاد شده پدید می‌آیند. همچنین، در آزمون ایزود، خط ترک در رشد و توسعه خود (بطور صفحه‌ای) عیوب کامپوزیتی، وضعیت تفرق الیاف و کیفیت فازمیانی را بصورت محلی تجربه کرده که ممکن است نماینده کل کامپوزیت نباشد در صورتیکه در آزمون وزنه سقوطی نمونه بالک تحت آسیب قرار گرفته و عوامل مطلوب و یا نامطلوب در مکانیزم‌های جذب انرژی بطور مؤثرتر در خواص نهایی مداخله می‌نماید (شکل 3).

3-3- خواص ضربه‌پذیری و جذب کامپوزیت‌های هیبرید الیاف کنف/کربن‌سیاه/پلی‌استر

به‌منظور ارزیابی اثر هم‌افزایی کربن‌سیاه، کامپوزیت‌های سه‌جزئی الیاف کنف/کربن‌سیاه/پلی‌استر مطابق با توصیف در قسمت‌های قبل ساخته شد. به‌منظور هدفمند کردن آزمایش‌ها و نمونه‌های ساخته شده، مبنای ساخت نمونه‌ها ارائه بیشترین و کمترین خواص ضربه‌پذیری کامپوزیت‌های دوجزئی الیاف کنف/پلی‌استر قرار داده شد. با توجه به شکل 8 اینگونه استنباط می‌گردد که درصد الیاف کنف معادل 5 منجر به خواص ضربه‌پذیری یکسانی نسبت به درصدهای دیگر شده، در حالیکه به دلیل مصرف الیاف کمتر و چالش‌های ترکنندگی رزین در درصد بالای الیاف و در نتیجه چالش‌های ساخت، درصد 5 درصد الیاف کنف مقدار معقول از جنبه اقتصادی و هزینه‌های ساخت نمونه بوده، لذا در ادامه آزمایش‌ها، درصد الیاف 5 درصد با طول‌های 1 و 0.5 که منجر به بیشترین و کمترین خواص استحکام ضربه‌پذیری شد انتخاب گردید. همچنین، درصد الیاف 5 درصد کنف نشان‌دهنده میزان کاهش یافته انرژی جذب نمونه‌ها مطابق با نتایج شکل 10 بوده و به‌منظور بررسی اثر افزایشی کربن‌سیاه انتخاب این درصد وزنی با هدف بهبود خواص انرژی جذب نمونه‌های تقویت‌شده با 5 درصد الیاف کنف منطقی می‌باشد.

با توجه به این مطلب که تمرکز این قسمت از تحقیق، بررسی اثر هم‌افزایی کربن-الیاف کنف در نظر گرفته شد، مقادیر کمینه و بیشینه ضربه‌پذیری که در این نسبت ضریب‌اندازه حاصل شده مد نظر قرار گرفت. شکل 11 اثر افزودن کربن‌سیاه به کامپوزیت دوجزئی الیاف کنف 5 درصد وزنی-پلی‌استر را نمایش می‌دهد. همانطور که مشخص است افزایش کربن‌سیاه عموماً و در ابتدا منجر به کاهش و سپس افزایش خواص ضربه‌پذیری در کامپوزیت‌ها با طول الیاف 1 سانتی‌متر شده است. با این‌وجود می‌توان مشاهده نمود که در هر طول الیاف افزودن کربن‌سیاه منجر به افزایش نسبی ضربه‌پذیری کامپوزیت‌ها با افزودن کربن‌سیاه می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد اثر هم‌افزایی در طول الیاف کمتر بیشتر بوده بطوریکه مکانیزم‌های موجود در افزایش استحکام ضربه در کامپوزیت‌های سه‌جزئی بهبود می‌یابد، بطوریکه مطابق با نتایج شکل 11 افزایش 8 درصد وزنی کربن‌سیاه به نمونه مرجع 5 درصد الیاف کنف/پلی‌استر منجر به افزایش 108 درصدی استحکام ضربه شده است. نتایج همچنین نشان می‌دهد در ضریب‌اندازه بالاتر الیاف، حضور فاز ثانوی تقویت‌کننده، خود شرایط ساخت و ترکنندگی رزین را نسبت به حالت بدون فاز کربن‌سیاه کاهش داده و در طول الیاف بلندتر دیسپارسیون ذرات کربن نیز بطور نامطلوب تحت تأثیر چالش هموژن سازی ترکیب کامپوزیتی قرار گرفته است.

با افزودن فاز کربن، به دلیل پیدایش احتمالی فازهای نرم در فصل‌مشترک پلی‌استر/کنف/کربن‌سیاه خواص ضربه‌پذیری افزایش یافته که نرخ افزایش آن با افزایش درصد کربن کاهش می‌یابد. فاز کلوخه‌ای و همچنین افزایش ویسکوزیته رزین که خود مانع جدی در برابر ایجاد دیسپارسیون ذرات است، می‌تواند از عوامل کلیدی در توقف و یا کاهش افزایش خواص ضربه‌پذیری قلمداد گردد.

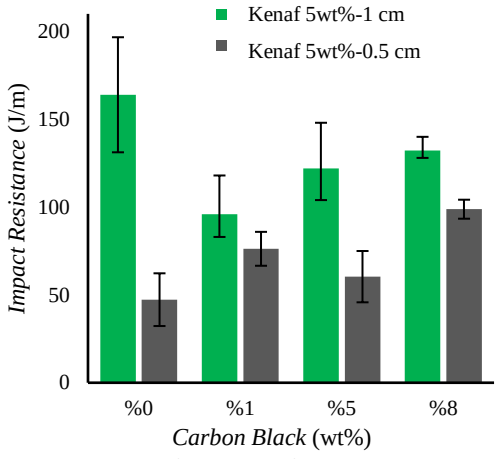

Fig. 11 Impact resistance of 5 wt% kenaf hybrid composites (0.5 and 1 cm) reinforced with 0-8 wt% of CB

شکل 11 استحکام ضربه میکروکامپوزیت‌های هیبرید با الیاف کنف 5 درصد وزنی (1 و 0.5 سانتی‌متر) تقویت‌شده با صفر تا 8 درصد وزنی کربن‌سیاه

ذکر این نکته قابل اهمیت است که مقادیر کربن‌سیاه به نمونه‌ها با ارائه خواص بالاتر به عنوان مثال درصدهای وزنی 5 درصد کنف با الیاف 0.5 و 1 سانتی‌متر اضافه شد، چراکه تمرکز این تحقیق نیز بر روی اثر هم‌افزایی کربن‌سیاه و الیاف کنف می‌باشد. از سوی دیگر، کربن‌سیاه به تنهایی به دلیل ضریب‌اندازه تقریبی 1 به سبب شکل کروی آن، منجر به بهبود کلی خواص نشده مگر اینکه در مبحث تغییرات ویسکوزیته و تغییر در چگالی پیوندهای عرضی مشارکت داشته باشد. شکل 12 تغییرات انرژی ضربه در برابر افزودن فاز کربن‌سیاه با درصد وزنی صفر تا 15 درصد را در کامپوزیت‌های دوجزئی را نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد، افزودن کربن‌سیاه به تنهایی اثر قابل توجهی را نسبت به تقویت‌کنندگی الیاف کنف نداشته که مقایسه نتایج حاصل با نتایج ارائه‌شده در اشکال 5 تا 7 مبین این موضوع است. همانطور که ملاحظه می‌گردد در بهترین حالت در درصد وزنی 10، تنها معادل 50 درصد بهبود در استحکام ضربه حاصل شده است.

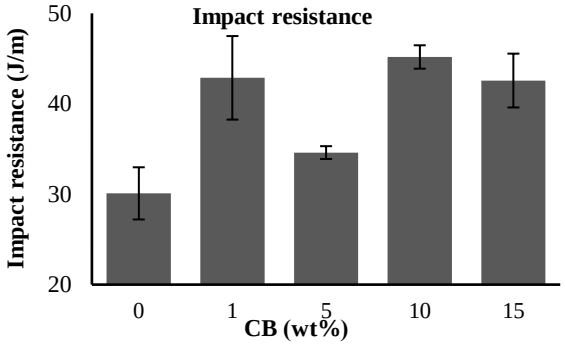

Fig. 12 Impact resistance of 0-15 wt% CB filled polyester

شکل 12 استحکام ضربه پلی‌استر تقویت‌شده با 0 تا 15 درصد وزنی کربن‌سیاه

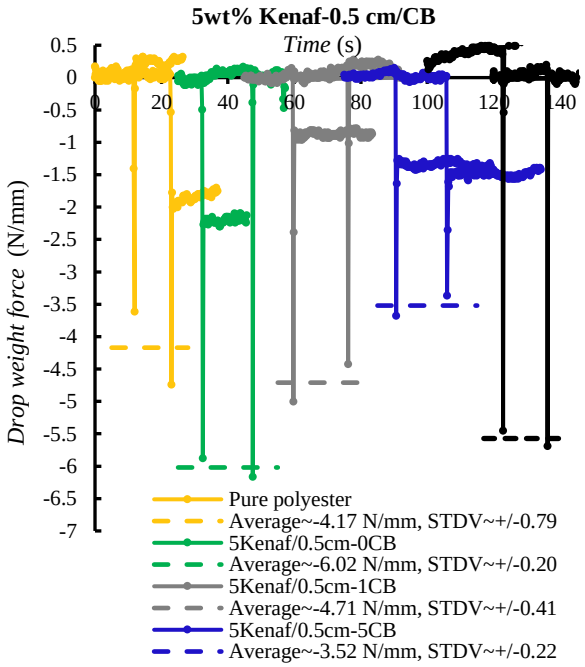

Fig. 13 Impact load in drop weight test of 5 wt% filled polyester/kenaf with fiber length of 0.5 cm against CB loading

شکل 13 نیروی ضربه در آزمون وزنه سقوطی در کامپوزیت‌های پلی‌استر/الیاف کنف در 5 درصد وزنی الیاف با طول 0.5 سانتی‌متر با تغییرات درصد وزنی کربن‌سیاه

منحنی‌ها در اشکال 13 و 14 مقدار نیروی لودسل حاصل از آزمون وزنه سقوطی بر روی کامپوزیت‌های هیبرید الیاف کنف/پلی‌استر تقویت‌شده با کربن‌سیاه در درصدهای وزنی صفر تا 8 درصد را نشان می‌دهد. مطابق با مطالب پیشین، درصد وزنی 5 درصد الیاف کنف به دلیل توجیه اقتصادی و سهولت در فرآیند ساخت انتخاب شده و طول الیاف 0.5 و 1 به سبب ارائه خواص ضربه کمینه و بیشینه انتخاب شد. بررسی الیاف با سامانه مؤلفه‌ای انتخاب شده می‌تواند اثر هم‌افزایی کربن را ارائه داده چرا که در بررسی هم‌افزایی مؤلفه‌های کامپوزیتی اثرات غیرخطی و خارج از قانون مخلوط‌ها[1] مورد مطالعه است.

شکل 13 نشان می‌دهد با افزایش فقط الیاف کنف به رزین خالص پلی‌استر، انرژی الاستیک منتقل شده به لودسل مقدار 108 درصد افزایش یافته در حالیکه در همین درصد الیاف کنف با اضافه کردن 5 درصد کربن‌سیاه، مقدار انرژی ذخیره‌شده الاستیک در لودسل 28 درصد نسبت به حالت نمونه مرجع کاهش یافته و این کاهش نسبت به نمونه پلی‌استر/کنف 65 درصد می‌گردد. طبق توضیحات در بخش‌های قبل و مطابق با مقادیر انرژی الاستیک ارائه‌شده در روابط (1) تا (4)، نتایج بنابراین نشان می‌دهد افزایش کربن‌سیاه به نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف کنف منجر به افزایش انرژی جذب نمونه‌ها شده چرا که مقدار نیروی انتقالی و در نتیجه انرژی کرنشی المان الاستیک در لودسل کاهش یافته است (یادآوری می‌گردد مقدار انرژی الاستیک ذخیره‌شده در لودسل متناسب با مجذور نیروی انتقالی است). نتایج شکل 13 همچنین نشان می‌دهد با افزایش مقدار درصد کربن‌سیاه به 8 درصد وزنی منجر به افزایش نیروی انتقالی (و انرژی الاستیک) در لودسل شده که خود بیانگر کاهش انرژی جذب نمونه‌های پلی‌استر/کنف تقویت‌شده با 8 درصد کربن‌سیاه نسبت به نمونه مرجع است. این درصد وزنی کربن‌سیاه منجر به افزایش 80 و 150 درصدی انرژی انتقالی پس از آزمون وزنه سقوطی به ترتیب نسبت به نمونه مرجع و نمونه 5 درصد وزنی کربن‌سیاه شده که مبین کاهش قابلیت جذب انرژی نمونه کامپوزیتی تقویت‌شده با 8 درصد وزنی است. مطابق با شکل 14، آزمون وزنه سقوطی برای نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف کنف با طول 1 سانتی‌متر تکرار شد تا اثر طول الیاف بر روی انرژی جذب کامپوزیت‌ها با افزودن کربن‌سیاه ارزیابی گردد.

نتایج نشان داد که بطور متوسط همه نمونه‌های تقویت‌شده با کربن‌سیاه نسبت به نمونه مرجع (پلی‌استر خالص) منجر به افزایش نیروی برخورد (وزنه سقوطی) به لودسل شده که خود نمایانگر افزایش 60 درصدی انرژی انتقالی به لودسل و در نتیجه کاهش مقدار انرژی جذب نمونه‌های هیبرید با طول الیاف 1 سانتی‌متر است که مطابق با نتایج آزمون ضربه در نتایج ارائه‌شده در شکل 11 است. نتایج همچنین بیانگر عدم تأثیر مقدار کربن‌سیاه بر روی انرژی جذب کامپوزیت‌های تقویت‌شده با کربن‌سیاه بوده که این اثر در استحکام ضربه کامپوزیت‌های تقویت‌شده با طول الیاف 1 و کربن‌سیاه مشاهده شد. نتایج حاصل از شکل 13 و 14 همچنین بیان می‌دارد مکانیزم‌های فعال در خواص جذب انرژی و استحکام ضربه در این کامپوزیت‌ها متفاوت بوده و روند تغییرات متفاوتی بستگی به ضریب‌اندازه، درصد الیاف و کربن‌سیاه مشاهده می‌گردد. این مقایسه همچنین نشان می‌دهد با افزایش طول الیاف از 0.5 به 1 سانتی‌متر در درصد وزنی کربن 5 درصد، مقدار انرژی الاستیک انتقالی به مقدار 100 درصد افزایش پیدا کرده که مبین کاهش انرژی جذب در وزنه سقوطی توسط کامپوزیت‌های هیبرید پلی‌استر/الیاف کنف/کربن‌سیاه در طول 1 سانتی‌متر کنف است.

[1] Rule of mixtures

مقایسه 28 و 65 درصد بهبود در انرژی جذب کامپوزیت‌های هیبرید سه‌جزئی به ترتیب نسبت به پلی‌استر خالص و نمونه‌های مرجع تقویت‌شده با 0.5٪ کنف با طول 0.5 سانتی‌متر در 5٪ کربن‌سیاه اثر هم‌افزایی کربن‌سیاه/کنف را تائید می‌نماید. همچنین، نکته قابل توجه مطابق با شکل 11 این مطلب است که استحکام ضربه در کامپوزیت مذکور مقدار 100 درصد افزایش را نسبت به کامپوزیت‌های تقویت‌شده با طول 0.5 کنف را نشان می‌دهد. همانطور که قبلاً اشاره شد عواملی چون وجود عیوب محلی، اگلوموراسیون، فصل‌مشترک غیراتصالی و مسیر ترجیحی ترک از میان[1] و یا در فصل‌مشترک الیاف/پلیمر[2] و نرمی و سختی فاز میانی بر روی خواص ضربه‌پذیری و جذب انرژی (نمونه بالک) تأثیرگذار بوده و در هر یک، دسته‌ای از این عوامل غالب است. یک فرضیه قابل تأمل در این مطالعه چگونگی رفتار کامپوزیت‌ها در برابر افزایش بیشتر طول الیاف است. با افزایش طول الیاف عموماً فرآیند ساخت یک کامپوزیت دشوارتر شده و این چالش به دلیل عدم امکان ایجاد دیسپارسیون و توزیع مناسب الیاف در داخل فاز رزین است. به عبارت دیگر، با افزایش طول الیاف، مگر در مواقعی که هم‌راستایی الیاف در داخل رزین/پلیمر قابل تضمین شده باشد (نظیر آن در فرآیند تزریق مذاب با آرایه الیاف در جهت فشار تزریق)، مقدار ضریب‌اندازه مؤثر کاهش یافته و انتظار می‌رود، خواص مکانیکی به طور بحرانی‌تر دچار کاهش گردد. این استدلال را نباید با کامپوزیت‌های الیاف پیوسته که بطور ماهیتی دارای فرآیند و چینش هم‌راستای الیاف بلند هستند، یکسان تلقی کرد.

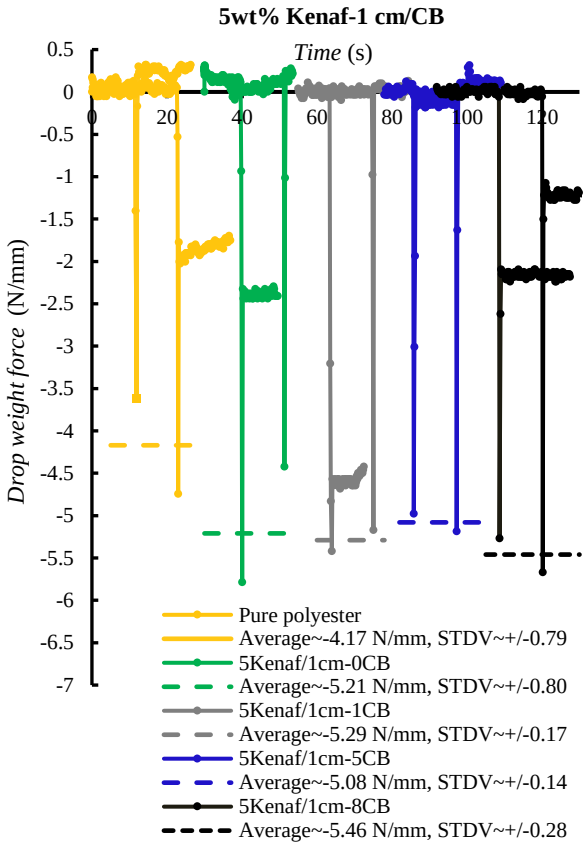

Fig. 14 Impact load in drop weight test of 5 wt% filled polyester/kenaf with fiber length of 1 cm against CB loading

شکل 14 نیروی ضربه در آزمون وزنه سقوطی در کامپوزیت‌های پلی‌استر/الیاف کنف در 5 درصد وزنی الیاف با طول 1 سانتی‌متر با تغییرات درصد وزنی کربن‌سیاه

4-نتیجه‌گیری

به‌منظور بررسی ارتباط بین استحکام ضربه، انرژی جذب و اثر نسبت ضریب‌اندازه، میکروکامپوزیت‌های هیبرید پلی‌استر/الیاف طبیعی کنف تهیه شد، و اثر هم‌افزایی فازهای تقویت‌کننده با افزودن کربن‌سیاه به نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف طبیعی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد طول الیاف به دلیل تأثیر بر روی نسبت ضریب‌اندازه مؤثر بر روی خواص استحکام ضربه و جذب انرژی نمونه‌های کامپوزیتی بسیار مؤثر بوده بطوریکه در درصدهای وزنی متفاوت الیاف کنف به دلیل غالب شدن مکانیزم‌های متفاوت نظیر خواص فازمیانی، فصل‌مشترک، آگلوموراسیون و عیوب ساختاری طول مشخصی از الیاف منجر به خواص بهینه می‌گردد. نتایج نشان داد استحکام ضربه با افزودن الیاف کنف تا 115، 184 و 203 درصد بطور چشمگیر نسبت به نمونه پلی‌استر خالص به ترتیب برای الیاف با ضریب‌اندازه نامی 80، 160 و 320 در درصدهای وزنی 10، 5 و 15 درصد منجر به افزایش استحکام ضربه می‌گردد. به دلیل ملاحظات در توجیه اقتصادی و حذف چالش‌های ساخت، ترکیبات با الیاف 5 درصد در دو طول 0.5 و 1 سانتی‌متر بر اساس بیشینه خواص ضربه‌پذیری انتخاب شده و به منظور ارزیابی خواص ضربه‌پذیری و جذب انرژی تا 8 درصد وزنی با کربن‌سیاه ترکیب شدند.

نتایج نشان داد افزودن کربن در نمونه‌ها با طول الیاف 0.5 منجر به روند افزایشی استحکام ضربه تا 108٪ در درصد وزنی 8 کربن‌سیاه را داشته در صورتیکه در نمونه‌ها با طول 1 سانتی‌متر، افزودن این فاز باعث افت خواص ضربه‌پذیری شده و با افزودن بیشتر کربن‌سیاه استحکام ضربه افزایش پیدا کرد. مطابق با نتایج جذب انرژی، 5 درصد کربن‌سیاه در فاز مرجع پلی‌استر/کنف 5 درصد منجر به افزایش انرژی جذب نمونه‌ها تا 28 و 65٪ نسبت به پلی‌استر خالص و نمونه مرجع با الیاف با تأکید بر اثر هم‌افزایی کربن‌سیاه شد. مشاهدات تائید کرد اگرچه بهینه درصد ترکیبات در حصول بیشینه خواص ضربه‌پذیری با مکانیزم‌های محلی به دلیل ماهیت ادامه ترک در آزمون ضربه در برابر رویدادهای جذب انرژی در نمونه‌ها بالک به دلیل ماهیت ایجاد آسیب در کل نمونه متفاوت است، استفاده از مقادیر کمتر الیاف طبیعی کنار فاز ثانوی با اطمینان از سطح تفرق ذرات این فاز منجر به اثر هم‌افزایی بیشتر و دستیابی به بهبود هر دو کمیت جذب انرژی و استحکام ضربه کامپوزیت‌ها می‌گردد.

5- تقدیر و تشکر

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

6- مراجع

[1] Ahmad, F., Choi, H. S. and Park, M. K., "A Review: Natural Fiber Composites Selection in View of Mechanical, Light Weight, and Economic Properties" Macromolecular materials and engineering, Vol. 300, No. 1, pp. 10-24, 2015.

[2] Ilyas, R., Zuhri, M., Aisyah, H., Asyraf, M., Hassan, S., Zainudin, E., Sapuan, S., Sharma, S., Bangar, S. and Jumaidin, R., "Natural Fiber-Reinforced Polylactic Acid, Polylactic Acid Blends and Their Composites for Advanced Applications" Polymers, Vol. 14, No. 1, pp. 202, 2022.

[3] Kumar, S., Manna, A. and Dang, R., "A Review on Applications of Natural Fiber-Reinforced Composites (Nfrcs)" Materials Today: Proceedings, Vol. 50, pp. 1632-1636, 2022.

[1] Through

[2] Along interface

[4] Silva, G., Kim, S., Aguilar, R. and Nakamatsu, J., "Natural Fibers as Reinforcement Additives for Geopolymers–a Review of Potential Eco-Friendly Applications to the Construction Industry" Sustainable Materials and Technologies, Vol. 23, pp. e00132, 2020.

[5] Amiandamhen, S., Meincken, M. and Tyhoda, L., "Natural Fibre Modification and Its Influence on Fibre-Matrix Interfacial Properties in Biocomposite Materials" Fibers and polymers, Vol. 21, No. 4, pp. 677-689, 2020.

[6] Asumani, O. and Paskaramoorthy, R., "Fatigue and Impact Strengths of Kenaf Fibre Reinforced Polypropylene Composites: Effects of Fibre Treatments" Advanced Composite Materials, Vol. 30, No. 2, pp. 103-115, 2021.

[7] Sarpanahi, R. and Tavakoli, m., "The Effect of Surface Treatment on Mechanical Properties of Plant Fiber-Reinforced Polymer Composites: A Review" In Persian, Journal of Textile Science and Technology, Vol. 8, No. 2, pp. 25-36, 2019.

[8] Shokrieh, M. M., and Omidi, J., "The Impact Resistance of Fiber-Reinforced Polymer Composites: A Review" Iranian Journal of Polymer Science and Technology (in Persian), Vol. 24, No. 4, 2011.

[9] Ramesh, M., Palanikumar, K. and Reddy, K. H., "Comparative Evaluation on Properties of Hybrid Glass Fiber-Sisal/Jute Reinforced Epoxy Composites" Procedia Engineering, Vol. 51, pp. 745-750, 2013.

[10] Reddy, M. I., Varma, U. P., Kumar, I. A., Manikanth, V. and Raju, P. K., "Comparative Evaluation on Mechanical Properties of Jute, Pineapple Leaf Fiber and Glass Fiber Reinforced Composites with Polyester and Epoxy Resin Matrices" Materials Today: Proceedings, Vol. 5, No. 2, pp. 5649-5654, 2018.

[11] Singh, J. I. P., Dhawan, V., Singh, S. and Jangid, K., "Study of Effect of Surface Treatment on Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Composites" Materials today: proceedings, Vol. 4, No. 2, pp. 2793-2799, 2017.

[12] Wambua, P., Ivens, J. and Verpoest, I., "Natural Fibres: Can They Replace Glass in Fibre Reinforced Plastics?" Composites science and technology, Vol. 63, No. 9, pp. 1259-1264, 2003.

[13] Khoathane, M., Vorster, O. and Sadiku, E., "Hemp Fiber-Reinforced 1-Pentene/Polypropylene Copolymer: The Effect of Fiber Loading on the Mechanical and Thermal Characteristics of the Composites" Journal of reinforced plastics and composites, Vol. 27, No. 14, pp. 1533-1544, 2008.

[14] Chandramohan, D. and Kumar, A. J. P., "Experimental Data on the Properties of Natural Fiber Particle Reinforced Polymer Composite Material" Data in brief, Vol. 13, pp. 460-468, 2017.

[15] Eze, I., Igwe, I., Ogbobe, O., Anyanwu, E. and Nwachukwu, I., "Mechanical Properties of Pineapple Leaf Powder Filled High Density Polyethylene" International Journal of Engineering and Technologies, Vol. 9, pp. 13-19, 2016.

[16] Senthiil, P. and Sirsshti, A., "Studies on Material and Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Composites" International Journal of Engineering and Science, Vol. 3, No. 11, pp. 18-27, 2014.

[17] Azammi, A. N., Ilyas, R., Sapuan, S., Ibrahim, R., Atikah, M., Asrofi, M. and Atiqah, A., "Characterization Studies of Biopolymeric Matrix and Cellulose Fibres Based Composites Related to Functionalized Fibre-Matrix Interface" in: Interfaces in Particle and Fibre Reinforced Composites, Eds., pp. 29-93: Elsevier, 2020.

[18] Moradi, E., Zeinedini, A. and Heidari Shahmaleki, E., "Mechanical Properties of Laminated Composites Reinforced by Natural Fibers of Cotton, Wool and Kenaf under Tensile, Flexural and Shear Loadings" In Persian, Journal of Science and Technology of Composites (JSTC), Vol. 6, No. 1, pp. -, 2019.

[19] Ariawan, D., Mohd Ishak, Z., Salim, M., Mat Taib, R. and Ahmad Thirmizir, M., "Wettability and Interfacial Characterization of Alkaline Treated Kenaf Fiber-Unsaturated Polyester Composites Fabricated by Resin Transfer Molding" Polymer Composites, Vol. 38, No. 3, pp. 507-515, 2017.

[20] Ramesh, P., Prasad, B. D. and Narayana, K., "Effect of Fiber Hybridization and Montmorillonite Clay on Properties of Treated Kenaf/Aloe Vera Fiber Reinforced Pla Hybrid Nanobiocomposite" Cellulose, Vol. 27, No. 12, pp. 6977-6993, 2020.

[21] Sapiai, N., Jumahat, A., Jawaid, M. and Khan, A., "Effect of Mwcnt Surface Functionalisation and Distribution on Compressive Properties of Kenaf and Hybrid Kenaf/Glass Fibres Reinforced Polymer Composites" Polymers, Vol. 12, No. 11, pp. 2522, 2020.

[22] Nematollahi, M., Karevan, M., Fallah, M. and Farzin, M., "Experimental and Numerical Study of the Critical Length of Short Kenaf Fiber Reinforced Polypropylene Composites" Fibers and Polymers, Vol. 21, No. 4, pp. 821-828, 2020.

[23] Norizan, M. N., Alias, A. H., Sabaruddin, F., Asyraf, M., Shazleen, S., Mohidem, N., Kamarudin, S., Norrrahim, M. N. F., Rushdan, A. I. and Ishak, M., "Effect of Silane Treatments on Mechanical Performance of Kenaf Fibre Reinforced Polymer Composites: A Review" Functional Composites and Structures, 2021.

[24] Cho, D., Lee, H. S. and Han, S. O., "Effect of Fiber Surface Modification on the Interfacial and Mechanical Properties of Kenaf Fiber-Reinforced Thermoplastic and Thermosetting Polymer Composites" Composite Interfaces, Vol. 16, No. 7-9, pp. 711-729, 2009.

[25] Abolhasani, S., Fallah, F. and Akbari, J., "Manufacturing and Investigating Mechanical Properties of Polymeric Composites Reinforced with Natural Fibers" Modares Mechanical Engineering, Vol. 19, No. 1, pp. 75-83, 2019.

[26] Gholami, M., Ahmadi, M. S., Tavanaei, M. A. and Khajeh Mahrizi, M., "Mechanical Properties of Date Palm Fiber Reinforced Polymer Composites: A Review" Basparesh, Vol. 7, No. 1, pp. 82-93, 2017.

[27] Singh, M. K. and Zafar, S., "Wettability, Absorption and Degradation Behavior of Microwave-Assisted Compression Molded Kenaf/Hdpe Composite Tank under Various Environments" Polymer Degradation and Stability, Vol. 185, pp. 109500, 2021.