



## بررسی تجربی ضربه شاریپی در جذب انرژی سازه‌های ساندویچی هیبریدی و غیرهیبریدی تقویت شده با نانوالیاف کربن

رضوان حسینی<sup>1</sup>، مهدی یارمحمد توسکی<sup>2\*</sup>، احمدرضا خورشیدوند<sup>3</sup>، سیدمهدی خرسندی جو<sup>2</sup>

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران

\* تهران، صندوق پستی 11365-4435، m\_yarmohammad@azad.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله:

در این مقاله هدف شناسایی مکانیزم‌های آسیب و میزان جذب انرژی کامپوزیت‌های ساندویچی تحت آزمون ضربه شاریپی است. نمونه‌ها از هسته‌ی فوم PVC و مجموعه‌ای از دو پوسته‌غیرهیبریدی متشکل از اینگرا و کربن و یک پوسته هیبریدی اینگرا/کربن ساخته شده‌اند. تمامی پوسته‌های کامپوزیتی متشکل از 4 لایه هستند که با رزین اپوکسی اصلاح شده توسط نانوالیاف کربن تقویت شده‌اند و در بالا و پایین فوم PVC قرار گرفته‌اند. نانوالیاف کربن با نسبت‌های وزنی از 0 تا 0.5 درصد وزنی به رزین اپوکسی اضافه شدند. نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM D256 تهیه شدند و تحت بارگذاری قرار گرفتند. پس از آزمون ضربه شاریپی، از نمونه‌ها برای ارزیابی سطح مکانیزم‌های آسیب به وجود آمده عکس‌برداری شد. نتایج نشان داد که نمونه‌های تقویت شده با نانوالیاف کربن جذب انرژی بالاتری نسبت به نمونه‌های بدون نانوالیاف کربن دارند. در این میان، افزایش جذب انرژی در کامپوزیت‌های ساندویچی اینگرا با افزودن درصد نانوالیاف کربن نسبت به دیگر نمونه‌ها قابل ملاحظه است. به طوری که نمونه‌ی اینگرا با 0.5 درصد نانوالیاف کربن بالاترین جذب انرژی را دارد. این قضیه لزوماً برای نمونه‌های دیگر صادق نبود و تغییر درصد نانو الیاف کربن نتیجه قابل توجهی بر نمونه‌های کربنی و هیبریدی نداشت. در مقایسه‌ی آسیب‌های خرابی مشاهده شده، جدایش بین‌لایه‌ای، برای نمونه هیبریدی شدیدتر بود و این نشان از این دارد که الیاف اینگرا و کربن ترکیب مناسبی برای بارگذاری ضربه نمی‌باشد.

دریافت: 1401/05/09

پذیرش: 1401/08/02

### کلیدواژه‌ها

آزمون ضربه شاریپی، کامپوزیت ساندویچی، الیاف مصنوعی اینگرا، نانوالیاف کربن

## Experimental investigation of Charpy impact in energy absorption of hybrid and non-hybrid sandwich structures reinforced with carbon nanofiber

Rezvan Hosseini<sup>1</sup>, Mahdi Yarmohammad Tooski<sup>1\*</sup>, Ahmad Reza khorshidvand<sup>1</sup>, Seyed Mahdi khorsandijou<sup>1</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University South Tehran, Tehran, Iran.

\* P.O.B. 11365-4435, Tehran, Iran, m\_yarmohammad@azad.ac.ir

### Keywords

Charpy impact test, Sandwich composite, Innegra synthetic fiber, Carbon nanofiber

### Abstract

This paper aims to identify damage mechanism and the amount of energy absorption of sandwich composites under the Charpy impact test. Each of the samples are made of a core with PVC foam and faces with different materials consisting of Innegra, carbon, and hybrid Innegra/carbon. All the faces are comprised of 4 layers reinforced with modified epoxy resin by carbon nanofiber (CNF) which are located on the top and the bottom of the core. CNFs are added to the epoxy resin with a weight ratio varying from 0 to 0.5 percent. The samples were prepared based on ASTM D256 standards and then loaded. After the Charpy impact test, the samples were photographed to evaluate the induced damage severity. The results showed all samples reinforced with CNF have higher energy absorption than the virgin ones. The increase in energy absorption of CNF added Innegra sandwich composites is significant in comparison to the other samples where the Innegra sandwich composite with 0.5 percent CNF shows the highest energy absorption. This was not same for the other samples and CNF adding didn't affect energy absorption considerably. Comparing the induced damage mechanism showed that delamination was intensive for the hybrid samples, showing that Innegra and carbon are not an appropriate combination to stand impact loading

### 1- مقدمه

طیف وسیعی از صنایع مانند صنایع خودروسازی، کشتیرانی و تجهیزات ورزشی دارند. اکثر کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف همراه با سایر اشکال مکانیسم‌های جذب انرژی مانند شکستن الیاف، ترک‌خوردگی ماتریس، جدا

امروزه کامپوزیت‌های ساندویچی تقویت شده با الیاف به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا که در مقایسه با مواد رایج مانند فلزات دارند، کاربرد گسترده‌ای در

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Hosseini, R., Yarmohammad Tooski, M., Khorshidvand, A. R., Khorsandijou, S. M., "Experimental investigation of Charpy impact in energy absorption of hybrid and non-hybrid sandwich structures reinforced with carbon nanofiber," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 9, No. 1, pp. 1912-1920, 2022. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.555294.1790>

شدن لایه‌ها نقش مهمی در پیشروی شکست و قابلیت جذب انرژی سازه‌های کامپوزیت ایفا می‌کنند. ضربه یکی از شایع‌ترین بارگذاری‌ها برای سازه‌های کامپوزیت است. بنابراین بررسی رفتار سازه‌های کامپوزیت در اثر ضربه لازم می‌باشد. عملکرد ضعیف مقاومت به ضربه مواد کامپوزیتی در مقایسه با فلزات، یکی از مشکلات بزرگ در کاربرد آن‌ها است. به منظور بهبود عملکرد ضربه‌ای مواد کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف یکسری پیشنهاد‌های اساسی وجود دارد. تحقیقات نشان داده‌اند یکی از عوامل بهبود عملکرد ضربه و افزایش استحکام، بهبود چقرمگی در مواد کامپوزیتی می‌باشد. افزایش چقرمگی در مواد کامپوزیت‌ها به عوامل مختلفی بستگی دارند. یکی از عوامل بهبوددهنده چقرمگی کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف ترموپلاستیک‌ها با مدول بالا گزارش شده‌اند [1]. پلی‌پروپیلن مدول بالا به نام تجاری اینگرا یک ترموپلاستیک می‌باشد که به دلیل تعادل استحکام، انعطاف‌پذیری و مقاومت شیمیایی شناخته شده است. الیاف اینگرا دارای کشیدگی بالاتری قبل از شکست دارند، بنابراین شکل‌پذیری و دوام بیشتری را فراهم می‌کند. اگرچه به اندازه الیاف کربن سفت نیست با این حال، استحکام بالای آن، آن را به گزینه‌ای جذاب برای بهبود عملکرد ضربه تبدیل می‌کند. پلی‌پروپیلن‌ها هنگامی که با رزین اپوکسی پیوند می‌زنند، زنجیره‌های مولکولی بلندی را تشکیل می‌دهند، که منجر به افزایش چقرمگی با ممانعت از انتشار آسیب می‌شود [2, 3]. یکی از محدودیت‌های ترموپلاستیک‌ها، نیاز به یک سازگاری شیمیایی و فیزیکی خوب بین این مواد و رزین است. پرکننده‌های معدنی که سازگاری خوبی با مواد ترموپلاستیک‌ها دارند، خواص مکانیکی به ویژه چقرمگی شکست پلی‌پروپیلن را بهبود می‌بخشد، اما منجر به افزایش وزن آن‌ها می‌شود و تجزیه و تحلیل مواد پلیمری را دشوار می‌کند [4]. یک روش کارآمد برای کاهش این محدودیت‌ها استفاده از پرکننده‌هایی مانند ذرات میکرو و نانو است که خواص مکانیکی به ویژه چقرمگی را بهبود می‌بخشد [5-10]. چندین مطالعه نشان داده‌اند که افزودن مواد نانو کربن (SWCNT، MWCNT، گرافن و غیره...) به مواد کامپوزیت منجر به بهبود خواص مکانیکی می‌شود. علاوه بر این استفاده از این روش مقرون به صرفه نیز می‌باشد [11-14]. نانوالیاف کربن تولید شده در بخار، به دلیل استحکام کششی و مدول بالا، توجه زیادی را در جهت افزایش رفتار ضربه به دلیل کاربردهای بالقوه خود در تقویت پلیمر را به خود جلب کرده‌اند. آن‌ها در حضور یک کاتالیزور از تجزیه در اثر حرارت هیدروکربن‌ها یا مونوکسیدکربن در حالت گازی سنتز می‌شوند [15, 16]. شکرپه و همکاران خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف شیشه تحت تأثیر نانولوله‌های کربنی مطالعه کردند. آن‌ها مشاهده کردند که با افزودن 5 درصد وزنی نانولوله کربن خواص مکانیکی افزایش می‌یابد. علاوه بر این مقاومت برشی و کششی نانو کامپوزیت‌ها به ترتیب 34 و 26 درصد در مقایسه با کامپوزیت‌های بدون نانو افزایش یافته است [17]. کامار و همکاران تأثیر افزودن نانوغرافن بر کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف شیشه را بررسی کردند. آن‌ها گزارش کردند که استحکام کششی با افزودن 25.0 درصد وزنی نانوغرافن به میزان 29 درصد و چقرمگی به میزان 25 درصد افزایش می‌یابد [18]. آشنا قاسمی و همکاران کامپوزیت‌های تقویت شده با لاستیک XNBR را تحت اثر نانو صفحات گرافن پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که با افزودن 75 درصد وزنی نانوصفحات گرافن استحکام ضربه میزان 23 درصد افزایش یافته است. علاوه بر این مدول کششی به میزان 20 درصد در حضور 1.5 درصد وزنی نانوصفحات گرافن افزایش داشته است [19]. ترموپلاستیک‌ها، مانند پلی‌پروپیلن، پلی‌کربنات، نایلون و

الاستومرهای ترموپلاستیک با نانوکربن تقویت شده‌اند [12, 20, 21]. بسیاری از گزارش‌ها نشان می‌دهد که کامپوزیت‌های تقویت شده با نانوالیاف کربن ممکن است آن‌ها را ضعیف‌تر یا اندکی قوی‌تر در مقایسه با کامپوزیت‌های بدون نانو کند، اما همچنان منجر به بهبود قابل توجهی در چقرمگی شکست می‌شود [22]. رایج‌ترین توضیح می‌تواند این باشد که نانوالیاف‌ها به طور تصادفی در مواد کامپوزیت توزیع شده‌اند. تحقیقات کمی در زمینه موثر واقع شدن نانوذرات در کامپوزیت‌های ساندویچی انجام شده است. مطالعات قابل توجهی در زمینه جذب‌های انرژی انجام شده است [23-26]. تقی‌پور و همکاران جذب انرژی و جذب انرژی ویژه تیرهای ساندویچی با هسته مشبک پر شده از فوم را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند جذب‌های ساندویچی با هسته مشبک می‌توانند تا 74.6 درصد انرژی را جذب کنند و افزایش 5.66 درصدی ظرفیت جذب انرژی ویژه برای تیرهای ساندویچی مشبک با انتخاب جهت مناسب مشاهده شد [27]. آویال و همکاران به طور تجربی پاسخ به آزمون ضربه سرعت پایین کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف شیشه مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دریافتند که افزایش نانوس تا 5 درصد وزنی موجب افزایش جذب انرژی می‌شود و در مواردی که نیاز به جذب انرژی کارآمد داریم استفاده می‌شوند [28]. بیدی و همکاران قابلیت جذب انرژی بر ساندویچ پانل‌ها با رویه‌های پلی‌پروپیلن تقویت شده با الیاف شیشه و فوم پلی‌یورتان تقویت شده با نانوس پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که افزودن نانوس در هسته فوم پلی‌یورتان باعث بهبود جذب انرژی می‌باشد. علاوه بر این، آن‌ها نشان دادند که ساندویچ پانل‌ها با رویه پلی‌پروپیلن 66 تا 96 درصد بهبود در جذب انرژی داشته‌اند [29].

در کلیه پژوهش‌های پیشین، محققان به بررسی و مطالعه کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن، شیشه و کولار تحت تأثیر نانومواد از جمله نانولوله‌های کربنی پرداخته‌اند. لذا تحقیقات کمی بر تأثیر نانوالیاف کربن بر کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف مصنوعی انجام شده است. با توجه به نیاز صنایع مختلف از جمله صنایع هوافضا، خودروسازی و اهمیت نانو کامپوزیت‌های ساندویچی تقویت شده با الیاف مصنوعی، استفاده از الیاف مصنوعی اینگرا در راستای جذب انرژی، در این مقاله به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. به دنبال بهبود چقرمگی و بررسی قابلیت‌های جذب انرژی کامپوزیت‌های ساندویچی، نانو الیاف کربن با نسبت‌های مختلف از 0 تا 0.5 درصد وزنی به رزین اپوکسی اعمال می‌شود. علاوه بر این، رفتار جذب انرژی کامپوزیت‌های ساندویچی غیرهیبریدی کربن و هیبریدی که از ترکیب الیاف اینگرا با الیاف کربن از طریق روش هیبریداسیون ساخته شده‌اند به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفتند. در ادامه به منظور مقایسه نمونه‌ها به محاسبه جذب انرژی ویژه کامپوزیت‌های ساندویچی پرداخته و نتایج با یکدیگر مقایسه می‌شوند. در پایان مکانیسم شکست نمونه‌ها بر اساس تصاویر گرفته شده با بررسی چشمی توصیف شده‌اند.

## 2- مواد و روش ساخت

### 2-1- مواد

مواد مورد استفاده جهت ساخت کامپوزیت‌های ساندویچی شامل الیاف کربن، الیاف اینگرا<sup>1</sup> و فوم PVC<sup>2</sup> است که مشخصات مکانیکی آن‌ها در جدول 1 آورده شده است.

<sup>1</sup> Innegra, www.innegrattech.com

<sup>2</sup> Polyvinyl chloride(PVC)

که در آن بدنه ماشین قرار دارد [30]. صفحه نمایش، انرژی جذب شده توسط ماده را در طول آزمایش ضربه نشان می‌دهد که بر حسب ژول اندازه‌گیری می‌شود. در آزمون ضربه شاریبی نمونه به صورت یک تیر با تکیه‌گاه ساده تعبیه می‌شود. ضربه در میانه دهانه تیر (پشت محل شیار) وارد می‌گردد. انرژی اعمال شده برای آزمون ضربه 200 ژول تنظیم شده است. به دلیل نزدیکی داده‌ها سه بار تکرارپذیری از هر نوع آزمایش شده است. ابعاد پیشنهاد شده نمونه‌ها برای آزمون ضربه شاریبی طبق استاندارد ASTM D256 حداقل 80 میلی‌متر طول و 15 میلی‌متر عرض است. یک شیار V شکل با زاویه 45 درجه و عمق 2 میلی‌متر با شعاع ریشه 0.25 طبق استاندارد ذکر شده بر نمونه‌ها ایجاد شده است [31]. انرژی جذب شده نمونه‌ها برحسب درصد‌های مختلف وزنی نانوالیاف کربن در جدول 3 ارائه شده است.

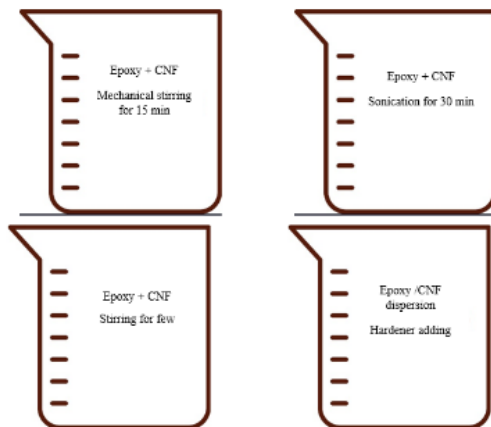


Fig. 1 Schematic of making CNF polymer

شکل 1 شماتیک ساخت پلیمر تقویت شده با نانو الیاف کربن

جدول 2 جزئیات هندسه نمونه‌ها

Table 2 The details of the geometry of the specimens

نمونه	چیدمان لایه‌ها	جرم (g)
نمونه‌های غیرهیبریدی اینگرا	I <sub>4</sub> /PVC/I <sub>4</sub>	5
نمونه‌های غیرهیبریدی کربن	C <sub>2</sub> I <sub>2</sub> /PVC/C <sub>2</sub> I <sub>2</sub>	4
نمونه‌های هیبریدی	C <sub>4</sub> /PVC/C <sub>4</sub>	3

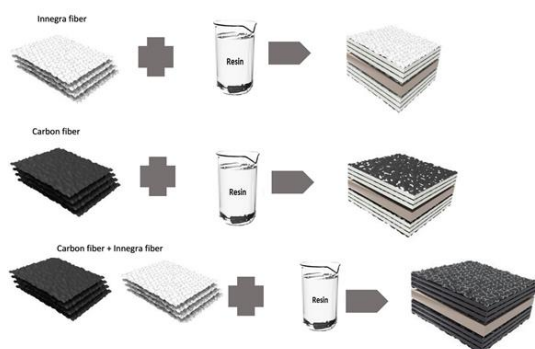


Fig. 2 Schematic of fabrication of sandwich composites (a) non-hybrid Innegra (b) non-hybrid carbon (c) hybrid

شکل 2 شماتیک ساخت کامپوزیت‌های ساندویچی (الف) غیرهیبریدی اینگرا (ب) غیرهیبریدی کربن (ج) هیبریدی

جدول 1 خواص مکانیکی مواد

انواع مواد	الیاف اینگرا	الیاف کربن	فوم PVC
مدول کششی (MPa)	667	230000	95
استحکام کششی (MPa)	13716	3800-4000	2.5
چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	0.84	1.78±0.01	0.08

نانوالیاف کربن که به روش رسوب بخار شیمیایی سنتز شد با قطر خارجی 60-160 نانومتر، طول 500-500 میکرومتر و چگالی 0.031 (g/cm<sup>3</sup>)، به عنوان تقویت‌کننده‌ی رزین اپوکسی استفاده شده است و با چهار درصد وزنی مختلف (0.0, 0.1, 0.3, 0.5) در رزین اپوکسی گنجانده شد. رزین اپوکسی با نام تجاری EPL1012 (ویسکوزیته بین 900-1000 میلی‌پاسکال در دمای 25 درجه سانتی‌گراد) توسط هاردنر EPH112 (ویسکوزیته 30 میلی‌پاسکال در دمای 25 درجه سانتی‌گراد) با نسبت وزنی (رزین به هاردنر) 100:14 انتخاب گردید. پارچه کربن با طرح بافته شده 200 گرم بر مترمربع و پارچه اینگرا با طرح بافته شده 400 گرم بر مترمربع برای ساخت پوسته‌ها استفاده شده است. فوم PVC یک ماده ایزوتروپ<sup>1</sup>، با نام تجاری Divinycell H80 که دارای ضخامت 5 میلی‌متر است به عنوان لایه میانی در کامپوزیت‌های ساندویچی استفاده شد.

## 2-2- فرایند ساخت

ساخت کامپوزیت‌های ساندویچی طی دو مرحله اصلی، ساخت پوسته‌های کامپوزیتی و تهیه مخلوط رزین اپوکسی با نانوالیاف کربن انجام شده است. پوسته‌های غیرهیبریدی از کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن و کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف اینگرا؛ و پوسته‌های هیبریدی از کامپوزیت‌های تقویت شده با ترکیبی از الیاف اینگرا/کربن ساخته شده‌اند. به منظور تهیه مخلوط رزین با نانوالیاف کربن ابتدا، نانو الیاف کربن با نسبت‌های وزنی 0، 1.0، 3.0، 5.0 درصد به رزین اپوکسی در یک بشر اضافه شده‌اند. سپس نانوالیاف کربن توسط یک همزن مکانیکی دوربالا به مدت 20 دقیقه با سرعت 3000 (RPM) توزیع می‌شود. در ادامه مخلوط مورد نظر با استفاده از پراب هموزنایزر آلتراسونیک با فرکانس 20 کیلوهرتز و توان 200 وات به مدت نیم ساعت در فواصل زمانی ثابت تحت امواج آلتراسونیک قرار گرفته‌اند. به منظور جلوگیری از افزایش دمای رزین اپوکسی، بشر در حمام یخ قرار داده می‌شود. پس از رسیدن به پراکندگی خوب نانوالیاف کربن در رزین اپوکسی، مقدار هاردنر (سخت‌کننده) با نادیده گرفتن نسبت‌های وزنی نانوالیاف کربن به مخلوط اضافه می‌شود. مخلوط حاصل به عنوان ماتریس برای ساخت نمونه‌ها استفاده می‌شود. فرایند تهیه رزین اپوکسی تقویت شده با نانوالیاف کربن به صورت شماتیک در شکل 1 نشان داده شده است.

به منظور ساخت پوسته‌های کامپوزیتی با لایه‌چینی دستی سه نوع کامپوزیت تهیه شده است (شکل 2). جزئیات و هندسه لایه‌چینی کامپوزیت‌های ساندویچی در جدول 2 آورده شده است.

همان‌طور که در جدول 2 دیده می‌شود، تمامی پوسته‌های کامپوزیتی متشکل از 4 لایه، از طریق غلتک با رزین اپوکسی اصلاح شده توسط نانوالیاف کربن خیس شده و در بالا و پایین فوم PVC قرار داده می‌شوند.

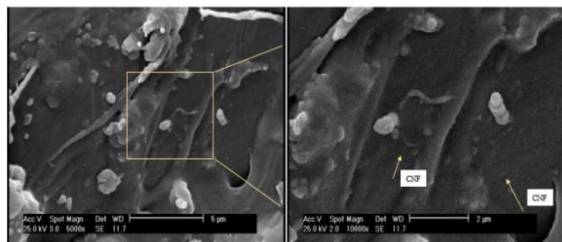
## 3- آزمون ضربه شاریبی

دستگاه ضربه شاریبی از سه بخش اصلی تشکیل شده است. فک، که در آن نمونه آزادانه قرار داده می‌شود و یک آونگ با جرم مشخص متصل به بازوی چرخان

<sup>2</sup> Prob

<sup>1</sup> Isotropic

شکل 3-الف تأثیر افزودن نانوالیاف کربن بر جذب انرژی کامپوزیت‌های ساندویچی با پوسته‌های غیرهیبریدی اینگرا تحت آزمون ضربه شاری را نشان می‌دهد. نمونه‌های تقویت شده با نانوالیاف کربن به ترتیب 38.6، 40.1 و 44.8 ژول انرژی حاصل از جذب انرژی ضربه شاری نسبت به نمونه بدون نانوالیاف کربن با جذب 32.1 ژول، عملکرد بهتری را نشان داده‌اند (جدول 3). جذب انرژی در نمونه‌های تقویت شده با 0.1 و 0.3 درصد وزنی نانوالیاف کربن به ترتیب 20.2 و 24.9 درصد نسبت به نمونه بدون نانوالیاف کربن افزایش داشت. همچنین جذب انرژی مربوط به نمونه تقویت شده با 0.5 درصد وزنی نانوالیاف کربن نسبت به نمونه بدون نانوالیاف کربن 39.5 درصد افزایش یافت. با توجه به نتایج حاصل از آزمون ضربه شاری نمونه‌ها، مقدار درصد وزنی و توزیع نانوالیاف کربن در رزین اپوکسی در میزان تغییرات جذب انرژی نقش مهم و قابل ملاحظه‌ای دارد. توزیع یکنواخت و تجمع ناچیز نانوالیاف کربن در زمینه اپوکسی که باعث پیوند کووالانسی قوی بین نانوالیاف کربن و رزین اپوکسی شده بر انرژی جذب شده در ضربه شاری تأثیر مثبت گذاشته است. تصویر SEM در شکل 4 نحوه توزیع یکنواخت و همگن نانوالیاف کربن در رزین اپوکسی با 0.5 درصد وزنی نانوالیاف کربن را نشان می‌دهد که نتایج تجربی را تأیید می‌کند.



**Fig.4** SEM image of uniform distribution and low accumulation of CNF in Innegra non-hybrid sandwich composite reinforced with 0.5wt%-CNF

شکل 4 تصویر SEM نحوه توزیع یکنواخت و تجمع کم نانوالیاف کربن در کامپوزیت ساندویچی غیرهیبریدی اینگرا تقویت شده با 0.5 درصد وزنی نانوالیاف کربن

همچنین نسبت طول به عرض بلند نانوالیاف کربن، باعث افزایش چسبندگی بین الیاف می‌شود. این موضوع قبلاً توسط برخی نویسندگان تأیید شده است [32]. براساس نتایج تجربی بدست آمده، انرژی ضربه جذب شده توسط کامپوزیت‌های ساندویچی با پوسته‌های غیرهیبریدی اینگرا به صورت تابعی از نانوالیاف کربن افزایش می‌یابد. شکل 3-ب انرژی جذب شده کامپوزیت‌های ساندویچی با پوسته‌های هیبریدی با درصد‌های مختلف وزنی نانوالیاف کربن را نشان می‌دهد. همانطور که در جدول 3 دیده می‌شود با اضافه کردن نانوالیاف کربن تا 0.1 درصد وزنی انرژی جذب شده به 17.5 ژول رسید و نسبت به نمونه بدون نانو 6.3 درصد کاهش داشته است. سپس با افزودن 0.3 درصد وزنی نانوالیاف کربن، جذب انرژی به 22.7 ژول رسید و به میزان 22 درصد نسبت به نمونه بدون نانوالیاف کربن افزایش یافت. نتایج تجربی نشان می‌دهد این میزان از نانوالیاف کربن تمایل به تقویت الیاف دارد و باعث بهبود چسبندگی الیاف‌ها می‌شود. همچنین با افزودن 0.5 درصد وزنی نانوالیاف کربن به رزین اپوکسی، انرژی به میزان 17 درصد در مقایسه با نمونه تقویت شده با 0.3 درصد وزنی کاهش یافته است. علت تغییرات جذب انرژی در نمونه‌های نانودار به نحوه پراکندگی نانوالیاف کربن در رزین اپوکسی برمی‌گردد که باعث تغییر در سفتی پوسته‌ها می‌شود. به عبارت دیگر به دلیل هم‌افزایی

جدول 3 نتایج آزمایش ضربه شاری

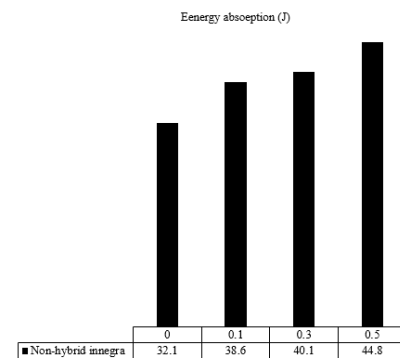
**Table 3** The result of Charpy impact test

جذب انرژی نمونه‌های غیرهیبریدی و هیبریدی بر حسب ژول (J)				
0.5%	0.3%	0.1%	0.0%	درصد وزنی نانوالیاف کربن
44.8	40.1	38.6	32.1	نمونه غیرهیبریدی اینگرا
22.03	22.07	22	21.03	نمونه غیرهیبریدی کربن
19.4	22.7	17.5	18.6	نمونه هیبریدی

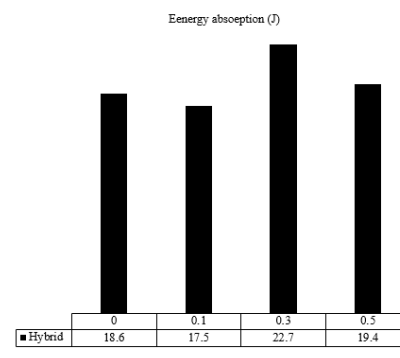
#### 4- نتایج و بحث

##### 4-1- تأثیر نانوالیاف کربن بر نمونه‌های هیبریدی و غیرهیبریدی

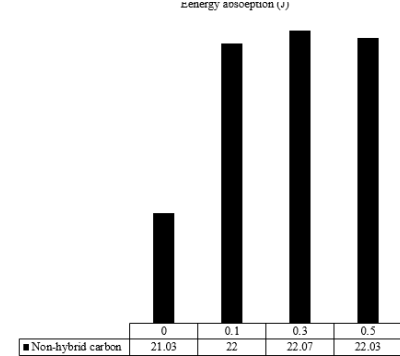
انرژی جذب شده برای نمونه‌های غیرهیبریدی و هیبریدی پس از ضربه بر حسب درصد‌های مختلف وزنی نانوالیاف کربن در شکل 3 نشان داده شده است.



الف-ا



ب-ب



ج-ج

**Fig. 3** Absorbed energy for non-hybrid and hybrid samples after impact with different weight percentages of CNF (a) Non-hybrid Innegra (b) Hybrid (c) Non-hybrid carbon

شکل 3 انرژی جذب شده برای نمونه‌های غیرهیبریدی و هیبریدی پس از ضربه با درصد‌های مختلف وزنی نانوالیاف کربن (الف) غیرهیبریدی اینگرا (ب) هیبریدی (ج) غیرهیبریدی کربن

مقدار 4.35 ژول بر گرم بود. از طرفی نمونه‌های غیرهیبریدی اینگرا بالاترین میزان جذب انرژی ویژه را با افزایش نانوالیاف کربن به خود اختصاص دادند. جذب انرژی ویژه در نمونه‌های غیرهیبریدی اینگرا 1.09، 1.22 و 1.76، 1.41، 1.84 برابر بیشتر از نمونه‌های غیرهیبریدی کربن و هیبریدی به ترتیب در نسبت‌های وزنی 0.1، 0.3 و 0.5 نانوالیاف کربن ظاهر شد. علاوه بر این، تأثیر نانوالیاف کربن بر جذب انرژی ویژه نمونه‌های غیرهیبریدی اینگرا بین 20.24 تا 39.56 درصد بیشتر از حالت بدون نانوالیاف کربن بود. در حالی که تأثیر نانوالیاف کربن بر جذب انرژی ویژه نمونه‌های غیرهیبریدی کربن نسبت به نمونه بدون نانوالیاف کربن در محدوده 4.6 تا 4.7 درصد بود. بنابراین، تأثیر نانوالیاف کربن بر جذب انرژی ویژه نمونه‌های غیرهیبریدی اینگرا قابل توجه‌تر بود.

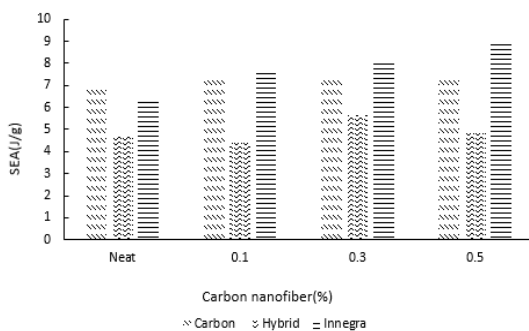


Fig. 5 The effect of CNF on SEA of sandwich composites

شکل 5 تأثیر نانوالیاف کربن بر جذب انرژی ویژه کامپوزیت‌های ساندویچی

#### 2-4- بررسی شکست نمونه‌های هیبریدی و غیرهیبریدی

سازه‌های ساندویچی یکی از انواع جاذب‌های انرژی می‌باشند که بخشی از انرژی را به صورت انرژی کرنشی الاستیک (بازگشت‌پذیر) و یا تغییر شکل پلاستیک (برگشت‌ناپذیر) تبدیل می‌کنند [34]. هدف از این مطالعه جذب حداکثر انرژی ناشی از ضربه شاری توسط کامپوزیت‌های ساندویچی به منظور جلوگیری از انتقال ضربه و شکست ناگهانی سازه است. در نمونه‌های ساندویچی تغییر شکل ناشی از انرژی کرنشی می‌تواند در اثر ایجاد چند مکانیزم شکست مانند جدایش لایه‌ای، لهیدگی هسته، کمانش محلی و بیرون‌زدگی الیاف اینگرا صورت گیرد. هریک از این مکانیزم‌ها ویژگی‌ها و ظرفیت جذب انرژی خاص خود را دارند. به دلیل تأثیر مستقیم مکانیزم شکست نمونه‌ها با پوسته‌های هیبریدی و غیرهیبریدی بر جذب انرژی، در این بخش به بررسی روند و چگونگی شکست نمونه‌ها با بازرسی چشمی در مقیاس ماکروسکوپی تحت فرایند ضربه شاری پرداخته می‌شود. شکل 6 شکست کامپوزیت‌های ساندویچی غیرهیبریدی کربن بر حسب درصد‌های مختلف وزنی نانوالیاف کربن را نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل 6 دیده می‌شود، شکست کامل اتفاق افتاده یعنی نمونه‌ها به دو تکه از وسط تقسیم شده‌اند. ماهیت شکنندگی کامپوزیت‌های ساندویچی غیرهیبریدی تقویت شده با الیاف کربن باعث رفتار ترد در آن‌ها شده است. شکست کامپوزیت‌های ساندویچی غیرهیبریدی اینگرا در شکل 7 با نسبت‌های مختلف وزنی نانوالیاف کربن پس از ضربه نشان داده شده است. انرژی جذب شده توسط پوسته‌های بالا و پایین نمونه‌های ساندویچی در غالب جدایش لایه‌ای، بیرون‌زدگی الیاف اینگرا و کمانش محلی صورت می‌گیرد و هسته فوم PVC انرژی را از طریق تغییر شکل جذب می‌کند.

تقویت رزین اپوکسی توسط نانوالیاف کربن، افزایش جذب انرژی را به همراه دارد از طرفی به دلیل کلوخه شدن احتمالی نانوالیاف کربن در رزین اپوکسی موجب کاهش در جذب انرژی می‌شود. تأثیر افزودن نانوالیاف کربن بر جذب انرژی کامپوزیت‌های ساندویچی با پوسته‌های غیرهیبریدی کربن تحت آزمون ضربه شاری در شکل 3-ج نشان داده شده است. قابلیت جذب انرژی برای نمونه‌های نانودار در نسبت‌های مختلف وزنی نانوالیاف کربن تقریباً یکسان است. همانطور که در جدول 3 دیده می‌شود، نمونه‌ها با محتوای نانوالیاف کربن جذب انرژی بالاتری نسبت به نمونه بدون نانوالیاف کربن دارند. میزان جذب انرژی در نمونه بدون نانوالیاف کربن، 21.03 ژول است که با افزودن 0.1 درصد وزنی نانوالیاف کربن، جذب انرژی 4.61 درصد افزایش یافت و به 22 ژول رسید. با افزایش نانوالیاف کربن به 0.3 درصد وزنی میزان جذب انرژی به 22.07 ژول رسید و 4.94 درصد در مقایسه با نمونه بدون نانوالیاف کربن افزایش یافته است. با این حال، اثرگذاری کم در جذب انرژی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. براساس مشاهدات می‌توان نتیجه گرفت که افزودن 0.3 درصد وزنی نانوالیاف کربن، جذب انرژی مواد کامپوزیتی را تا حدی کم افزایش می‌دهد. علاوه بر این، این میزان از جذب انرژی بیشترین مقدار در نمونه‌ها با پوسته‌های غیرهیبریدی کربن است. با افزایش درصد نانوالیاف کربن به 0.5 درصد وزنی، انرژی جذب شده به 22.03 ژول رسیده است که 0.18 درصد نسبت به نمونه تقویت شده با 3.0 درصد وزنی کاهش یافته است. علت اصلی کاهش عملکرد ضربه‌ای در این مقدار از نانوالیاف کربن می‌تواند توزیع نامطلوب نانوالیاف کربن در رزین اپوکسی باشد که باعث ایجاد پدیده کلوخه شدن در رزین می‌شود. محققان گزارش کردند وقتی تقویت‌کننده نانوالیاف کربن با رزین اپوکسی ترکیب می‌شود خواص مکانیکی آن‌ها افزایش می‌یابد. با این حال افزایش بیشتر در محتوای نانوالیاف کربن منجر به کاهش نسبی خواص مکانیکی می‌شود که دلیل آن افزایش کلوخه شدن نانوالیاف کربن در رزین اپوکسی است [33].

یکی از مهم‌ترین پارامترها در بررسی جاذب‌های انرژی کامپوزیت‌های ساندویچی، انرژی جذب شده ویژه ( $SEA^1$ ) می‌باشد. این پارامتر بصورت مقدار انرژی جذب شده بر واحد جرم می‌باشد. واحد این پارامتر در این مطالعه بصورت ژول بر گرم در نظر گرفته شده است.

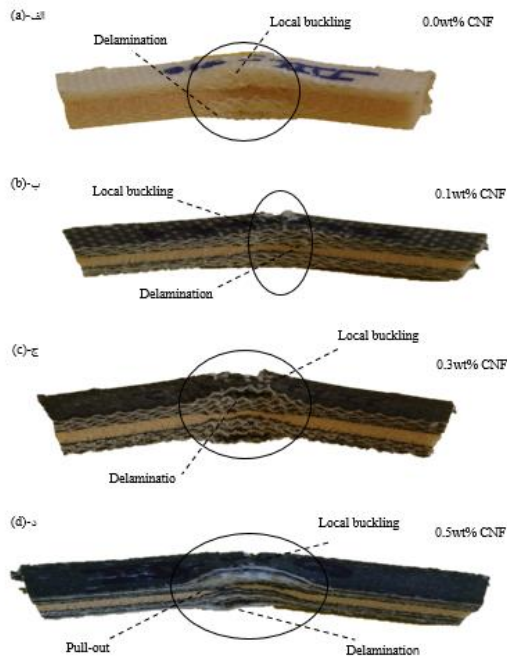
$$SEA = \frac{E}{m} \quad (1)$$

معادله (1) انرژی جذب شده ویژه را نشان می‌دهد که در آن  $E$  و  $m$  به ترتیب نشان دهنده انرژی جذب شده بر حسب ژول و جرم نمونه بر حسب گرم است.

نمودار میله‌ای جذب انرژی ویژه برای کامپوزیت‌های ساندویچی هیبریدی و غیرهیبریدی با درصد‌های مختلف نانوالیاف کربن در شکل 5 آورده شده است. همان‌طور که در شکل 5 مشاهده می‌شود، نمونه‌های بدون نانوالیاف کربن در سه حالت چینش لایه‌ها کمترین جذب انرژی ویژه را نشان دادند. از سوی دیگر، نمونه‌های تقویت شده با نانوالیاف کربن جذب انرژی ویژه بالاتری را از خود نشان دادند، که علت را می‌توان بهبود مشخصات ماتریس اپوکسی مخصوصاً چقرمگی ماتریس دانست. زیرا یک پیوند سطحی خوب بین رزین اپوکسی و نانوالیاف کربن ایجاد می‌کند. نمونه‌های هیبریدی کمترین میزان جذب انرژی ویژه را در میان سایر نمونه‌ها دارند. علاوه بر این، کمترین جذب انرژی ویژه نمونه‌های هیبریدی مربوط به نمونه تقویت شده با 0.1 درصد وزنی نانوالیاف کربن به

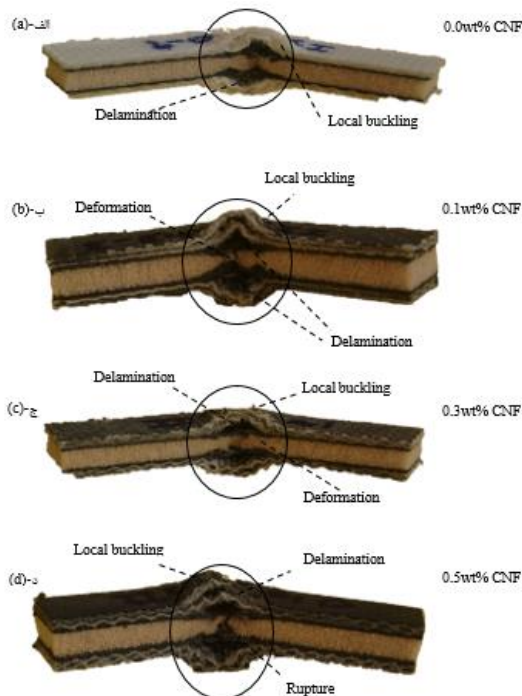
<sup>1</sup> Specific energy absorption





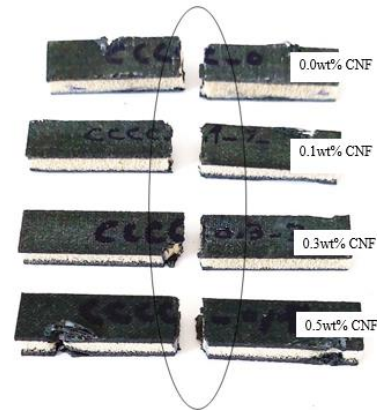
**Fig. 7** Failure of sandwich composite non-hybrid Innegra after impact with different weight percentages of CNF (a) 0.0wt% CNF (b) 0.1 wt% CNF (c) 0.3wt% CNF (d) 0.5wt% CNF

شکل 7 شکست کامپوزیت‌های ساندویچی غیرهیبریدی اینگرا پس از برخورد ضربه در درصدهای مختلف وزنی نانوالیاف کربن (الف) بدون نانو (ب) 0.1 درصد وزنی نانوالیاف کربن (ج) 0.3 درصد وزنی نانوالیاف کربن (د) 0.5 درصد وزنی نانوالیاف کربن



**Fig. 8** Failure of sandwich composites hybrid after impact with different weight percentages of CNF (a) 0.0wt% CNF (b) 0.1 wt% CNF (c) 0.3wt% CNF (d) 0.5wt% CNF

شکل 8 شکست کامپوزیت‌های ساندویچی هیبریدی پس از برخورد ضربه در درصدهای مختلف وزنی نانوالیاف کربن (الف) بدون نانو (ب) 0.1 درصد وزنی نانوالیاف کربن (ج) 0.3 درصد وزنی نانوالیاف کربن (د) 0.5 درصد وزنی نانوالیاف کربن



**Fig. 6** Failure of non-hybrid carbon sandwich composites after impact in different weight percentages of carbon nanofiber

شکل 6 شکست کامپوزیت‌های ساندویچی غیرهیبریدی کربن پس از برخورد ضربه در درصدهای مختلف وزنی نانوالیاف کربن

همانطور که در شکل 6 دیده می‌شود، شکست کامل اتفاق افتاده یعنی نمونه‌ها به دو تکه از وسط تقسیم شده‌اند. ماهیت شکنندگی کامپوزیت‌های ساندویچی غیرهیبریدی تقویت شده با الیاف کربن باعث رفتار ترد در آن‌ها شده است. شکست کامپوزیت‌های ساندویچی غیرهیبریدی اینگرا در شکل 7 با نسبت‌های مختلف وزنی نانوالیاف کربن پس از ضربه نشان داده شده است. انرژی جذب شده توسط پوسته‌های بالا و پایین نمونه‌های ساندویچی در غالب جدایش لایه‌ای، بیرون‌زدگی الیاف اینگرا و کمانش محلی صورت می‌گیرد و هسته فوم PVC انرژی را از طریق تغییر شکل جذب می‌کند.

همانطور که در شکل‌های 7-الف و 7-ب دیده می‌شود با افزودن 0.1 درصد وزنی نانوالیاف کربن در مقایسه با نمونه بدون نانوالیاف کربن، کمانش محلی و جدایش لایه‌ای در ابعاد کمتری در ناحیه پشتی که محل اصابت ضربه چکش است اتفاق افتاده است. شکل 7-ج نحوه تغییر شکل نمونه با 0.3 درصد وزنی نانوالیاف کربن پس از ضربه را نشان می‌دهد. جایی که کمانش محلی رخ داده است جدایش لایه‌ای در پوسته‌ی بالا و پایین فوم PVC دیده می‌شود. علاوه بر این نازک شدن فوم PVC که در بخش میانی نمونه قرار دارد از جمله موارد جذب انرژی در مقادیر بالاتر است. هنگامی که نانوالیاف کربن به 0.5 درصد وزنی می‌رسد، میزان جذب انرژی 39.5 درصد افزایش یافته است که در مقایسه با دیگر نمونه‌ها، درگیری مکانیزم‌های خرابی بیشتر بوده است. به عبارت دیگر حضور مکانیزم‌های جذب انرژی باعث شده است که این نمونه بالاترین مقاومت به ضربه را در مقایسه با دیگر نمونه‌ها از خود نشان دهد. با بررسی پوسته‌ی بالا و پایین نمونه، جدایش لایه‌ای در ناحیه پشتی قابل مشاهده است که به این شکل بخشی از انرژی را جذب نموده‌اند. جدایش بین‌لایه‌ای در مقایسه با نمونه 0.3 درصد وزنی نانوالیاف کربن کمتر دیده می‌شود. علت این امر را تنها می‌توان چسبندگی لایه‌ها به واسطه‌ی توزیع همگن نانوالیاف کربن دانست. در محل جدایش لایه‌ای، کمانش محلی در ابعاد کوچکتری نسبت به نمونه تقویت شده با 0.3 درصد وزنی نانوالیاف کربن اتفاق افتاده است. علاوه بر این بیرون‌زدگی الیاف اینگرا در لایه‌های بالا و پایین نمونه خیلی جزئی دیده شده است. همچنین تغییر شکل فوم PVC اتفاق افتاده است. همان‌طور که در شکل 7 مشاهده می‌شود، آسیب توسط پوسته‌های کامپوزیتی غیرهیبریدی اینگرا نسبتاً بیشتر از هسته فوم PVC است. بنابراین خرابی انتقال یافته به هسته فوم PVC بسیار کمتر است. شکل 8 شکست کامپوزیت‌های ساندویچی هیبریدی پس از ضربه در نسبت‌های وزنی مختلف را نشان می‌دهد.

چسبندگی مناسب بین لایه‌های کربن و لایه‌های اینگرا می‌باشد. با این حال افزایش زاویه انحراف از 180 درجه که با تغییر شکل پلاستیک نمونه‌ها همراه است به جذب انرژی کمک می‌کند. اگرچه این میزان از تغییر شکل پلاستیک نمونه‌ها مقدار کمی در جذب انرژی سهمیند.



Fig. 9 Angle of samples (a) non-hybrid Innegra (b) hybrid

شکل 9 زاویه نمونه‌های (الف) غیرهیبریدی اینگرا (ب) هیبریدی

#### 5- نتیجه‌گیری

پاسخ ضربه شاری روی کامپوزیت‌های ساندویچی با دو نوع پوسته‌ی غیرهیبریدی اینگرا و کربن؛ و یک پوسته هیبریدی اینگرا/کربن بررسی شد. نمونه‌های غیرهیبریدی با الیاف اینگرا سفتی و انرژی جذب شده بسیار بالاتری را در مقابل ضربه نشان دادند. انرژی جذب شده توسط نمونه غیرهیبریدی اینگرا، با اختلاف قابل توجهی از دو نمونه‌ی دیگر تا حدود دو برابر بیشتر بود. علاوه بر تأثیر جنس پوسته، تأثیر افزودن نانوالیاف کربن در جذب انرژی برای هر کدام از نمونه‌ها با چهار درصد وزنی از 0 تا 0.5 مطالعه شد. نتایج بیانگر این است که افزودن نانوالیاف کربن تأثیر بسزایی روی جذب انرژی کامپوزیت‌های ساندویچی با پوسته‌های اینگرا داشت ولی روی نمونه‌های دیگر تأثیر بسزایی نداشت یا گاهی سبب کاهش انرژی جذب انرژی نیز گردید. برای مثال در نمونه اینگرا، با افزایش نانوالیاف کربن تا 0.5 درصد وزنی میزان جذب انرژی به مراتب بالاتر از نمونه بدون نانو می‌باشد و از 32 ژول به 44.8 ژول افزایش یافت ولی برای نمونه هیبریدی در 0.1 درصد وزنی کاهش جزئی دارد. بنابراین، استفاده ترکیب الیاف اینگرا و کربن باعث افزایش انرژی جذب شده نبود و تأثیر مطلوبی در استحکام ضربه‌ای نداشت. جذب انرژی در نمونه‌های غیرهیبریدی کربن نیز زمانی افزایش می‌یابد که نانو الیاف کربن به 0.3 درصد وزنی می‌رسد و با افزودن نانو به 0.5 درصد وزنی، جذب انرژی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، یکی از مهم‌ترین پارامترهای جذب انرژی که در این مقاله بررسی شد جذب انرژی ویژه بود. نتایج حاصل از بررسی میزان جذب انرژی ویژه نشان داد، بیشترین جذب انرژی ویژه مربوط به نمونه غیرهیبریدی اینگرا تقویت شده با 0.5 درصد وزنی نانوالیاف کربن با مقدار 8.96 ژول بر گرم است. شایان ذکر است تقویت رزین اپوکسی با نانوالیاف کربن باعث شده که زاویه انحراف از 180 درجه در برای تمامی نمونه‌ها و به ویژه برای نمونه با پوسته‌ی اینگرا کاهش

پوسته‌های بالا و پایین نمونه‌های ذکر شده انرژی را در غالب کماتش محلی، جدایش لایه‌های کربن از لایه‌های اینگرا، بیرون‌زدگی الیاف اینگرا و گسیختگی الیاف کربن جذب می‌کنند و انرژی جذب شده توسط هسته فوم PVC از طریق شکستگی می‌باشد. همانطور که در جدول 3 دیده شد نمونه‌های ذکر شده قابلیت جذب انرژی کم دارند. با مقایسه شکست نمونه‌های هیبریدی به این نتیجه می‌رسیم که همه نمونه‌ها تقریباً رفتار مشابه‌ای دارند. این میزان از خرابی‌ها با تغییر در میزان نانوالیاف کربن متغیر است. مکانیسم شکست نمونه بدون نانوالیاف کربن و نمونه تقویت شده با 0.1 درصد وزنی نانوالیاف کربن در شکل‌های 8-الف و 8-ب آورده شده است که به وضوح جدایش لایه‌های اینگرا از لایه‌های کربن را نشان می‌دهد. علت این امر نشان از عدم چسبندگی خوب بین دو الیاف می‌باشد. میزان جدایش لایه‌های اینگرا از لایه‌های کربن در نمونه بدون نانو بیشتر است. همچنین بیرون‌زدگی الیاف اینگرا و کماتش محلی دیده می‌شود. همانطور که در شکل 8-ج مشاهده می‌شود، بخشی از انرژی ضربه، با افزایش نانو الیاف کربن از 0.1 درصد وزنی تا 0.3 درصد وزنی، به صورت جدایش لایه‌ای (جایی که نمونه دچار کماتش محلی شده‌اند واقع در ناحیه پشتی) و لهیدگی فوم PVC جذب کرده‌اند. شکل 8-د شکست نمونه تقویت شده با 0.5 درصد وزنی نانوالیاف کربن را نشان می‌دهد که در مقایسه با نمونه تقویت شده با 0.3 درصد وزنی نانوالیاف کربن جذب انرژی کمتری دارد. همانطور که گفته شد، علت تغییر در مکانیسم‌های شکست به این دلیل است که میزان پخش‌شدگی نانوالیاف کربن در رزین اپوکسی باعث تغییر در اتصال الیاف و در نتیجه تغییر در خواص مکانیکی آن‌ها می‌شود. براساس مشاهدات می‌توان نتیجه گرفت، ترکیب الیاف اینگرا با الیاف کربن، تأثیر قابل ملاحظه‌ای در عملکرد ضربه و در نتیجه جذب انرژی نداشته‌اند و عدم چسبندگی مناسب بین لایه‌های الیاف اینگرا و الیاف کربن را می‌توان در جدایش لایه‌ای در ناحیه پشتی نمونه‌ها ملاحظه نمود. لازم به ذکر است که جدایش لایه‌ای و کماتش محلی در نمونه تقویت شده با 0.3 درصد وزنی نانوالیاف کربن در مقایسه با نمونه‌های تقویت شده با 0.1 و 0.5 درصد وزنی نانو کمتر دیده شده که نشان از بهبود در چسبندگی بین الیاف (سفتی لایه‌ها) است. به طور خلاصه، پوسته‌های کامپوزیت‌های ساندویچی هیبریدی انرژی را هم از طریق شکست ناشی از افزودن الیاف کربن در لایه‌بندی هیبریدی و همچنین با خرابی الیاف اینگرا جذب می‌کنند. با این حال، انتخاب این نوع ترکیب برای کامپوزیت‌های ساندویچی مناسب نیست و با کمترین مقاومتی دچار آسیب می‌شوند.

زاویه انحراف نمونه‌های هیبریدی و غیرهیبریدی پس از اعمال ضربه شاری، یکی از موارد قابلیت جذب انرژی نمونه‌های آزمایش شده می‌باشد. صدیقی و همکاران به بررسی رفتار جذب انرژی با در نظر گرفتن زاویه انحراف از 180 کامپوزیت‌ها پرداختند [35]. شکل 9 زاویه انحراف از 180 درجه با نسبت‌های مختلف وزنی نانوالیاف کربن نمونه‌های غیرهیبریدی اینگرا و هیبریدی را نشان می‌دهد. زاویه انحراف از 180 درجه در نمونه‌های غیرهیبریدی اینگرا در حالت مقایسه‌ای، نشان‌دهنده‌ی این موضوع است که با افزایش درصد وزنی نانوالیاف کربن زاویه انحراف کاهش یافته است (شکل 9-الف). کاهش زاویه انحراف حاکی از سفتی مناسب بین لایه‌ها می‌باشد. همانطور که در شکل 9-ب دیده می‌شود زاویه انحراف در نمونه هیبریدی تقویت شده با 0.3 درصد وزنی نانوالیاف کربن نسبت به نمونه‌های بدون نانوالیاف کربن و تقویت شده با 0.1 درصد وزنی نانوالیاف کربن کاهش جزئی دارد. زاویه انحراف در نمونه هیبریدی تقویت شده با 0.5 درصد وزنی نانوالیاف کربن کمی افزایش می‌یابد. افزایش زاویه انحراف از 180 درجه در نمونه‌ی فوق بخاطر عدم

- [14] Taghipoor, H., Fereidoon, A., Ghasemi-Ghalebahman, A. and Mirzaei, J., "Experimental Assessment of Mechanical Behavior of Basalt/Graphene/Pp-G-Ma-Reinforced Polymer Nanocomposites by Response Surface Methodology" *Polymer Bulletin*, pp. 1-23, 2022.
- [15] Wang, D. H., Sihn, S., Roy, A. K., Baek, J.-B. and Tan, L.-S., "Nanocomposites Based on Vapor-Grown Carbon Nanofibers and an Epoxy: Functionalization, Preparation and Characterization" *European polymer journal*, Vol. 46, No. 7, pp. 1404-1416, 2010.
- [16] Zhou, Y., Pervin, F., Jeelani, S. and Mallick, P., "Improvement in Mechanical Properties of Carbon Fabric-Epoxy Composite Using Carbon Nanofibers" *Journal of materials processing technology*, Vol. 198, No. 1-3, pp. 445-453, 2008.
- [17] Shokrieh, M. M., Zeinedini, A. and Ghoreishi, S. M., "Effects of Adding Multiwall Carbon Nanotubes on Mechanical Properties of Epoxy Resin and Glass/Epoxy Laminated Composites" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 9, pp. 125-133, 2015.
- [18] Kamar, N. T., Hossain, M. M., Khomenko, A., Haq, M., Drzal, L. T. and Loos, A., "Interlaminar Reinforcement of Glass Fiber/Epoxy Composites with Graphene Nanoplatelets Part a Applied Science and Manufacturing", 2015.
- [19] Ashenai Ghasemi, F., Saberian, M. H., Ghasemi, I. and Daneshpayeh, S., "Experimental Investigation on Mechanical Properties of Hybrid Nano-Composite Based on Epoxy/Graphene Nano-Platelets/Carboxylated Acrylonitrile Butadiene Rubber" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 3, pp. 395-402, 2018.
- [20] Hasan, M. M., Zhou, Y. and Jeelani, S., "Thermal and Tensile Properties of Aligned Carbon Nanofiber Reinforced Polypropylene" *Materials letters*, Vol. 61, No. 4-5, pp. 1134-1136, 2007.
- [21] Odagiri, N., Kishi, H. and Yamashita, M., "Development of Torayca Prepreg P2302 Carbon Fiber Reinforced Plastic for Aircraft Primary Structural Materials" *Advanced Composite Materials*, Vol. 5, No. 3, pp. 249-254, 1996.
- [22] Zhou, Y., Pervin, F., Lewis, L. and Jeelani, S., "Experimental Study on the Thermal and Mechanical Properties of Multi-Walled Carbon Nanotube-Reinforced Epoxy" *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 452, pp. 657-664, 2007.
- [23] Taghipoor, H. and Sefidi, M., "Energy Absorption of Foam-Filled Corrugated Core Sandwich Panels under Quasi-Static Loading" *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, pp. 14644207221110483, 2022.
- [24] Taghipoor, H. and Sadeghian, A., "Experimental Investigation of Single and Hybrid-Fiber Reinforced Concrete under Drop Weight Test" in *Proceeding of Elsevier*, pp. 1073-1083.
- [25] Mirzaei, J. and Taghipoor, H., "Experimental Investigation of Glass/Hemp Hybrid Composite Plates under Low-Velocity Impact Loading" *Journal of Aeronautical Engineering*, 2022.
- [26] Taghipoor, H. and Eyvazian, A., "Quasi-Static Axial Crush Response and Energy Absorption of Composite Wrapped Metallic Thin-Walled Tube" *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 44, No. 4, pp. 1-19, 2022.
- [27] Taghipoor, H. and Noori, M. D., "Experimental Investigation of Energy Absorption in Foam Filled Sandwich Beams with Expanded Metal Sheet as Core under Quasi-Static Bending" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 3, pp. 126-134, 2018.
- [28] Ávila, A. F., Carvalho, M. G. R., Dias, E. C. and da Cruz, D. T., "Nano-Structured Sandwich Composites Response to Low-Velocity Impact" *Composite Structures*, Vol. 92, No. 3, pp. 745-751, 2010.
- [29] Bidi, A., Liaghat, G. and Rahimi, G., "Effect of Nano Clay Addition to Energy Absorption Capacity of Steel-Polyurea Bi-Layer" *Journal of Materials Science and Engineering: A*, Vol. 494, No. 1-2, pp. 380-384, 2008.
- یابد که نشانگر افزایش سفتی نمونه‌هاست. همچنین مکانیسم‌های آسیب به صورت کماتش محلی، جدایش لایه‌ای و بیرون‌زدگی الیاف در تمامی نمونه‌ها اتفاق می‌افتد به استثناء کامپوزیت‌های ساندویچی کربن که رفتار ترد و شکننده دارند. در نمونه اینگرا با افزایش نانو الیاف کربن چسبندگی لایه‌ها بهبود یافته است. این در حالیست که در نمونه‌های هیبریدی با 0.5 درصد نانوالیاف کربن بر اثر پدیده کلوخه شدن جدایش بین‌لایه‌ای شدیدتری اتفاق می‌افتد.

#### 6-منابع

- [1] Fotouhi, M., Saghafi, H., Brugo, T., Minak, G., Fragassa, C., Zucchelli, A. and Ahmadi, M., "Effect of PvdF Nanofibers on the Fracture Behavior of Composite Laminates for High-Speed Woodworking Machines" *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 231, No. 1, pp. 31-43, 2017.
- [2] Lee, S.-E., Jeong, E., Lee, M. Y., Lee, M.-K. and Lee, Y.-S., "Improvement of the Mechanical and Thermal Properties of Polyethersulfone-Modified Epoxy Composites" *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 33, pp. 73-79, 2016.
- [3] Rajasekaran, R., Alagar, M. and Chozhan, C. K., "Effect of Polyethersulfone and N, N'-Bismaleimido-4, 4'-Diphenyl Methane on the Mechanical and Thermal Properties of Epoxy Systems" *Express Polym. Lett*, Vol. 2, pp. 339-348, 2008.
- [4] Ingram, J., Zhou, Y., Jeelani, S., Lacy, T. and Horstemeyer, M. F., "Effect of Strain Rate on Tensile Behavior of Polypropylene and Carbon Nanofiber Filled Polypropylene" *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 489, No. 1-2, pp. 99-106, 2008.
- [5] Akangah, P., Lingaiah, S. and Shivakumar, K., "Effect of Nylon-66 Nano-Fiber Interleaving on Impact Damage Resistance of Epoxy/Carbon Fiber Composite Laminates" *Composite Structures*, Vol. 92, No. 6, pp. 1432-1439, 2010.
- [6] Li, G., Li, P., Yu, Y., Jia, X., Zhang, S., Yang, X. and Ryu, S., "Novel Carbon Fiber/Epoxy Composite Toughened by Electrospun Polysulfone Nanofibers" *Materials Letters*, Vol. 62, No. 3, pp. 511-514, 2008.
- [7] Li, G., Li, P., Zhang, C., Yu, Y., Liu, H., Zhang, S., Jia, X., Yang, X., Xue, Z. and Ryu, S., "Inhomogeneous Toughening of Carbon Fiber/Epoxy Composite Using Electrospun Polysulfone Nanofibrous Membranes by in Situ Phase Separation" *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 3-4, pp. 987-994, 2008.
- [8] Robinette, E. J., "Toughening Vinyl Ester Matrix Composites by Tailoring Nanoscale and Mesoscale Interfaces", *Drexel University*, 2006.
- [9] Zhang, J., Lin, T. and Wang, X., "Electrospun Nanofibre Toughened Carbon/Epoxy Composites: Effects of Polyetherketone Cardo (Pek-C) Nanofibre Diameter and Interlayer Thickness" *Composites science and technology*, Vol. 70, No. 11, pp. 1660-1666, 2010.
- [10] Emamieh, H. R., Yarmohammad Tooski, M., Jjabbari, M. and Khorshidvand, A. R., "An Experimental Investigation of Impact Resistance of Sandwich Panels Reinforced by Nano-Silica and Nano-Clay" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 8, No. 2, pp. 1573-1582, 2021.
- [11] Sun, L., Warren, G., O'reilly, J., Everett, W., Lee, S., Davis, D., Lagoudas, D. and Sue, H.-J., "Mechanical Properties of Surface-Functionalized Swcnt/Epoxy Composites" *Carbon*, Vol. 46, No. 2, pp. 320-328, 2008.
- [12] Wei, J., Vo, T. and Inam, F., "Epoxy/Graphene Nanocomposites-Processing and Properties: A Review" *Rsc Advances*, Vol. 5, No. 90, pp. 73510-73524, 2015.
- [13] Yu, N., Zhang, Z. and He, S., "Fracture Toughness and Fatigue Life of Mwcnt/Epoxy Composites" *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 494, No. 1-2, pp. 380-384, 2008.



- of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 2, pp. 157-164, 2016.
- [30]Hufenbach, W., Ibraim, F. M., Langkamp, A., Böhm, R. and Hornig, A., "Charpy Impact Tests on Composite Structures—an Experimental and Numerical Investigation" Composites Science and Technology, Vol. 68, No. 12, pp. 2391-2400, 2008.
- [31]Standard, A., "D265," "Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics" West Conshohocken (PA): ASTM International, 2010.
- [32]Shokrieh, M., Ghoreishi, S. and Esmkhani, M., "Toughening Mechanisms of Nanoparticle-Reinforced Polymers" in: Toughening Mechanisms in Composite Materials, Eds., pp. 295-320: Elsevier, 2015.
- [33]Zhou, Y., Jeelani, S. and Lacy, T., "Experimental Study on the Mechanical Behavior of Carbon/Epoxy Composites with a Carbon Nanofiber-Modified Matrix" Journal of Composite Materials, Vol. 48, No. 29, pp. 3659-3672, 2014.
- [34]Alghamdi, A., "Collapsible Impact Energy Absorbers: An Overview" Thin-walled structures, Vol. 39, No. 2, pp. 189-213, 2001.
- [35]Sadighi, M. and Dariushi, S., "An Experimental Study of the Fibre Orientation and Laminate Sequencing Effects on Mechanical Properties of Glare" Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, Vol. 222, No. 7, pp. 1015-1024, 2008.