



## اثر نانو لوله کربنی بر رفتار ضربه سرعت بالای کامپوزیت هیبریدی الیاف کولار- پلی اتیلن با وزن مولکولی بالا با چیدمان لایه لایه

منصور باوفا بیگدیلو<sup>1</sup>، رضا اسلامی فارسانی<sup>2\*</sup>، حسین ابراهیم نژاد خالجیری<sup>3</sup>

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

2- دانشیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

3- دانشجوی دکترا، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

\* تهران، صندوق پستی 19919-43344، eslami@kntu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

دریافت: 97/02/23

پذیرش: 97/08/19

### کلیدواژگان

نانو لوله کربنی چند جداره

الیاف کولار

الیاف پلی اتیلن

ضربه سرعت بالا

### چکیده

در این تحقیق، تاثیر افزودن نانولوله کربنی چند جداره بر رفتار ضربه سرعت بالای کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف کولار و الیاف پلی اتیلن با وزن مولکولی بالا با چیدمان لایه لایه بررسی شد. در ابتدا، نمونه‌های کامپوزیتی هیبریدی در درصدهای وزنی 0.1، 0.3، 0.5 و 0.9 از نانولوله کربنی به روش لایه گذاری دستی در دمای 200 درجه سانتیگراد و زمان 50 دقیقه ساخته شدند. سپس آزمایش ضربه سرعت بالا با پرتابه نوک تیز با سرعت 84 m/s بر روی کامپوزیت‌های هیبریدی انجام پذیرفت. همچنین برای بررسی مکانیزم شکست نانو کامپوزیت‌های هیبریدی از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) استفاده شد. نتایج بدست آمده نشان داد جذب انرژی برای نمونه حاوی 0.1 درصد وزنی نانولوله کربنی نسبت به نمونه بدون نانو به میزان 13.56 درصد افزایش یافته است. توزیع مناسب نانولوله کربنی و انتقال تنش بین الیاف و زمینه، باعث شدند تا افزایش لایه لایه شدگی و جذب انرژی بیشتر شود. همچنین نتایج میکروسکوپی نشان داد در 0.1 درصد وزنی نانولوله کربنی با ایجاد پدیده‌های پلزی ترک و بیرون کشیدگی نانولوله جذب انرژی در کامپوزیت هیبریدی افزایش یافته است.

## The effect of carbon nanotubes on high velocity impact behavior of hybrid Kevlar-ultrahigh molecular weight polyethylene fibers composite with interlayer configuration

Mansour Bavafa Bigdilou<sup>1</sup>, Reza Eslami-Farsani<sup>2\*</sup>, Hossein Ebrahimnezhad-Khaljiri<sup>2</sup>

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

2- Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

\* P.O.B. 19919-43344, Tehran, eslami@kntu.ac.ir

### Keywords

Multi-walled carbon nanotubes  
Kevlar fibers  
Polyethylene fibers  
High velocity impact

### Abstract

In this research, the effect of adding multi-walled carbon nanotubes on the high velocity impact behavior of epoxy matrix composites with kevlar fibers and ultra-high molecular weight polyethylene fibers layered arrangement was investigated. Initially, hybrid composite specimens were made in 0.1, 0.3, 0.5 and 0.9 wt.% carbon nanotube by hand lay-up method, in the temperature of 200 °C and 50 minutes. Therefore, high velocity impact test with a sharp projectile with velocity 84 m/s was performed on hybrid composites. Also, to investigate the failure mechanism of hybrid nanocomposites, a field emission scanning electron microscope (FESEM) was used. The results showed that an energy adsorption increased for the specimen containing 0.1 wt.% of carbon nanotubes by 13.56% in comparison with the without nano specimen. The proper distribution of carbon nanotubes and stress transfer between fibers and matrix were caused to increase the delamination and energy absorption. Also, microscopic results showed that in 0.1 wt.% of carbon nanotube, the energy absorption in the hybrid composite was increased by the cracking bridging and nanotube pulling out phenomena.

### 1- مقدمه

گسترده مورد استفاده قرار می گیرند. یکی از این کاربردهای مناسب که در مورد کامپوزیت‌ها حاصل شده است، استفاده از آن‌ها در کاربردهای مقاوم به ضربه می‌باشد. محافظت در برابر عوامل مقاوم به ضربه یکی از مسائل همیشگی در تحقیقات مرتبط با مسایل و تحلیل‌های مکانیکی به شمار می‌رود و مطالعات

مواد کامپوزیتی یکی از پرمصرفترین مواد در صنایع پیشرو، مواد کامپوزیتی با زمینه پلیمری هستند که به دلیل دارا بودن ویژگی‌های خاص مانند خواص خوب در دمای محیط، سهولت ساخت و هزینه کم در کاربردهای متنوع و

### Please cite this article using:

Bavafa Bigdilou, M. Eslami-Farsani, R. and Ebrahimnezhad-Khaljiri, H., "The effect of carbon nanotubes on high velocity impact behavior of hybrid Kevlar- ultrahigh molecular weight polyethylene fibers composite with interlayer configuration", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 4, pp. 533-540 2020.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

خسروی<sup>۷</sup> و همکارانش [16] تاثیر افزودن نانولوله کربنی بر رفتار مکانیکی کامپوزیت زمینه اپوکسی را بررسی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که بهبود خواص در درصدهای 0.3 و 0.5 نانولوله کربنی حاصل شده است. اینام<sup>۸</sup> و همکارانش [17] تاثیر مقادیر بسیار کم نانولوله کربنی (0.025، 0.05 و 0.1 درصد وزنی) را در کامپوزیت زمینه اپوکسی بررسی کردند. نتایج نشان داد که بهترین خواص مکانیکی در مقدار 0.025 درصد وزنی نانولوله کربنی بدست آمده که موجب افزایش 35 درصدی مدول خمشی شده است. ترقی<sup>۹</sup> و همکارانش [18] پاسخ ضربه سرعت پایین کامپوزیت‌های چند لایه اپوکسی-الیاف کولار با درصدهای وزنی مختلف از نانولوله‌های کربنی چند جداره را در شرایط دمای محیط و دمای 40- درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار دادند. نتایج بدست آمده نشان داد که نانولوله کربنی رفتار مقاومت به ضربه را بهبود داده است و اندازه آسیب در الیاف کولار در دمای محیط و دمای پایین محدود شده است. علاوه بر این، 0.5 درصد وزنی نانولوله کربنی منجر به افزایش حدود 35 درصد در جذب انرژی در دمای محیط شده است، در حالی که 0.3 درصد وزنی نانولوله کربنی حدود 34 درصد جذب انرژی را در دمای پایین به همراه دارد.

چودری<sup>۱۰</sup> و همکارانش [19] تاثیر بارهای محوری و عرضی بر روی استحکام و مدول کششی الیاف کولار و الیاف پلی‌اتیلن بررسی کردند. نتایج نشان داد که مدول کششی و استحکام کششی برای الیاف کولار به ترتیب 4 و 9 درصد و برای الیاف پلی‌اتیلن به ترتیب 19 و 12 درصد کاهش یافتند. بوتولا<sup>۱۱</sup> و همکارانش [20] چند لایه‌های کامپوزیتی بر پایه الیاف با کارایی بالا مانند کولار و پلی‌اتیلن برای کاربردهای مقاوم به ضربه را بررسی کردند. در میان کامپوزیت‌ها، نمونه‌هایی با الیاف کولار جذب انرژی ضربه بالاتری را از الیاف پلی‌اتیلن نشان دادند. با این حال، کامپوزیت حاوی پلی‌اتیلن، نیرو و انرژی بالاتری را تا شکست نشان داد.

با توجه به تجربه و دانش قبلی، در حال حاضر برای ساخت کامپوزیت‌ها با خاصیت مقاومت عالی در برابر بارهای ضربه‌ای، الیاف کولار و الیاف پلی‌اتیلن بیشترین کاربرد را دارند. افزودن نانوذرات باعث بهبود خواص مکانیکی از جمله خواص ضربه‌ای کامپوزیت می‌شود. تاکنون بررسی رفتار مکانیکی سازه‌های هیبریدی الیاف کولار و پلی‌اتیلن کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. نوآوری این کار پژوهشی افزودن نانولوله‌های کربنی در کامپوزیت هیبریدی الیاف کولار- پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بالا و بررسی خواص مقاومت به ضربه این نوع از کامپوزیت‌ها می‌باشد. شایان ذکر است نوع چیدمان هیبریدی انتخاب شده چیدمان لایه لایه می‌باشد.

## 2- بخش تجربی

### 2-1- مواد اولیه

در تحقیق حاضر، رزین اپوکسی بیسفنول A<sup>۱۲</sup> تحت نام تجاری اپوکسی 828 و هاردنر پلی‌آمین<sup>۱۳</sup> CETEPOX1312-05 ساخت شرکت آدیپتیا بیرلا<sup>۱۴</sup> کشور تایلند با نسبت وزنی 100 به 10 به عنوان زمینه کامپوزیت انتخاب شد. برای ساخت نمونه‌های کامپوزیت هیبریدی از پارچه‌های الیاف کولار (ساخت شرکت کولان<sup>۱۵</sup> کشور استرالیا) و الیاف پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بالا (ساخت

انجام یافته در دهه‌های اخیر نقش و اهمیت این امر را در این زمینه به وضوح روشن ساخته است [1-3]. مزیت استفاده از کامپوزیت‌ها در طراحی‌های مرتبط با کاربردهای ضربه‌ای در وهله نخست، سبک بودن در مقایسه با سایر مواد مثل فولاد و در درجه دوم سازگاری بهتر و مناسب‌تر و همچنین راحتی کاربرد آنها در مقایسه با فلزات می‌باشد [4].

برای بهبود خواصی چون دانسیته، مدول الاستیسیته، چقرمگی و مقاومت در برابر خستگی و ضربه می‌توان از کامپوزیت‌های هیبریدی استفاده کرد. کامپوزیت‌های هیبریدی مواد چندکاره‌ای هستند که شامل دو یا چند جزء تقویت‌کننده هستند که اجزا از نظر شیمیایی و در مقیاس ماکرو از همدیگر متمایز هستند. این مواد دارای فصل مشترک‌های جداگانه هستند. کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف هیبریدی در مقایسه با کامپوزیت‌هایی که با یک نوع از الیاف تقویت شده‌اند، خواص مکانیکی، حرارتی و ترشوندگی بهتری را از خود نشان می‌دهند. [6,5].

با معرفی الیاف کولار<sup>۱</sup> در سال 1972 توسط شرکت آمریکایی دوپونت<sup>۲</sup> تحول عظیمی در صنایع کامپوزیتی صورت گرفت. این الیاف با قابلیت‌های بالا و خواص بی‌نظیری هم‌چون دانسیته کم، استحکام کششی و مدول بالا، چقرمگی خوب و مقاوم به ضربه و با سفتی حدود نصف الیاف کربن هنوز هم به عنوان یکی از مهم‌ترین تقویت‌کننده‌ها در کاربردهای کامپوزیتی به شمار می‌رود [8,7]. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بالا<sup>۳</sup>، چندین مزیت نسبت به کامپوزیت‌های حاوی الیاف کولار دارند. از آن جمله می‌توان به استحکام و مدول بالاتر، قابلیت جذب انرژی، نرمی بالا، مقاومت برش و میرایی بالای ضربه و سبکی این الیاف نسبت به کولار اشاره کرد [9-11].

لازم به ذکر است که وجود نانولوله‌های کربنی<sup>۴</sup> باعث شده تا این مواد گزینه‌ای ایده‌آل برای مقاوم‌سازی پلیمرها و سایر مواد باشند. این مواد می‌توانند برای ساخت کامپوزیت‌ها با خواص بهینه‌تر مورد استفاده قرار گیرند. مطالعه بر روی ظرفیت جذب انرژی نانولوله‌های کربنی تحت اثر برخورد با پرتابه، نشان می‌دهد که می‌توان از نانولوله‌های کربنی به عنوان فاز تقویت‌کننده در مواد کامپوزیتی استفاده کرد تا مقاومت آنها در برابر نفوذ پرتابه بالا رود [12,13]. میشلای<sup>۵</sup> و همکارانش [14] رفتار ضربه سرعت بالا و محافظ الکترومغناطیسی کامپوزیت اپوکسی- الیاف کولار حاوی نانولوله‌های کربنی را بررسی کردند. نتایج بدست آمده نشان داد که این کامپوزیت‌ها به طور موثر می‌توانند برای برنامه‌های کاربردی چند منظوره به کار گرفته شوند. همچنین نانولوله کربنی سختی مکانیکی کامپوزیت را افزایش داده و در نتیجه رفتار موثری در ضربه سرعت بالا از طریق اثرات پخش شده انرژی دارد.

خاتیوود<sup>۶</sup> و همکارانش [15] آزمایش ضربه سرعت بالا روی کامپوزیت‌اپوکسی- الیاف پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا حاوی نانولوله‌های کربنی تک جداره را در مقایسه با کامپوزیت بدون نانو و همچنین ورق‌های آلومینیوم بررسی کردند. نتایج نشان داد که نانو کامپوزیت مذکور در مقایسه با سایر نمونه‌ها از خواص ضربه سرعت بالای بهتری برخوردار است.

<sup>9</sup> Taraghi

<sup>10</sup> Chowdhury

<sup>11</sup> Butola

<sup>12</sup> Bisphenol A

<sup>13</sup> Polyamine hardener

<sup>14</sup> Aditya Birla

<sup>15</sup> Colan

<sup>1</sup> Kevlar

<sup>2</sup> Dupont

<sup>3</sup> Ultra High Molecular Weight Polyethylen

<sup>4</sup> Carbon Nanotubes

<sup>5</sup> Micheli

<sup>6</sup> Khatiwada

<sup>7</sup> Khosravi

<sup>8</sup> Inam

در ادامه، مخلوط حاصل در دستگاه اولتراسونیک (ساخت شرکت فاپن ایران) به مدت 60 min با فرکانس 24 KHz قرار گرفته تا نانوذرات درون اپوکسی بهتر پخش شوند و از تشکیل کلوخه‌ها و حباب‌ها تا حد ممکن جلوگیری شود. انتخاب نوع روش هم زدن و انجام فرآیند التراسونیک براساس روش بهینه شده در کارهای تحقیقاتی قبلی انجام شده است [16]. در طی فرآیند اولتراسونیک، از آنجایی که انرژی زیادی به مخلوط منتقل می‌شود، باعث بالا رفتن قابل توجه دما و تخریب اپوکسی می‌شود، لذا لازم است بشر حاوی مخلوط در طی فرآیند اولتراسونیک، درون ظرف حمام آب و یخ قرار داده شود.

### 2-3- ساخت نمونه

برای تهیه نمونه‌ها چندین مرحله وجود دارد. ابتدا پارچه‌های الیاف کولار (K) و الیاف پلی اتیلن (P) در ابعاد مناسب برش داده شده و آماده شدند. سپس وزن مجموع الیاف کولار و پلی اتیلن توسط ترازو اندازه‌گیری شده و نمونه‌های کامپوزیتی با نسبت وزنی الیاف به رزین 20:80 (مطابق با معادله 1) ساخته شدند. شایان ذکر است که فرآیند تولید الیاف پلی اتیلن به گونه‌ای است که توسط یک رزین فعال‌شونده با گرما در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند، همین امر باعث شده است تا میزان استفاده از رزین اپوکسی کاهش یابد. بعد از به دست آوردن مخلوطی کاملاً یکنواخت از رزین اپوکسی، هاردنر و نانولوله‌های کربنی (با درصد‌های وزنی 0، 0.1، 0.3، 0.5 و 0.9)، عملیات لایه چینی به صورت لایه‌گذاری دستی در حالت K/P/K/P/K/P/K/P انجام پذیرفت (شکل 1). در هر بار یک لایه پارچه درون قالب فلزی قرار گرفته و مخلوط کامپوزیت اپوکسی/نانو لوله کربنی بر روی آن توزیع می‌شود. قبل از شروع فرآیند آغشته-ساز، لازم است در زیر اولین و آخرین لایه پارچه، دو عدد پارچه تفلون نفوذناپذیر قرار داده شود تا از چسبیدن رزین بعد از فرآیند پخت به سطح قالب جلوگیری به عمل آید. بعد از فرآیند لایه‌چینی، نمونه‌ها تحت پرس قرار گرفتند. سپس نمونه‌ها برای حرارت دیدن در داخل آون قرار داده تا پخت شده و بهم چسبند. همچنین جهت مقایسه نتایج، نمونه‌های کامپوزیتی بدون افزودن نانولوله‌های کربنی نیز ساخته شد. به منظور پخت نهایی و دستیابی به حداکثر میزان استحکام در نمونه‌ها، انجام آزمون تست ضربه پس از گذشت 5 روز از مرحله ساخت صورت گرفت.

$$(1) \quad 100 \times \frac{\text{وزن الیاف-وزن کامپوزیت}}{\text{وزن کامپوزیت}} = \text{نسبت رزین به الیاف}$$

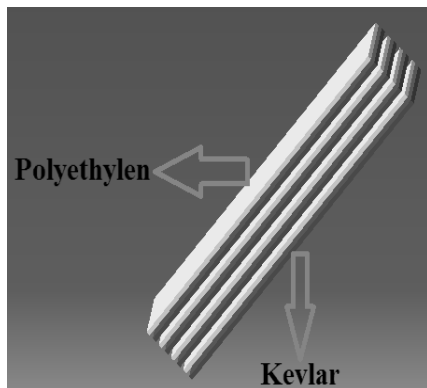


Fig. 1 Layer arrangement P/K/P/K/P/K/P/K  
شکل 1 چیدمان لایه چینی P/K/P/K/P/K/P/K

شرکت داینما<sup>1</sup> (کشور هلند) به عنوان تقویت کننده استفاده شد. در جدول‌های 1، 2، 3 و 4 به ترتیب برخی از مشخصات رزین اپوکسی، هاردنر، الیاف پلی اتیلن و الیاف کولار آورده شده است. نانولوله‌های کربنی حاوی گروه‌های عاملی کربوکسیل<sup>2</sup> (COOH) متعلق به شرکت چپ تیوپ<sup>3</sup> کشور آمریکا نیز به عنوان تقویت کننده فاز نانو استفاده شد. در جدول 5 برخی از مشخصه‌های اصلی نانو لوله کربنی چند جداره بیان شده است.

### جدول 1 مشخصات رزین اپوکسی

Table 1 Specification epoxy resin

زمان کارکرد پس از مخلوط (دقیقه)	رنگ	دانسیته (g/cm <sup>3</sup> )	مقاومت حرارتی (m <sup>2</sup> K/W)
120-1000	بی رنگ	1.17	140

### جدول 2 مشخصات چسب هاردنر

Table 2 Specification hardener adhesive

چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	ویسکوزیته (mpas)	نقطه اشتغال (°C)	محتوای وزن جامد (%)
1.03±0.01	620±100	100<	100

### جدول 3 مشخصات پارچه الیاف پلی اتیلن با وزن مولکولی بالا

Table 3 Specifications of ultra-high molecular weight polyethylene fibers fabric

نام تجاری	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	استحکام کششی (MPa)	نوع بافت
Dyneema sb21	0.97	2600	غیربافتنی

### جدول 4 مشخصات پارچه الیاف کولار

Table 4 Specification of Kevlar fibers fabric

نوع بافت	چگالی سطحی (g/cm <sup>2</sup> )	استحکام کششی (N/25mm)	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )
ساده	122	تار: 2560 پود: 2738	1.44

### جدول 5 مشخصات نانولوله کربنی چند جداره

Table 5 Specification multi-walled carbon nanotubes

مقدار COOH (wt.%)	مساحت سطحی ویژه (m <sup>2</sup> /g)	طول (μm)	قطر خارجی (nm)	قطر داخلی (nm)	درصد خلوص (%)
2	233	10-30	10-20	5-10	>95

### 2-2- نحوه توزیع نانو لوله کربنی در اپوکسی

قبل از اختلاط رزین و هاردنر، باید نانولوله‌های کربنی به خوبی درون اپوکسی توزیع شده و کلوخه‌های موجود در آن‌ها شکسته شود. مقدار مورد نیاز از نانولوله‌ها با توجه به درصد وزنی مورد نظر (0.1، 0.3، 0.5 و 0.9) با ترازوی بسیار دقیق وزن شده، سپس نانولوله‌ها به رزین اضافه شده و مخلوط رزین و نانولوله‌ها به مدت 20 min با سرعت 2000 rpm با همزن مکانیکی دور بالا (مدل SD11-D محصول شرکت فاین تک کره جنوبی) به خوبی هم زده شدند. در طی هم زدن و به منظور کم کردن لزجت رزین و دستیابی به اختلاط بهتر، بشر بر روی گرمکن قرار می‌گیرد تا دمای مخلوط مقداری افزایش یافته و لزجت کاهش یابد.

<sup>3</sup> Cheaptube

<sup>1</sup> Dyneema

<sup>2</sup> Carboxyl

#### 2-4- ساخت فیکسچر

در این تحقیق، جذب انرژی با محاسبه معادله (2) از طریق جذب انرژی قبل از برخورد و جذب انرژی پس از برخورد تعیین می‌شود. همچنین سرعت حد از معادله (3) بدست می‌آید.

$$E_a = \frac{1}{2} m_p V_i^2 - \frac{1}{2} m_p V_r^2 \quad (2)$$

$$V_b = \sqrt{V_i^2 - V_r^2} \quad (3)$$

در روابط (2) و (3)،  $E_a$ ، جذب انرژی کامپوزیت (ژول)،  $m_p$ ، جرم پرتابه (کیلوگرم)،  $V_i$ ، سرعت پرتابه قبل از برخورد (متر بر ثانیه)،  $V_r$ ، سرعت پرتابه پس از نفوذ و هنگام خارج شدن از قطعه (متر بر ثانیه) و  $V_b$ ، سرعت حد (متر بر ثانیه) می‌باشند.

#### 2-7- بررسی ریز ساختاری با FESEM

جهت بررسی ساختار و نحوه قرارگیری الیاف در لایه‌ها و همچنین برای بررسی نوع شکست الیاف بعد از شلیک پرتابه از دستگاه میکروسکوپ روبشی الکترونی گسیل میدانی<sup>1</sup> FESEM مدل MIRA3TESCAN-XMU استفاده شده است.

#### 3- نتایج و بحث

لازم به ذکر است که پیش از بررسی رفتار ضربه نیاز است که مناسب بودن نحوه توزیع نانوذرات در زمینه پلیمری مورد بررسی قرار گیرد. برای دستیابی به این هدف از آنالیز میکروسکوپی FESEM استفاده شد. شکل 4 توزیع نانولوله کربنی در زمینه اپوکسی را نشان می‌دهد. براساس این شکل می‌توان مشاهده کرد که نانولوله‌های کربنی به صورت یکنواخت در زمینه اپوکسی توزیع شده‌اند و پدیده آگلومره شدن مشاهده نمی‌شود. بنابراین می‌توان بیان کرد که روش مورد استفاده برای توزیع نانولوله‌های کربنی و ساخت نمونه کامپوزیتی مناسب می‌باشد.

نتایج آزمایش ضربه سرعت بالا، بر روی نمونه‌های کامپوزیت هیبریدی الیاف کولار- الیاف پلی اتیلن با و بدون نانولوله کربنی به صورت خلاصه در جدول 6 و نمودارهای آن در شکل‌های 5 و 6 ارائه شده است.

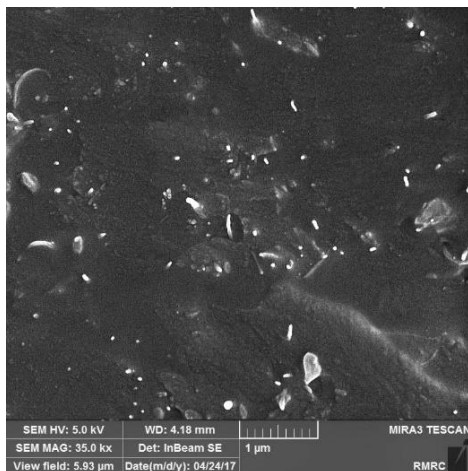


Fig. 4 Carbon nanotubes dispersion in epoxy matrix

شکل 4 توزیع نانولوله‌های کربنی در زمینه اپوکسی

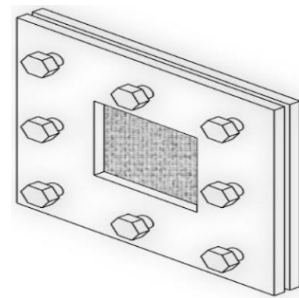


Fig. 2 Used fixture

شکل 2 فیکسچر مورد استفاده



Fig. 3 Sharp projectile

شکل 3 پرتابه نوک تیز

#### 2-6- آزمایش ضربه سرعت بالا

نمونه‌های چندلایه کامپوزیتی هیبریدی تولید شده، توسط دستگاه تست ضربه سرعت بالا (مدل M211) موجود در آزمایشگاه مرکز عالی تحقیقات مواد و سازه‌های پیشرفته و هوشمند دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی تحت ضربه قرار گرفتند. در این نوع دستگاه‌ها، پرتابه با جرم کم با استفاده از هوای فشرده در لوله تفنگ به جلو رانده می‌شود. هوای فشرده با فشار 3 bar به درون مخزن فرستاده شده و به وسیله تنظیم کننده فشار به فشار کنترل شده می‌رسد. با تغییر فشار هوا سرعت اولیه پرتابه 84 m/s تنظیم می‌شود. فشار به کمک یک شیر سلونوئیدی یا ساز و کارهای دیگر آزاد می‌شود. پرتابه از درون لوله تفنگ گذشته و در آستانه خروج از روی یک دستگاه سرعت‌سنج عبور می‌کند. بعد از برخورد پرتابه به هدف و در صورت عبور از آن، سرعت خروجی پرتابه، به دلیل امکان انحراف پرتابه، توسط دو ردیف لیزر که با فاصله از هم قرار دارند، اندازه‌گیری می‌شود.

<sup>1</sup> Field emission scanning electron microscope

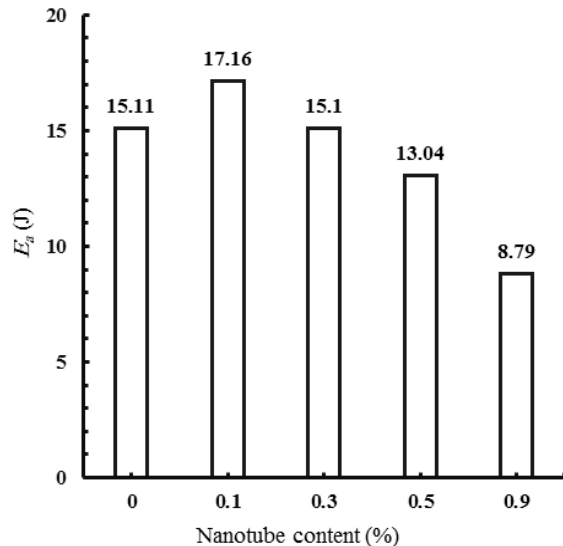


Fig. 5 Energy absorption after projectile encounters with hybrid composite specimens

شکل 5 جذب انرژی پس از برخورد پرتابه به نمونه‌های کامپوزیت هیبریدی

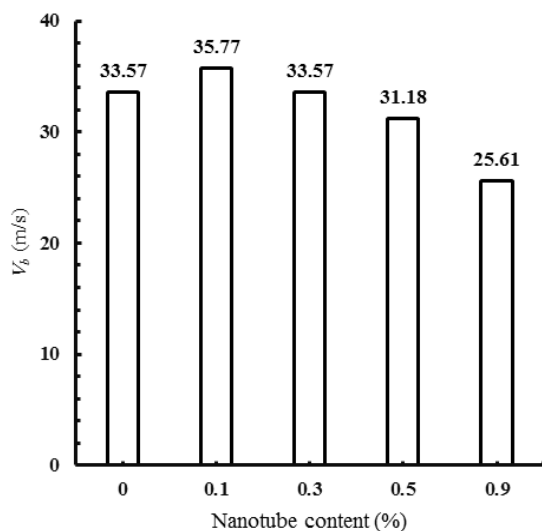


Fig. 6 Limit velocity after projectile encounters with hybrid composite specimens

شکل 6 سرعت حد پس از برخورد پرتابه به نمونه‌های کامپوزیت هیبریدی

### 3-2- ارزیابی آسیب

مکانیزم‌های اصلی جذب انرژی به علت نفوذ پرتابه نوک تیز به کامپوزیت هیبریدی شامل شکست الیاف، لایه‌لایه شدگی، ترک خوردگی زمینه و سوراخ شدن هستند. لایه‌لایه شدگی یکی از مهم‌ترین آسیب‌های کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف است که ناشی از تنش برشی بین لایه‌های است. این پدیده در ساختارهای کامپوزیت منجر به کاهش شدید ظرفیت باری آنها می‌شود. ترک خوردگی زمینه در حالت شکست اول در مواد کامپوزیتی به وسیله ترک خوردگی در امتداد الیاف به وجود می‌آید. سوراخ شدن کامپوزیت‌های هیبریدی تحت ضربه سرعت بالا، زمانی رخ می‌دهد که شکست الیاف به دلیل نفوذ پرتابه به یک مقدار بحرانی می‌رسد. به عنوان یک نتیجه، پرتابه پس از برخورد به هدف، به داخل آن نفوذ می‌کند [21].

جدول 6 نتایج آزمایش ضربه سرعت بالا

Table 6 Results of high velocity impact test

تخریب نمونه	سرعت حد (m/s)	جذب انرژی (J)	سرعت خروجی (m/s)	سرعت اولیه (m/s)	درصد وزنی نانو لوله کربنی
12.1	33.57	15.11	77	84	0
47.3	35.77	17.16	76	84	0.1
15.8	33.57	15.11	77	84	0.3
9.5	31.18	13.04	78	84	0.5
8.3	25.61	8.79	80	84	0.9

K: کولار، P: پلی اتیلن

### 3-1- جذب انرژی و سرعت حد

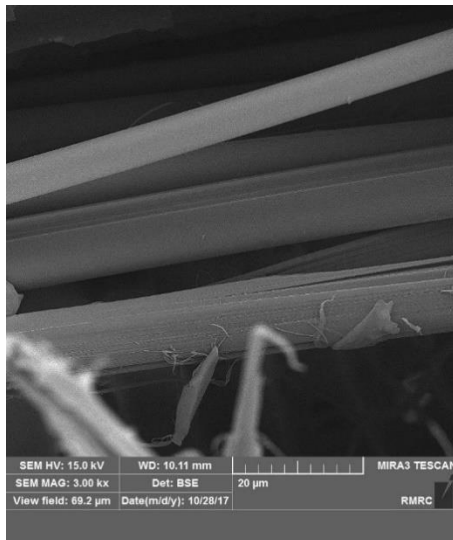
شکل 5، نمودار جذب انرژی نمونه‌های کامپوزیت هیبریدی را نشان می‌دهد. نمونه 0.1 درصد نانولوله کربنی نسبت به نمونه بدون نانو، 13.56 درصد افزایش در جذب انرژی را نشان می‌دهد، در حالی که در درصد نانو 0.3 نسبت به نمونه بدون نانو این افزایش برابر صفر می‌شود. درصدهای وزنی 0.5 و 0.9 نیز به ترتیب 13.69 و 41.28 درصد کاهش را نسبت به نمونه کامپوزیتی بدون نانو ارائه می‌دهند.

شکل 6، سرعت حد نمونه‌های آزمایش شده بعد از شلیک پرتابه در درصدهای مختلف نانولوله کربنی چند جداره را نشان می‌دهد. نمونه با 0.1 درصد نانو نسبت به نمونه بدون نانو 6.55 درصد افزایش سرعت حد و نمونه با درصدهای 0.5 و 0.9 نانو حدود 7.11 و 23.71 درصد کاهش سرعت حد نسبت به نمونه بدون نانو دارند.

در ضربه سرعت بالا، خاصیت مواد کامپوزیتی به پارامترهای مختلفی هم چون چقرمگی شکست، سرعت اولیه، جرم و نوک پرتابه، مدول، استحکام کششی، کرنش شکست الیاف و زمینه، رابطه بین الیاف و زمینه و لایه لایه شدگی کامپوزیت بستگی دارد. یکی از فاکتورهای مهم برای بهبود خاصیت ضربه سرعت بالا، افزایش انتقال تنش بین زمینه پلیمر و نانولوله کربنی چند جداره است [21].

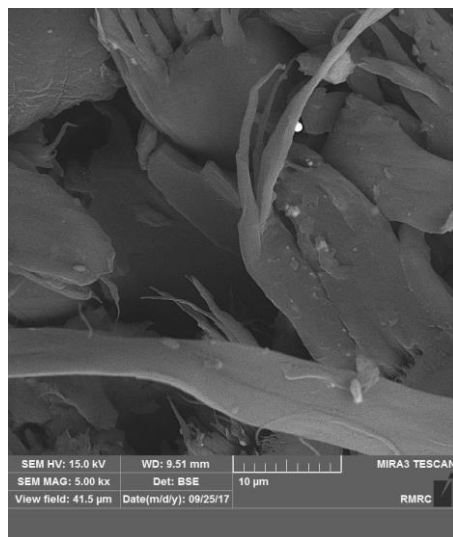
در کامپوزیت‌های هیبریدی، فصل مشترک بین الیاف و زمینه اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا بار اعمال شده از طریق فصل مشترک انتقال داده می‌شود. بنابراین رفتار مکانیکی مواد کامپوزیتی تحت تاثیر فصل مشترک قرار دارد. فصل مشترک قوی بین الیاف و زمینه موجب بهبود استحکام کامپوزیت می‌شود. افزودن نانولوله کربنی چند جداره در داخل رزین و توزیع مناسب آن در زمینه، منجر به افزایش چسبندگی بین زمینه و الیاف شده و در نتیجه فصل مشترک بین الیاف و زمینه بهبود می‌یابد. از آنجا که انتقال تنش از طریق فصل مشترک صورت می‌گیرد، بهبود خواص فصل مشترک منجر به انتقال تنش موثری بین الیاف و زمینه می‌گردد. در نتیجه نانولوله کربنی به واسطه مکانیزم پل‌زنی و فصل مشترک زمینه-الیاف، استحکام و چقرمگی شکست کامپوزیت‌های هیبریدی را افزایش می‌دهد [19-21].

به عبارتی دیگر، نمونه با 0.1 درصد وزنی نانو به دلیل اتصال قوی بین الیاف و زمینه و توزیع مناسب نانولوله کربنی تاثیر بیشتری بر خواص مکانیکی کامپوزیت هیبریدی داشته است. در نتیجه نمونه 0.1 درصد نانو در مقابل شلیک پرتابه، مقاومت و استحکام بیشتری نشان داده و باعث جذب انرژی بیشتری نسبت به نمونه‌هایی با درصد نانوهای مختلف شده است.



**Fig. 8** Flat surface of Kevlar fibers in composite specimen without carbon nanotube

شکل 8 سطح صاف الیاف کولار در نمونه کامپوزیتی بدون نانو لوله کربنی



**Fig. 9** Flat surface of polyethylene fibers in composite specimen without carbon nanotube

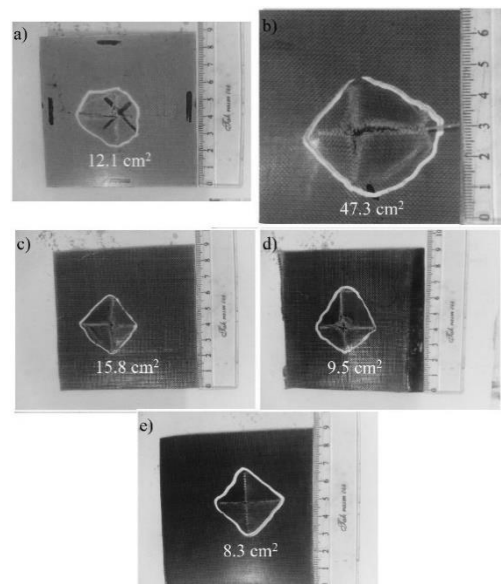
شکل 9 سطح صاف الیاف پلی اتیلن در نمونه کامپوزیتی بدون نانولوله کربنی

شکل 10، سطح برشی الیاف در نمونه حاوی 0.1 درصد وزنی نانولوله کربنی را نشان می‌دهد. وجود باندهای برشی به دلیل وجود نانولوله کربنی در زمینه است. به دلیل وجود باندهای برشی در کامپوزیت هیبریدی حاوی 0.1 درصد نانو پس از برخورد پرتابه، سرعت آن کمتر شده و مقداری کمی از انرژی آن گرفته می‌شود و یک مدخل در میان کامپوزیت برای ورود ایجاد می‌کند. در این حالت، لایه لایه شدگی اتفاق می‌افتد که نقش مهمی در جذب انرژی پرتابه بازی می‌کند، زمینه نیز نقش مهمی در میرایی ضربه و چسبندگی بین لایه‌های دارد.

شکل 11، تشکیل آگلومره متشکل از نانولوله کربنی در زمینه حاوی 0.9 درصد وزنی نانولوله کربنی را نشان می‌دهد. وجود برخی آگلومره‌های نانولوله در زمینه، عامل اصلی افت برخی از خواص مکانیکی نمونه‌های حاوی 0.9 درصد تقویت کننده فاز نانو نسبت به درصد‌های دیگر می‌باشد. وجود آگلومره باعث کاهش لایه‌لایه شدگی و میزان تخریب کمتری شده و جذب انرژی کمتر در نمونه حاوی 0.9 درصد وزنی نانولوله کربنی را به همراه دارد.

شکل 7، ناحیه آسیب نمونه‌های کامپوزیتی مختلف پس از آزمایش ضربه سرعت بالا را نشان می‌دهد. در شکل 7b در نمونه با درصد نانوی 0.1، به دلیل جذب انرژی بیشتر، لایه لایه شدگی بیشتر شده [22] و در نتیجه ناحیه آسیب به  $47.3 \text{ cm}^2$  رسیده است. در شکل 7c، برای نمونه با درصد نانو 0.3، ناحیه آسیب کم شده و به  $15.8 \text{ cm}^2$  کاهش یافته است. در این حالت، اثر متقابل بین نانو و زمینه باعث جلوگیری از توسعه ناحیه آسیب شده است [23، 24]. در شکل 7d، برای درصد نانو 0.5، افزودن نانولوله‌ها بر اندازه آسیب تاثیر گذاشته و باعث کاهش سطح ناحیه آسیب تا  $9.5 \text{ cm}^2$  شده است. در شکل 7e نیز برای درصد نانو 0.9، به دلیل توزیع نامطلوب نانو در اپوکسی، کلوخه ایجاد شده [25] و ناحیه آسیب به  $8.3 \text{ cm}^2$  رسیده است.

یکی دیگر از عوامل مکانیزم شکست علاوه بر کلوخه شدن، گسترش حباب است. گسترش حباب از نقاط خلاء و جدایی ذرات نانو از زمینه شروع می‌شود که با افزایش درصد نانو زمینه برای گسترش حباب ایجاد شده است. مکانیزم گسترش حباب در اطراف نانو می‌تواند به خودی خود منجر به کاهش ناحیه آسیب شود، زیرا حباب به عنوان یک نقص عمل کرده و باعث افزایش سرعت جوانه‌زنی و رشد ترک می‌شود [26].



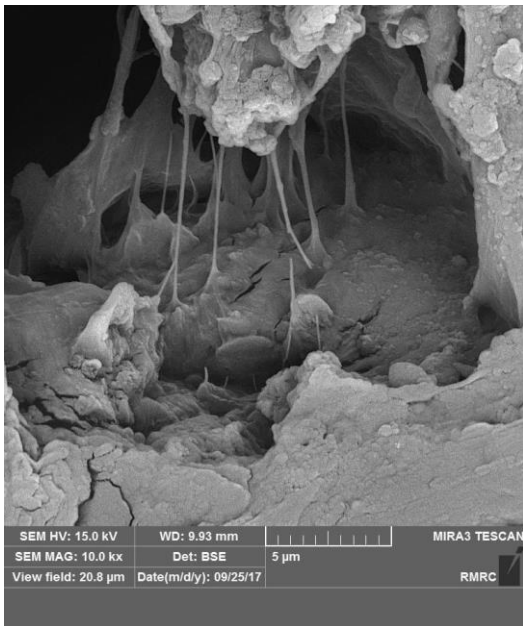
**Fig. 7** Damage area in composites with different carbon nanotube: a) 0 wt.%, b) 0.1 wt.%, c) 0.3 wt.%, d) 0.5 wt.%, e) 0.9 wt.%

شکل 7 ناحیه آسیب در کامپوزیت‌ها با مقادیر مختلف نانولوله کربنی: (a) 0 wt.%, (b) 0.1 wt.%, (c) 0.3 wt.%, (d) 0.5 wt.%, (e) 0.9 wt.%

### 3-3- سطوح شکست

جهت بررسی سطح شکست نمونه‌های کامپوزیتی و تشخیص اثر نانو لوله کربنی بر رفتار ضربه سرعت بالای کامپوزیت‌های الیافی متشکل از کولار و پلی اتیلن، مطالعات میکروسکوپی با استفاده از میکروسکوپ FESEM صورت گرفت که تصاویر آن در شکل‌های 8 تا 12 آورده شده است.

در شکل‌های 8 و 9، سطح شکست الیاف کولار و پلی اتیلن بدون افزودن نانولوله کربنی نشان داده شده است. شکل‌های 8 و 9 دارای سطوحی صاف و تمیز هستند. نبود زمینه بر روی سطوح الیاف نشان دهنده چسبندگی ضعیف‌تر الیاف می‌باشد. نتیجه‌ای که می‌توان گرفت، جدایش فصل مشترک بین الیاف و زمینه و جذب انرژی کمتر در این نوع کامپوزیت‌ها هنگام اصابت پرتابه خواهد بود.



**Fig. 12** Fracture surface crack bridging mechanism in composite containing 0.1 wt.% carbon nanotube

شکل 12 سطح شکست مکانیزم پل زنی ترک در نمونه کامپوزیتی حاوی 0.1 درصد وزنی نانولوله کربنی

#### 4- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، اثر افزودن نانولوله کربنی بر رفتار ضربه سرعت بالای کامپوزیت‌های هیبریدی الیافی زمینه اپوکسی به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. کامپوزیت هیبریدی متشکل از الیاف کولار و الیاف پلی اتیلن با درصدهای وزنی 0، 0.1، 0.3، 0.5 و 0.9 نانو لوله کربنی چند جداره ساخته شد و با پرتابه نوک تیز تحت ضربه قرار گرفتند. نتایج حاصل از این تحقیق را می توان به صورت خلاصه در موارد زیر بیان کرد:

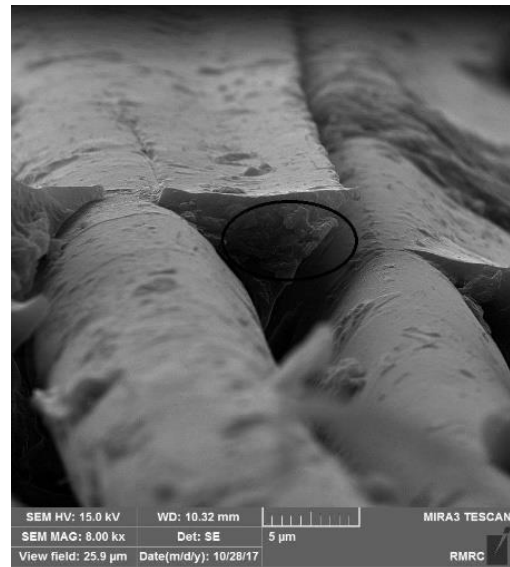
- بیشترین میزان اثر بخشی نانولوله کربنی در کامپوزیت‌های هیبریدی حاوی 0.1 درصد وزنی حاصل شد. به طوری که میزان جذب انرژی، 13.56 درصد و سرعت حد، 6.55 درصد افزایش را نسبت به کامپوزیت مشابه فاقد نانو نشان می دهند.

- با افزودن نانولوله کربنی در درصد وزنی 0.1 در داخل اپوکسی، چسبندگی بین زمینه و الیاف تقویت کننده بهبود یافته است. به همین دلیل انتقال تنش موثری بین الیاف و زمینه ایجاد شده است. در نتیجه نانو لوله کربنی به واسطه مکانیزم پل زنی و رابط زمینه- الیاف، استحکام و چقرمگی شکست کامپوزیت‌های هیبریدی را افزایش می دهد.

- وجود باندهای برشی در کامپوزیت هیبریدی حاوی 0.1 درصد نانولوله کربنی پس از برخورد پرتابه سبب می شود که سرعت پرتابه کمتر شده و مقداری کمی از انرژی آن گرفته شود و یک مدخل در میان کامپوزیت برای ورود ایجاد کند. در این حالت لایه لایه شدگی اتفاق می افتد که نقش مهمی در جذب انرژی پرتابه بازی می کند، زمینه نیز نقش مهمی در میرایی ضربه و چسبندگی بین لایه‌ای دارد.

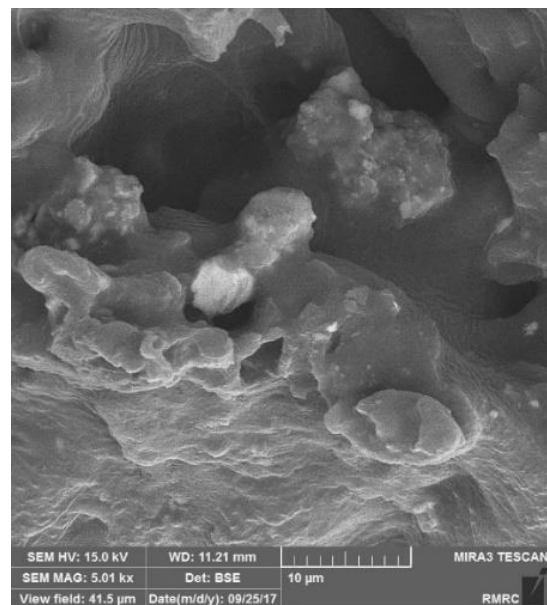
#### 5- مراجع

- [1] Del Rosso, S. Iannucci, L. and Curtis, P. T., "On the Ballistic Impact Response of Microbraid Reinforced Polymer Composites," Composite Structures, Vol. 137, pp. 70-84, 2016.



**Fig. 10** Shear bond formed in composite specimen containing 0.1 wt.% carbon nanotube

شکل 10 باند برشی ایجاد شده در نمونه کامپوزیتی حاوی 0.1 درصد وزنی نانو لوله کربنی



**Fig. 11** Formation of an agglomerate composed of carbon nanotube in composite matrix containing 0.9 wt.% carbon nanotube

شکل 11 تشکیل آگلومره متشکل از نانولوله کربنی در زمینه کامپوزیت حاوی 0.9 درصد وزنی نانولوله کربنی

شکل 12، سطح شکست مکانیزم پل زنی ترک در درصد وزنی 0.1 نانولوله کربنی را نشان می دهد. وجود نانولوله‌های کربنی بیرون زده شده از سطح زمینه یا شکسته شده نشان دهنده مکانیزم پل زنی ترک توسط نانولوله‌ها می باشد. با ایجاد پدیده پل زنی ترک و بیرون کشیدگی نانولوله کربنی، نانو ماده به عنوان عامل تقویت و چسبندگی بهتر بین زمینه و الیاف باعث جذب انرژی بیشتر در کامپوزیت می شود. همچنین سطح شکست نانولوله کربنی در نمونه کامپوزیت هیبریدی باعث اتصال زمینه به الیاف شده و بهبود چسبندگی بین زمینه و الیاف را به همراه دارد. وجود اتصال قوی بین الیاف و زمینه سبب لایه لایه شدگی شده و در نتیجه سبب جذب انرژی بیشتری در نمونه کامپوزیت هیبریدی می شود.

- [15] Khatiwada, S. Armada, C. A. and Barrera, E. V., "Hypervelocity Impact Experiments on Epoxy/Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Fiber Composites Reinforced with Single-Walled Carbon Nanotubes," *Procedia Engineering*, Vol.58, pp. 4 – 10, 2013.
- [16] Khosravi, H. Eslami-Farsani, R. and Ebrahimnezhad-Khaljiri, H., "An Experimental Study on Mechanical Properties of Epoxy/Basalt/Carbon Nanotube Composites under Tensile and Flexural Loadings," In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 2, pp. 187-194, 2016.
- [17] Inam, F. Wong, D. W. Y. Kuwata, M. and Peijs, T., "Multiscale Hybrid/Micro-Nanocomposites Based on Carbon Nanotubes and Carbon Fibers" *Journal of Nanomaterials*, Vol. 2010, pp. 1-12, 2010.
- [18] Taraghi, I. Fereidoon, A. and Taheri-Behrooz, F., "Low-Velocity Impact Response of Woven Kevlar/Epoxy Laminated Composites Reinforced with Multi-Walled Carbon Nanotubes at Ambient and low Temperatures," *Materials and Design*, Vol. 53, pp. 152–158, 2014.
- [19] Chowdhury, S. C. Sockalingam, S. and Gillespie Jr, J. W., "Molecular Dynamics Modeling of the Effect of Axial and Transverse Compression on the Residual Tensile Properties of Ballistic Fiber," *Fibers*, Vol. 5, No. 1, 7, 2017.
- [20] Butola, B. S. Majumdar, A. Jain, A. and Kaur, G., "Multilayered Flexible Uni-Polymer and Hybrid Composites," *Fibers and Polymers*, Vol. 18, No. 4, pp. 786-794, 2017.
- [21] Eslami-Farsani, R. and Shahrabi-Farahani, A., "Improvement of High-velocity Impact Properties of Anisogrid Stiffened Composites by Multi-walled Carbon Nanotubes" *Fibers and Polymers*, Vol. 18, No. 5, pp. 965-970, 2017.
- [22] Soliman, M. E. Sheyka M. P. and Taha, M. R., "Low-Velocity Impact of Thin Woven Carbon Fabric Composites Incorporating Multi-walled Carbon Nanotubes" *International Journal of Impact Engineering*, vol.47, pp. 39-47, 2012.
- [23] Ibekwe, S. I. Mensah, P. F. Li, G. Pang, S.-S. and Stubblefield, M. A., "Impact and Post Impact Response of Laminated Beams at Low Temperatures," *Composite Structures*, Vol. 79, pp. 12-17, 2007.
- [24] Sharma, S. Pathak, A. Singh, V. N. Teotia, S. Dhakate, S. R. and Singh, B. P., "Excellent Mechanical Properties of Long Length Multiwalled Carbon Nanotube Bridged Kevlar Fabric," *Carbon*, Vol. 137, pp. 104-117, 2018.
- [25] Xu, P. Yu, Y. Liu, D. He, M. Li, G. and Yang, X., "Enhanced Interfacial and Mechanical Properties of High-Modulus Carbon Fiber Composites: Establishing Modulus Intermediate Layer Between Fiber and Matrix Based on Tailored-Modulus Epoxy" *Composites Science and Technology*, Vol. 163, pp. 26-33, 2018.
- [26] Yue, L. Pircheraghi, G. Monemian, S. A. and Manas-Zloczower, I., "Epoxy Composites with Carbon Nanotubes and Graphene Nanoplatelets – Dispersion and Synergy Effects" *Carbon*, Vol. 78, pp. 268-278, 2014.
- [2] Shokrieh, M. M. and Omid, J. M., "The Impact Resistance of fiber-Reinforced Polymer Composites," In Persian, *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, Vol. 24, No. 4, pp. 255-277, 2014.
- [3] Mehrabani-Yeganeh, E. Liaghat G. H. and Pol, M. H., "Experimental Investigation of Cylindrical Projectiles Nose Shape Effects on High Velocity Perforation of Woven Polymer Composite," In Persian, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 99, No. 9, pp. 9-99, 2014.
- [4] Arjangpay, A. Darvizeh, A. Yarmohammad-Tooski, M. and Ansari, R., "Modeling Damage Evolution of Composite Laminates Under Low Velocity off-Center Impact," In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 3, pp. 243-252, 2016.
- [5] Sathishkumar, T. P. Navaneethakrishnan, P. Shankar, S. Rajasekar, R. and Rajini. N., "Characterization of Natural Fiber and Composites – A Review," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 32, No. 19, pp. 1446–1465, 2013.
- [6] Ebrahimnezhad Khaljiri, H. Eslami Farsani, R. khorsand, H. and Abbas Banaie, K., "Hybridization Effect of Fibers Reinforcement on Tensile Properties of Epoxy Composites," In Persian, *Journal of Science and Technology of Composite*, Vol. 1, No. 2, pp. 21-28, 2015.
- [7] Pereira, J. M. and Revilock, D.M., "Ballistic Impact Response of Kevlar 49 and Zylon under Conditions Representing Jet Engine Fan Containment," *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 22, No. 3, pp. 240-248, 2009.
- [8] Tham, C.Y. Tan, V. B. C. and Lee, H.P., "Ballistic Impact of a Kevlar Helmet: Experiment and Simulations," *Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, No. 5, pp. 304-318, 2008.
- [9] Chen, X., "Advanced Fibrous Composite Materials for Ballistic Protection," Woodhead Publishing, Cambridge, pp. 71–107, 2016.
- [10] Nguyen, L. H. Ryan, R. Cimpoeru, S. J. Mouritz, A. P. and Orifici, A. D., "The Effect of Target Thickness on the Ballistic Performance of Ultra High Molecular Weight Polyethylene Composite," *International Journal of Impact Engineering*, Vol.75, pp. 174–83, 2015.
- [11] Hazzad, M. K. Hallett, S. Curtis, P. T. Iannucci, L. and Trask, R. S., "Effect of Fibre Orientation on the Low Velocity Impact Response of Thin Dyneema Composite Laminates," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 100, pp. 35-45, 2017.
- [12] Esbati, A. H. and Irani, S., "Multiscale Modeling of Fracture in Polymer Nanocomposite Reinforced by Intact and Functionalized CNTs," In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 1, pp. 35-46, 2017.
- [13] Laurenzi, L. Pastore, R. Giannini, G. and Marchetti, M., "Experimental Study of Impact Resistance in Multi-Walled Carbon Nanotube Reinforced Epoxy," *Composite Structures*, Vol. 99, pp. 62–68, 2013.
- [14] Micheli, D. Vricella, A. Pastore, R. Delfini, A. Giusti, A. Albano, M. Marchetti, M. Moglie, F. and Primiani, V. M., "Ballistic and Electromagnetic Shielding Behaviour of Multifunctional Kevlar Fiber Reinforced Epoxy Composites modified by carbon nanotubes," *Carbon*, Vol. 104, pp. 141–156, 2016.