



## Experimental Study on the Effect of Adding Multi-walled Carbon Nanotubes on the Ballistic Limit of Fibers Metal Laminates

Kamran Rahmani<sup>1</sup>, Majid Alitavoli<sup>2\*</sup>, Abolfazl Darvizeh<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

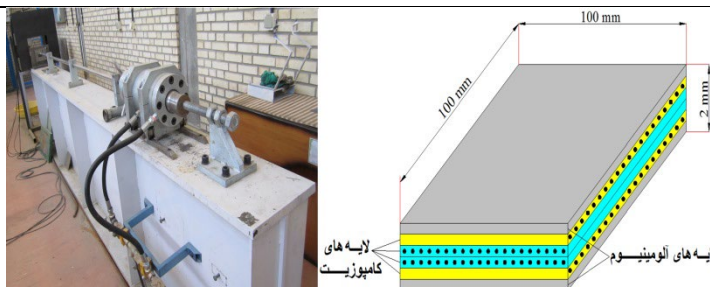
<sup>2</sup> Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

<sup>3</sup> Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

### HIGHLIGHTS

- Investigating the effect of carbon nanotubes in increasing the strength of fiber-metal laminates.
- Increasing the ballistic limit in samples with carbon nanotubes.
- Agglomeration of carbon nanotubes caused a reduction in the mechanical properties

### GRAPHICAL ABSTRACT



### ARTICLE INFO

#### Article history:

Article Type: Research paper

Received: 25 February 2023

Received in revised form: 19 March 2023

Accepted: 3 May 2023

Available online: 7 May 2023

\*Correspondence: tavoli@guilan.ac.ir

#### How to cite this article:

K. Rahmani, M. Alitavoli, A. Darvizeh. Experimental study on the effect of adding multi-walled carbon nanotubes on the ballistic limit of fibers metal laminates. Journal of Aerospace Mechanics. 2023; 19(4):27-39.

#### Keywords:

Carbon nanotubes  
Ballistic limit  
Fibers metal laminates  
Agglomeration

### ABSTRACT

In this paper, the effect of multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) on the ballistic limit of fibers metal laminates (FML) Experimentally investigated. For this purpose, the MWCNTs were added with weight percentages of 0.2, 0.4, and 0.6 to pure epoxy resin and homogenized by mechanical and ultrasonic homogenizers. Then the FMLs were fabricated by fiber glass, 2024-T3 aluminum alloy sheets, pure epoxy resin, and modified resin with MWCNTs using a hand lay-up process. In the end, Ballistic tests on the samples were conducted by using a conical nose projectile. The experimental results show that the ballistic limit of FMLs is increased by adding MWCNTs. Also highest in this increase was observed in samples containing 0.4 weight percentages of MWCNTs, but in the 0.6 weight percentage, agglomeration of nanoparticles caused a reduction in the mechanical properties. The microstructural investigations using Electron microscopy show that the addition of MWCNTs improves the interfacial adhesion between the epoxy matrix and the reinforcing fibers.



## بررسی تجربی تأثیر افزودن نانولوله‌های کربنی چند جداره بر سرعت حد بالستیک چندلایه‌های الیافی- فلزی

کامران رحمانی<sup>۱</sup>، مجید علی طاوولی<sup>۲\*</sup>، ابوالفضل درویشه<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

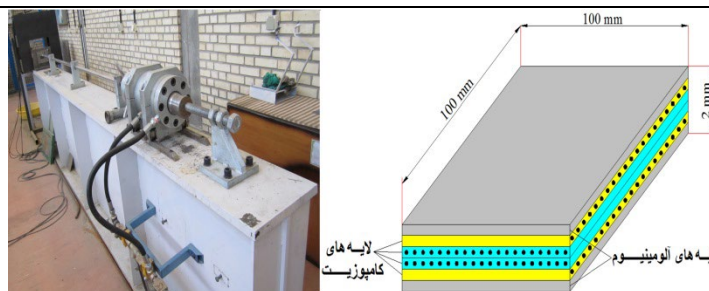
<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

<sup>۳</sup> استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

### برجسته‌ها

- تأثیر نانولوله‌های کربنی در افزایش استحکام چندلایه‌های الیافی- فلزی
- افزایش سرعت حد بالستیک در نمونه‌های دارای نانولوله کربنی
- کلوخه شدن نانولوله‌های کربنی و تأثیر منفی آن‌ها بر روی استحکام

### چکیده گرافیکی



### مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۶

بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۲۸

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۳

ارائه برخط: ۱۴۰۲/۰۲/۱۷

\*نویسنده مسئول:

tavoli@guilan.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

نانولوله کربنی

سرعت حد بالستیک

چندلایه‌های الیافی- فلزی

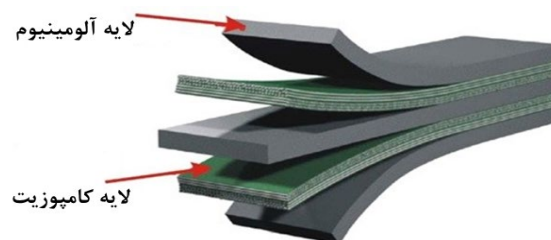
کلوخه شدن نانو ذرات

### چکیده

در این تحقیق تأثیر افزودن نانولوله‌های کربنی چند جداره بر روی رفتار بالستیکی چندلایه‌های الیافی- فلزی به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. به همین منظور نانولوله‌های کربنی با درصدهای وزنی ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ به رزین اپوکسی خالص افزوده شده و توسط همزن‌های مکانیکی و مافوق صوت (اولتراسونیک) همگن‌سازی گردیدند. سپس چندلایه‌های الیافی- فلزی با استفاده از الیاف شیشه، ورق آلومینیومی 2024-T3 و رزین اپوکسی خالص و هیبرید شده با نانولوله‌های کربنی با روش لایه چینی دستی ساخته شدند. در نهایت نمونه‌های آماده شده با استفاده از پرتابه استوانه‌ای سر مخروطی تحت آزمایش ضربه بالستیک قرار گرفتند. نتایج حاصل نشان داد که افزودن نانولوله‌های کربنی تأثیر مستقیمی بر افزایش سرعت حد بالستیک دارد که بیشترین مقدار آن با درصد وزنی ۰/۴ حاصل گردید، ولی در ۰/۶ درصد وزنی به دلیل کلوخه شدن نانو ذرات، عملکرد مکانیکی افت پیدا کرد. در نهایت مطالعات ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی انجام گردید که نتایج حاصل بهبود خواص چسبندگی در فصل مشترک بین الیاف تقویت کننده و زمینه پلیمری را در نمونه‌های دارای نانولوله کربنی نشان داد.

## ۱- مقدمه

در دهه هفتاد میلادی و در دانشگاه صنعتی دلفت هلند ایده استفاده از ورقه‌های آلومینیوم و لایه‌های کامپوزیتی در قالب یک ماده مرکب واحد برای غلبه بر معایب این دو ماده (مقاومت خستگی پایین آلومینیوم و مقاومت ضربه‌ای ضعیف کامپوزیت) مطرح شد. در نهایت و در آغاز دهه هشتاد میلادی، چندلایه‌های الیافی-فلزی تشکیل شده از لایه‌های متناوب آلومینیوم و کامپوزیت به‌عنوان دسته جدیدی از مواد کامپوزیتی هیبریدی معرفی شدند (شکل ۱).



شکل (۱): شکل شماتیک چندلایه‌های الیافی-فلزی [۲]. این چندلایه‌ها با توجه به نوع الیاف مورد استفاده در ساختار کامپوزیت آن‌ها به سه دسته، آرال، گلار و کارال تقسیم می‌شوند. در نوع آرال لایه کامپوزیتی از الیاف آرامید، در نوع گلار لایه کامپوزیتی از الیاف شیشه و در نوع کارال لایه کامپوزیتی از الیاف کربن ساخته شده است. این مواد به سبب دارا بودن نسبت مقاومت به وزن (مقاومت ویژه) بالا و همچنین داشتن تلفیقی از مزایای آلیاژهای آلومینیوم مانند استحکام بالا، مقاومت به ضربه مناسب و چگالی پایین از یک طرف و ویژگی‌های مواد کامپوزیتی مانند چگالی پایین، مقاومت به خوردگی و عمر خستگی بالا از سوی دیگر، در ساخت سازه‌های پیشرفته مانند بدنه هواپیماها، خودروها و سپرهای حفاظتی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱-۵].

پارامتر وزن یکی از مهم‌ترین پارامترها در طراحی و ساخت سازه‌های هوافضایی و زره‌ها و سپرهای نظامی است و طراحان همواره به دنبال ساخت وسایلی هستند که با وجود استحکام بالا دارای وزن و چگالی کمتر و جذب انرژی بیشتری باشند. استفاده از نانو ذرات برای تقویت سازه‌ها روشی است که در عین حالی که در وزن سازه‌ها تغییری ایجاد نمی‌کند باعث بهبود خواص مکانیکی آن‌ها از جمله مدول الاستیسیته، چقرمگی، مقاومت در برابر ضربه و

خستگی نیز می‌گردد. از میان نانو ذرات، نانولوله‌های کربنی چند جداره به دلیل داشتن خواص مکانیکی منحصر به فردی چون مدول الاستیسیته و استحکام کششی بالا به‌عنوان تقویت‌کننده مناسب در ساخت کامپوزیت‌ها مطرح می‌باشند [۹-۶].

تأثیر افزودن نانو ذرات بر رفتار بالستیکی چندلایه‌های الیافی- فلزی توسط محققین زیادی مورد بررسی قرار گرفته است که در زیر به برخی از آن‌ها اشاره می‌گردد.

سیدیعقوبی و همکاران [۱۰] رفتار گلار نوع ۵ را در ضربه سرعت بالا مطالعه کردند. آن‌ها از تفنگ گازی جهت انجام آزمایش‌ها استفاده کردند و به چیدمان بهینه الیاف دست یافتند. همچنین آن‌ها نشان دادند که سرعت حد بالستیک با تغییر ضخامت فلز به صورت یک روند پارابولیک تغییر می‌کند. سینتیکیوآ و همکاران [۱۱] با استفاده از روش‌های عددی به بررسی رفتار ورق‌های الیافی- فلزی تحت بارگذاری ضربه‌ای پرداختند. آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و مدل ماده‌های مختلف و کد نویسی توانستند میزان خرابی را در هنگام برخورد، به صورت عددی مورد تحلیل و بررسی قرار دهند. خسروی و همکاران [۱۲] تأثیر افزودن نانولوله‌های کربنی چند جداره بر رفتار کششی و خمشی کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف بازالت را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها درصدهای مختلف وزنی نانولوله‌های کربنی را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که نمونه‌های حاوی ۰/۳ درصد وزنی بیشترین میزان تأثیر را بر بهبود استحکام خمشی و کششی و جذب انرژی دارند.

ترقی و همکاران [۱۳] پاسخ ضربه سرعت پایین کامپوزیت‌های چندلایه اپوکسی-الیاف کولار با درصدهای وزنی مختلف از نانولوله‌های کربنی چند جداره را در دمای محیط و دمای ۴۰- درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار دادند. نتایج به دست آمده توسط آن‌ها نشان داد که نانولوله کربنی رفتار مقاومت به ضربه را بهبود داده است به طوری که در ۰/۵ درصد وزنی نانولوله کربنی افزایشی در حدود ۳۵ درصد در جذب انرژی را شاهد بودند. خواجه ارزانی و همکاران [۱۴] رفتار مقاومت به ضربه سرعت بالای چندلایه‌های الیافی- فلزی را با تحلیل عددی و تجربی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به منظور افزایش میزان جذب انرژی توسط هدف، از

زارعی و همکاران [۱۹] تأثیر مقدار ضخامت ورق آلومینیوم و شکل سر پرتابه بر سرعت حد بالستیک چندلایه‌های الیافی-فلزی را به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در آزمایش‌های خود از پرتابه‌های سر تخت و سر مخروطی استفاده کردند. نتایج به دست آمده نشان از بالاتر بودن سرعت حد بالستیک پرتابه‌های سر تخت داشت. همچنین کاهش ضخامت ورق آلومینیوم از ۰/۵ به ۰/۳ باعث افزایش انرژی مخصوص نفوذ می‌گردد. اسلامی فارسانی و همکاران [۲۰] تأثیر افزودن نانولوله‌های کربنی چند جداره در درصدهای مختلف وزنی را بر رفتار خمشی کامپوزیت‌های مشبک زمینه پلیمری به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. نتایج به دست آمده نشان دادند که بهترین رفتار خمشی به ازای افزودن ۰/۴ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی حاصل می‌شود.

ژانگ و همکاران [۲۱] تأثیر افزودن نانولوله‌های کربنی بر بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت الیاف کربن-اپوکسی را مورد مطالعه قرار داده و نشان دادند که افزودن ۱ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی به زمینه اپوکسی باعث افزایش ۱۰ درصد استحکام کششی کامپوزیت می‌گردد. شکرپه و همکاران [۲۲] اثر افزودن نانولوله‌های کربنی بر رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های الیاف شیشه-اپوکسی را مورد بررسی قرار دادند. تحقیقات آن‌ها نشان داد که افزودن ۰/۵ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی باعث افزایش ۱۳ درصدی استحکام خمشی کامپوزیت‌ها می‌شود. بشیری‌گودرزی و همکاران [۲۳] تأثیر افزودن نانولوله کربنی و نانوگرافن را به طور جداگانه با درصدهای وزنی ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ در فاز زمینه کامپوزیت متشکل از رزین اپوکسی و الیاف بازالت مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نمونه‌ها را تحت آزمون ضربه شارپی قرار دادند. نتایج به دست آمده حاکی از افزایش میزان انرژی جذب شده در حضور مواد نانو نسبت به نمونه‌های کامپوزیتی بود. همچنین بیشترین میزان انرژی جذب شده در نمونه‌های حاوی ذرات گرافن به میزان ۰/۱ درصد وزنی و در نمونه‌های حاوی نانولوله کربنی به میزان ۰/۳ درصد وزنی بود.

خرمی‌شاد و همکاران [۲۴] تأثیر افزودن نانولوله‌های کربنی چند جداره را بر روی رفتار ضربه سرعت‌بالای چندلایه‌های

یک لایه لاستیکی استفاده کردند. نتایج به دست آمده توسط آن‌ها نشان داد که با اضافه کردن لایه لاستیکی انرژی جنبشی بیشتری جذب شده و سرعت حد بالستیک به طور محسوسی افزایش می‌یابد.

مسعودی و همکاران [۱۵] تأثیر نانو ذرات رسی بر رفتار بالستیکی فلز-مواد مرکب شیشه اپوکسی را به صورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند. نمونه‌های ساخته شده توسط آن‌ها از دو ورق آلومینیومی 2024-T3 و هسته نانو کامپوزیتی الیاف شیشه-اپوکسی-نانورس تشکیل شده بودند. نانورس با درصدهای وزنی ۰، ۴، ۷ و ۱۰ نسبت به زمینه، به اپوکسی اضافه شد. نتایج حاصل از آزمایش آن‌ها نشان داد که میزان افزایش جذب انرژی در ۴ درصد وزنی ناچیز بوده ولی در ۷ و ۱۰ درصد وزنی، قابل توجه می‌باشد. خوانساری و همکاران [۱۶] پاسخ ضربه بالستیک پانل‌های هیبرید آلومینیوم و نانو کامپوزیت ساخته شده از اپوکسی و کولار را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها چهار گروه از پانل‌ها با درصدهای وزنی ۱ و ۱/۵ از نانولوله کربنی را مورد آزمایش قرار دادند. آزمون‌های ضربه بالستیک آن‌ها با استفاده از پرتابه سر مخروطی و با دو سرعت میانگین ۲۲۰ و ۲۷۵ متر بر ثانیه توسط تفنگ گازی انجام شد. نتایج نشان داد از میان چهار نمونه مورد بررسی، پانل حاوی ۱ درصد نانولوله کربنی بیشترین میزان جذب انرژی و مقاومت بالستیکی را دارا است.

چپرین و همکاران [۱۷] به بررسی سرعت حد بالستیک در چندلایه‌های الیافی-فلزی و مقایسه آن با لایه‌های فلزی مجزا، به صورت تجربی و عددی پرداختند. نتایج به دست آمده از آزمایش آن‌ها نشان دهنده برتری چندلایه‌های الیافی-فلزی بود به گونه‌ای که سرعت حد بالستیک و انرژی نفوذ در این چندلایه‌ها به طور محسوسی بیشتر از آلومینیوم بود. قلمی چوبر و همکاران [۱۸] ضربه سرعت‌بالا در ساندویچ پانل‌هایی با پوسته الیافی فلزی و هسته پلی اورتان را مورد بررسی قرار دادند. پوسته نمونه‌های آن‌ها از ترکیب آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ و کامپوزیت الیاف شیشه ساخته شده بود. نتایج حاصل نشان داد که صفحه جلویی نمونه‌ها که پرتابه به آن اصابت می‌کند، بیشترین میزان جذب انرژی را دارد. همچنین افزایش تراکم پلی اورتان، تأثیر محسوسی در جذب انرژی نسبت به سایر پارامترها ندارد.

هانتسمن<sup>۳</sup> سوئیس با نسبت وزنی ۱۰۰ به ۳۸ به‌عنوان ماده زمینه پلیمری برای قسمت کامپوزیتی استفاده شد. واکنش شیمیایی و پخت این رزین بنا به پیشنهاد شرکت سازنده در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت می‌باشد. همچنین از الیاف شیشه تک جهت نوع E با چگالی سطحی ۲۰۰ گرم بر مترمربع ساخت شرکت ای-ام-پی کامپوزیت<sup>۴</sup> کشور چین به‌عنوان تقویت‌کننده استفاده شد و برای ساخت قسمت فلزی نمونه‌ها از ورق آلومینیوم 2024-T3 به ضخامت ۰/۶ میلی‌متر ساخت شرکت آلکوا<sup>۵</sup> آمریکا استفاده شد. همچنین از نانولوله‌های کربنی چند جداره ساخت شرکت یو-اس نانوی<sup>۶</sup> آمریکا نیز به‌عنوان تقویت‌کننده استفاده گردید. خواص این مواد در جداول ۱ تا ۵ آورده شده است.

**جدول (۱):** خواص نانولوله کربنی چند جداره.

مساحت ویژه	طول	قطر خارجی	قطر داخلی	درصد خلوص
(m <sup>2</sup> /gr)	(μm)	(nm)	(nm)	%
۱۱۰	۱۰-۳۰	۲۰-۳۰	۵-۱۰	>۹۵

**جدول (۲):** خواص آلیاژ آلومینیوم 2024-T3 [۱۷].

چگالی	تنش نهایی	مدول الاستیک	تنش تسلیم	ضریب پواسون
(kg/m <sup>3</sup> )	(MPa)	(GPa)	(MPa)	-
۲۷۸۰	۴۸۳	۷۳	۳۴۵	۰/۳۴

**جدول (۳):** خواص رزین اپوکسی.

حالت رنگ	چگالی	ویسکوزیته	نقطه اشتعال
-	(gr/cm <sup>3</sup> )	-	(°C)
زرد مایل روشن	۱/۱۷	۱۰۰۰-۱۵۰۰	>۱۴۰

**جدول (۴):** خواص سخت‌کننده (هاردنر).

حالت رنگ	چگالی	ویسکوزیته	نقطه اشتعال
-	(gr/cm <sup>3</sup> )	-	(°C)
بی رنگ	۰/۹۴	۶۰-۴۰	>۱۱۰

الیافی-فلزی موردبررسی قرار دادند. آزمایش آن‌ها با پرتابه کروی بر روی نمونه‌های با درصدهای وزنی ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد نانولوله‌های کربنی انجام شد. نتایج حاصل نشان داد که بیشترین افزایش میزان جذب انرژی و افزایش سرعت بالستیک در نمونه‌های حاوی ۰/۵ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی رخ می‌دهد. همچنین بررسی‌های میکرو ساختاری حاکی از بهبود چسبندگی بین الیاف و رزین و کاهش چسبندگی بین سطح آلومینیوم و کامپوزیت در حضور نانولوله‌های کربنی بود.

آقامحمدی و همکاران [۲۵] تأثیر افزودن نانولوله‌های کربنی چند جداره را بر رفتار خمشی و بالستیکی چندلایه‌های الیافی-فلزی که از آلیاژ آلومینیوم 2024-T3 و الیاف بازالت ساخته شده بودند را موردبررسی قرار دادند. نتایج به‌دست‌آمده توسط آن‌ها نشان داد که با افزودن نانولوله‌های کربنی مقاومت خمشی چندلایه‌ها افزایش می‌یابد ولی انرژی جذب‌شده و سرعت حد بالستیک کاهش می‌یابد.

با بررسی تحقیقات فوق ملاحظه می‌شود که تأثیر نانولوله‌های کربنی چند جداره بر رفتار بالستیکی گلار نوع ۵ با استفاده از پرتابه سر مخروطی تاکنون بررسی نگردیده است، لذا در راستای تحقیقات گذشته و گسترش آن‌ها، این موضوع در اینجا بررسی می‌گردد. در این تحقیق رفتار بالستیکی چندلایه‌های الیافی-فلزی هیبرید شده با نانولوله‌های کربنی موردبررسی قرار می‌گیرد. بدین‌صورت که ابتدا رزین موردنیاز برای ساخت چندلایه‌های الیافی-فلزی با استفاده از نانولوله‌های کربنی فرآوری گردیده و قطعات موردنیاز ساخته می‌شوند. سپس نمونه‌های ساخته شده تحت آزمون ضربه بالستیک قرار می‌گیرند و درنهایت جهت بررسی و تحلیل مکانیسم شکست آن‌ها از آنالیز ماکروسکوپی و میکروسکوپی استفاده می‌گردد.

## ۲- بخش تجربی

### ۲-۱- مواد اولیه

در تحقیق حاضر از رزین اپوکسی دوجزئی آرالدیت ال-وای ۱۵۰۵۲ همراه با هاردنر آرادور ۲۵۰۵۲ ساخت شرکت

<sup>1</sup> Araldite LY 5052 Resin

<sup>2</sup> Aradur 5052 Hardener

<sup>3</sup> Huntsman Corporation

<sup>4</sup> AMP COMPOSITES CO.

<sup>5</sup> Alcoa

<sup>6</sup> US Research Nanomaterials

جدول (۵): خواص الیاف شیشه تک جهته نوع E.

چگالی	چگالی سطحی	مدول الاستیک	تنش تسلیم	افزایش طول
(gr/m <sup>3</sup> )	(gr/m <sup>2</sup> )	(GPa)	(MPa)	(%)
۲/۲۵	۲۰۰	۷۰	۲۲۰۰	۳

## ۲-۲- آماده‌سازی سطوح آلومینیوم

آماده‌سازی سطوح آلومینیوم شامل آماده‌سازی مکانیکی با ورق سمباده و آماده‌سازی شیمیایی با محلول‌های قلیایی و اسیدی می‌باشد. به این ترتیب که ابتدا ورق‌های آلومینیومی در ابعاد ۱۰ در ۱۰ سانتیمتر مربع بریده شده و سطوح آن‌ها با سمباده نرم در دو جهت سابیده شده و توسط محلول استون چربی زدایی می‌شوند و سپس با آب گرم شسته می‌شوند. پس از آماده‌سازی مکانیکی و چربی‌زایی، ابتدا آن‌ها را در محلول قلیایی ۵٪ هیدروکسید سدیم به مدت ۵ دقیقه در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد غوطه‌ور می‌کنیم. سپس آن‌ها را از محلول خارج نموده و با آب گرم شستشو می‌کنیم. در نهایت این ورق‌ها را در محلول اسیدی شامل ۸۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر، ۲۰۰ میلی‌لیتر اسیدسولفوریک و ۱۵۰ گرم سولفات فریک در دمای ۶۰ درجه به مدت ۱۰ دقیقه قرار داده و سپس آن‌ها را از محلول خارج نموده و با آب گرم شستشو می‌نماییم. در نهایت آن‌ها را خشک نموده و مورد استفاده قرار می‌دهیم. لازم به توضیح می‌باشد که در جریان عملیات آماده‌سازی، حدود ۰/۱ میلی‌متر از ضخامت ورق‌های آلومینیومی به دلیل خوردگی شیمیایی کاسته می‌گردد [۲۶].

## ۲-۳- نحوه توزیع نانولوله کربنی در اپوکسی

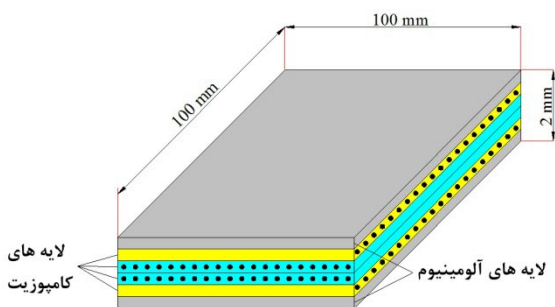
قبل از اختلاط رزین و هاردنر، باید نانولوله‌های کربنی به خوبی درون رزین اپوکسی توزیع شده و کلوخه‌های موجود در آن‌ها شکسته شوند. به همین جهت ابتدا نانولوله‌های کربنی با درصدهای وزنی ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ با ترازوی دقیق وزن شده و به رزین اپوکسی اضافه می‌شوند سپس با استفاده از یک همزن مکانیکی دور بالا به مدت ۲۰ دقیقه با سرعت ۲۰۰۰ دور بر دقیقه هم زده شده تا توزیع اولیه نانولوله‌ها در زمینه اپوکسی حاصل گردد. در طی عملیات هم زدن و

به منظور کم کردن لزجت رزین و دستیابی به اختلاط بهتر، ظرف حاوی رزین بر روی یک گرم‌کن قرار می‌گیرد تا دمای مخلوط مقداری افزایش یافته و لزجت آن کاهش یابد.

به منظور شکستن کلوخه‌های موجود در مخلوط و دستیابی به یک توزیع یکنواخت از نانولوله‌های کربنی، مخلوط مورد نظر با استفاده از یک همزن اولتراسونیک پروبی به مدت ۹۰ دقیقه با فرکانس ۲۴ کیلوهرتز و توان ۱۲۰ وات هم زده شد. در حین عملیات آلتراسونیک، جهت جلوگیری از ایجاد گرمای اضافی، مخلوط مورد نظر در حمام آب و یخ قرار می‌گیرد. سپس به منظور حذف حباب‌های هوا، مخلوط حاصل به مدت ۲۰ دقیقه توسط پمپ خلأ هواگیری شد و در نهایت هاردنر موجود با نسبت وزنی ۱۰۰ به ۳۸ به مخلوط فوق اضافه گردیده و به مدت ۵ دقیقه به صورت دستی هم زده شد.

## ۲-۴- ساخت نمونه‌ها

از میان شش نوع گلار استاندارد، از گلار نوع ۵ که مناسب برای تست ضربه می‌باشد، استفاده گردید [۱ و ۲۷]. این گلار از دولایه آلومینیومی و یک هسته کامپوزیتی با لایه چینی ۰، ۹۰، ۹۰ و ۰ درجه مطابق با شکل ۲ تشکیل شده است.



شکل (۲): ابعاد نمونه و نحوه چیدمان لایه‌های گلار نوع ۵.

برای ساخت این گلار از تکنیک لایه‌چینی دستی استفاده گردید بدین صورت که ابتدا لایه آلومینیوم تحتانی با راستای نورد صفر درجه قرار داده می‌شود. سپس چهار لایه الیاف شیشه تک جهته همراه با رزین مورد نیاز در راستاهای ۰، ۹۰، ۹۰ و ۰ درجه روی این ورق آلومینیوم قرار داده می‌شوند و در نهایت لایه آلومینیوم فوقانی طوری روی لایه چهارم الیاف شیشه قرار داده می‌شود که راستای نورد آن در



شکل (۳): دستگاه تفنگ گازی دانشگاه بوعلی سینای همدان.

جدول (۶): مشخصات پرتابه.

چگالی	مدول یانگ	سختی	طول	قطر	وزن
(kg/m <sup>3</sup> )	(GPa)	(RC)	(mm)	(mm)	(gr)
۷۸۰۰	۲۱۰	۵۵	۱۸	۶	۴

تعیین سرعت حد بالستیک، به عنوان مهم ترین دست آورد آزمون بالستیک تلقی می شود. برای تعیین سرعت حد بالستیک از اصل بقای انرژی جنبشی استفاده می شود به طوری که پرتابه قبل از برخورد به هدف دارای سرعتی ثابت و در نتیجه دارای انرژی جنبشی معینی است. پس از برخورد و نفوذ در هدف با سرعت دیگری که کمتر از سرعت اولیه است از هدف دور می شود؛ بنابراین اگر اتلاف انرژی جنبشی را در نظر نگیریم، می توان اصل بقای انرژی جنبشی را به صورت زیر نوشت:

$$E_i = E_r + E_{\text{perforation}} \quad (1)$$

$$E_{\text{perforation}} = E_{BL} = E_i - E_r \quad (2)$$

در روابط فوق  $E_i$  انرژی جنبشی پرتابه قبل از برخورد و  $E_r$  انرژی جنبشی پرتابه پس از برخورد و  $E_{\text{perforation}}$  انرژی مورد نیاز برای سوراخ کردن هدف می باشد که آن را انرژی بالستیک نیز می نامند و با  $E_{BL}$  نمایش می دهند. حال با جایگذاری مقادیر انرژی جنبشی در رابطه ۲ خواهیم داشت:

$$E_{\text{perforation}} = \frac{1}{2} m v_{BL}^2 \quad (3)$$

$$= \frac{1}{2} m v_i^2 - \frac{1}{2} m v_r^2$$

$$v_{BL} = \sqrt{v_i^2 - v_r^2} \quad (4)$$

راستای صفر درجه لایه چهارم الیاف شیشه باشد. پس از انجام فرآیند لایه چینی، نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق تحت فشار قرار گرفته تا عملیات پخت انجام گردد. سپس آن ها را از زیر فشار خارج نموده و جهت پخت نهایی به مدت یک هفته در دمای محیط قرار می دهیم.

## ۲-۵- آزمایش ضربه بالستیک

آزمایش ضربه بالستیک توسط دستگاه تفنگ گازی دانشگاه بوعلی سینای همدان انجام شد. در این دستگاه فشار ورودی برای شلیک گلوله به وسیله گاز نیتروژن تأمین می شد و سرعت پرتاب گلوله از روی نمودار فشار - سرعت که توسط سرعت سنج لیزری کالیبره شده بود، مشخص می گردید. سرعت پرتاب گلوله تابعی از فشار گاز نیتروژن و جرم گلوله بود. پس از پرتاب گلوله و خروج آن از هدف، سرعت خروجی آن توسط سرعت سنج لیزری اندازه گیری می گردید. شلیک گلوله ها از فاصله ۳ متری و با دو فشار ۶ و ۷ بار انجام شد. از یک استوانه فولادی سر مخروطی به عنوان پرتابه استفاده شد. سایر مشخصات پرتابه در جدول ۶ داده شده است.

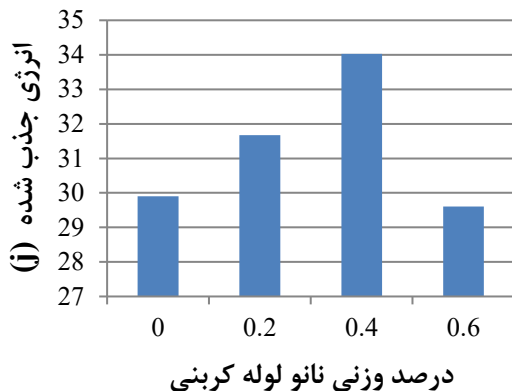
ابتدا به منظور یافتن حدود سرعت اولیه پرتابی که منجر به سوراخ شدن نمونه گردد، با سرعت اولیه ۱۰۰ متر بر ثانیه شروع به پرتاب نمودیم و در هر مرحله حدود ۵ متر بر ثانیه به سرعت قبلی اضافه نمودیم تا به سرعتی که نمونه را سوراخ می کرد برسیم. این کار را ۱۰ مرتبه تکرار نمودیم تا به سرعت بهینه پرتاب که با سعی و خطا عدد ۱۴۴ متر بر ثانیه بود رسیدیم. چون جنس نمونه ها یکسان بوده و فقط درصد نانولوله کربنی در آن ها متفاوت بود، از این سرعت بهینه به عنوان سرعت اولیه پرتاب در تمام آن ها استفاده گردید. ولی به منظور اطمینان از صحت نتایج به دست آمده، هر آزمایش را سه مرتبه با سرعت پرتاب ۱۴۴ متر بر ثانیه تکرار کردیم و میانگین سه سرعت به دست آمده را به عنوان نتیجه آزمایش گزارش نمودیم. در شکل ۳ تصویر دستگاه تفنگ گازی دانشگاه بوعلی سینای همدان نشان داده شده است.

ماکروسکوپی و میکروسکوپی سطح شکست نمونه‌ها می‌پردازیم.

### ۳-۲- بررسی ماکروسکوپی سطح شکست

به‌منظور بررسی مکانیسم شکست ناشی از برخورد پرتابه با سطح نمونه‌ها، مقطع شکست آن‌ها برش داده‌شده و با دقت مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۶ مقطع برش خورده یک نمونه از آن‌ها را نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۶ می‌توان مکانیسم‌های شکست موجود در آن را به چهار دسته به‌صورت زیر تقسیم نمود:

- (۱) تغییر شکل پلاستیک و شکست لایه آلومینیوم
- (۲) شکسته شدن ماتریس و الیاف
- (۳) جدایش بین لایه‌های کامپوزیت
- (۴) جدایش بین لایه آلومینیوم و لایه کامپوزیت



شکل (۴): روند تغییرات انرژی جذب‌شده توسط نمونه‌ها.



شکل (۵): روند تغییرات سرعت حد بالستیک نمونه‌ها.

در روابط فوق  $m$  جرم پرتابه،  $V_i$  سرعت پرتابه قبل از برخورد،  $V_r$  سرعت پرتابه پس از برخورد و  $V_{BL}$  سرعت بالستیک می‌باشد.

### ۳- بحث و بررسی نتایج

#### ۳-۱- نتایج آزمون ضربه بالستیک

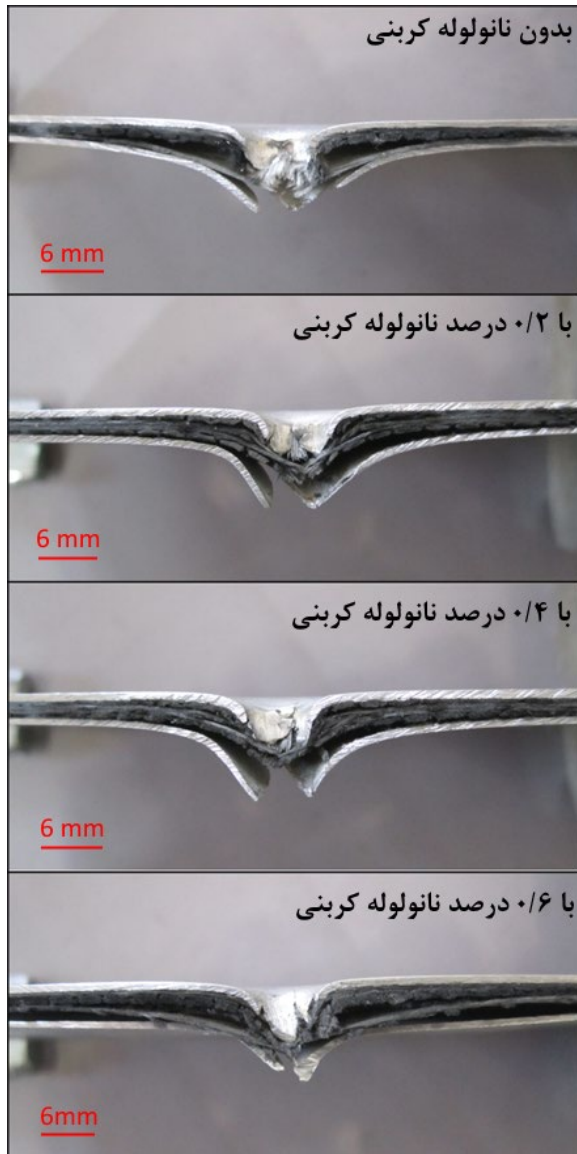
نتایج آزمایش ضربه بالستیک با درصد‌های مختلف نانولوله کربنی در جدول ۷ آورده شده است.

جدول (۷): نتایج آزمایش ضربه بالستیک.

درصد وزنی نانولوله	سرعت ورود	سرعت خروج	جذب انرژی	سرعت حد بالستیک
(%)	(m/s)	(m/s)	(j)	(m/s)
۰	۱۴۴	۷۶	۲۹/۹۲	۱۲۲
۰/۲	۱۴۴	۷۰	۳۱/۶۷	۱۲۵
۰/۴	۱۴۴	۶۱	۳۴/۰۳	۱۳۰
۰/۶	۱۴۴	۷۷	۲۹/۶۱	۱۲۱

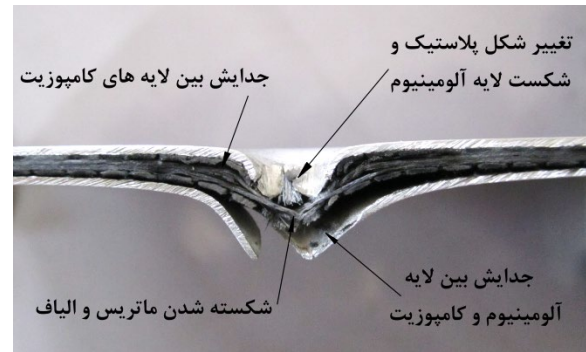
همچنین روند تغییرات انرژی جذب‌شده توسط نمونه‌ها در شکل ۴ و تغییرات سرعت حد بالستیک آن‌ها در شکل ۵ نشان داده‌شده است. همان‌طوری که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود میزان جذب انرژی توسط نمونه‌ها با افزایش مقدار نانولوله کربنی تا حد مشخصی، افزایش می‌یابد ولی با افزایش بیشتر مقدار نانولوله کربنی، کاهش می‌یابد. این نتیجه نشان می‌دهد که میزان جذب انرژی توسط نمونه‌ها به‌شدت تحت تأثیر مقدار نانولوله‌های کربنی در زمینه یا ماتریس است. به‌طوری‌که به ازای افزودن ۰/۲ درصد وزنی نانولوله کربنی، انرژی جذب‌شده توسط نمونه‌ها به میزان ۹ درصد و به ازای افزودن ۰/۴ درصد وزنی نانولوله کربنی، انرژی جذب‌شده توسط آن‌ها به میزان ۱۷ درصد افزایش می‌یابد اما به ازای افزودن ۰/۶ درصد وزنی نانولوله کربنی شاهد کاهش میزان جذب انرژی توسط نمونه‌ها هستیم. همچنین شکل ۵ نشان می‌دهد که با افزایش درصد نانولوله کربنی تا ۰/۴، مقدار سرعت بالستیک نیز افزایش می‌یابد ولی افزایش بیشتر از ۰/۴ درصد باعث کاهش سرعت بالستیک می‌گردد که برای تحلیل علت این پدیده به بررسی



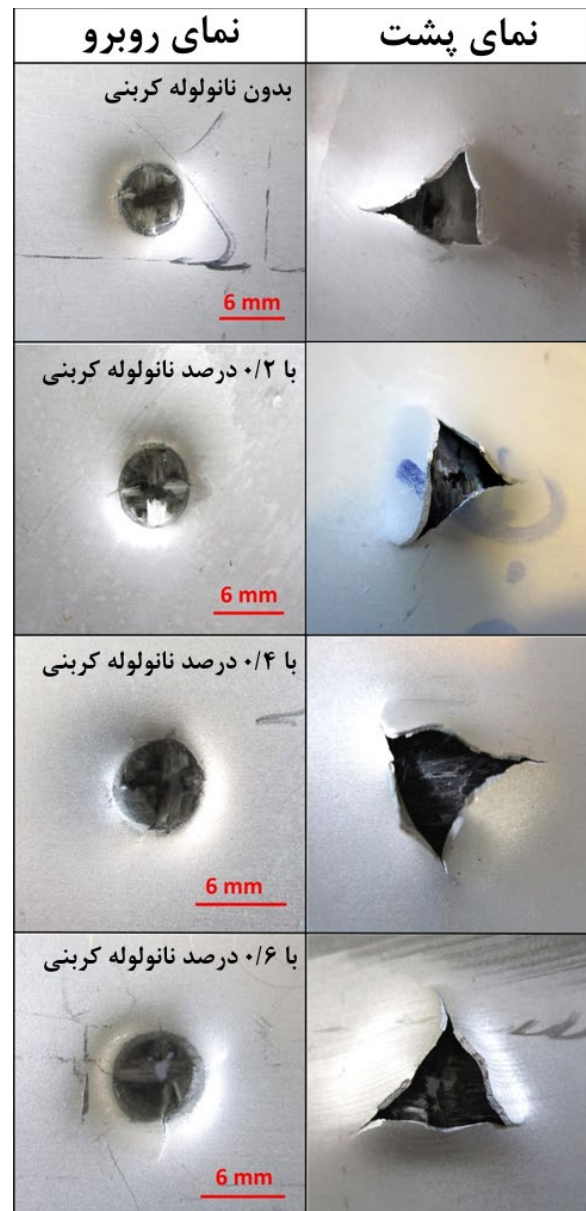


شکل (۸): مقطع برش خورده محل برخورد پرتابه برای نمونه‌های با درصد مختلف نانولوله کربنی.

هر کدام از مکانیسم‌های فوق بخشی از انرژی پرتابه را جذب می‌کنند و ترکیب آن‌ها با یکدیگر باعث جذب انرژی بیشتر و کاهش سرعت خروج پرتابه و در نتیجه افزایش سرعت حد بالستیک نمونه می‌گردد. در شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب محل برخورد پرتابه و مقطع برش خورده محل برخورد برای نمونه‌های با درصد مختلف نانولوله کربنی نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌گردد در نمونه بدون نانولوله کربنی و نمونه با ۰/۶ درصد نانولوله کربنی جدایش بین لایه آلومینیوم تحتانی و لایه کامپوزیت که



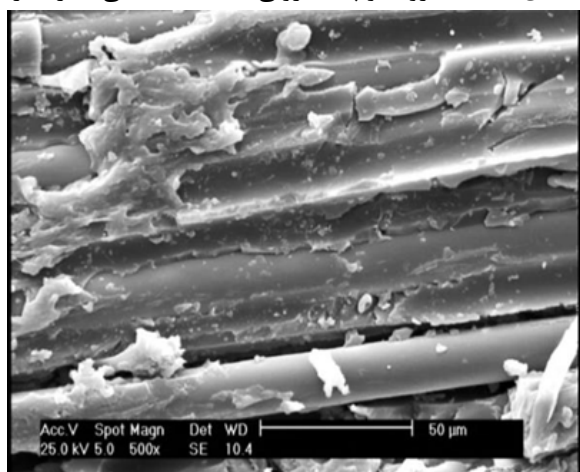
شکل (۶): سطح مقطع شکست نمونه حاصل از برخورد.



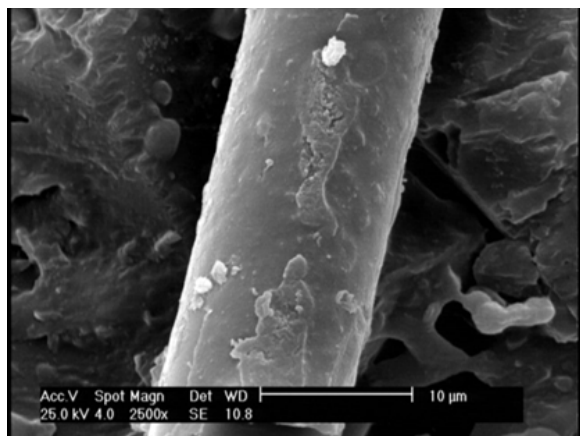
شکل (۷): نمای روبرو و پشت محل برخورد پرتابه با سطح نمونه‌های با درصد مختلف نانولوله کربنی.



شکل (۹): میکروسکوپ الکترونی دانشگاه صنعتی امیرکبیر



شکل (۱۰): سطح الیاف نمونه بدون نانولوله کربنی



شکل (۱۱): سطح الیاف نمونه با ۰/۲ درصد نانولوله کربنی

همچنین با مقایسه دو شکل ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌شود که الیاف در نمونه بدون نانولوله کربنی به‌طور مجزا از سطح شکست جدا شده و بیرون زده‌اند اما در حضور نانولوله کربنی بیرون‌زدگی الیاف از زمینه به‌طور یکنواخت و چسبیده

محل خروج پرتابه از نمونه است، کاملاً مشهود می‌باشد ولی در نمونه‌های با ۰/۲ و ۰/۴ درصد نانولوله کربنی این مسئله کمتر اتفاق افتاده که نشان‌دهنده چسبندگی بهتر لایه آلومینیومی و لایه کامپوزیتی در آن‌ها می‌باشد.

این موضوع را می‌توان این‌گونه توجیه نمود که وجود نانولوله کربنی با درصد مناسب (۰/۲ و ۰/۴) می‌تواند استحکام نمونه‌ها را به‌واسطه چسبندگی بهتر الیاف با زمینه در لایه کامپوزیتی افزایش دهد. در این حالت میکروترک‌های ایجاد شده در اثر ضربه به‌سختی می‌توانند در داخل زمینه کامپوزیت رشد نمایند و لذا به سمت بیرون ناحیه کامپوزیتی یعنی فصل مشترک لایه آلومینیومی و کامپوزیت منحرف گردیده و باعث جدایش لایه آلومینیومی از لایه کامپوزیتی می‌گردند. ولی افزایش بیش‌ازحد نانولوله کربنی تأثیر معکوس دارد یعنی همان‌طور که در شکل ۸ برای نمونه با ۰/۶ درصد نانولوله کربنی نشان داده شده است در این حالت هم جدایش بین الیاف و زمینه در لایه کامپوزیتی و هم جدایش بین لایه آلومینیومی و لایه کامپوزیتی رخ می‌دهد که برای بررسی علت آن باید ساختار میکروسکوپی سطح مقطع شکست مورد بررسی قرار گیرد.

### ۳-۳- بررسی میکروسکوپی سطح شکست

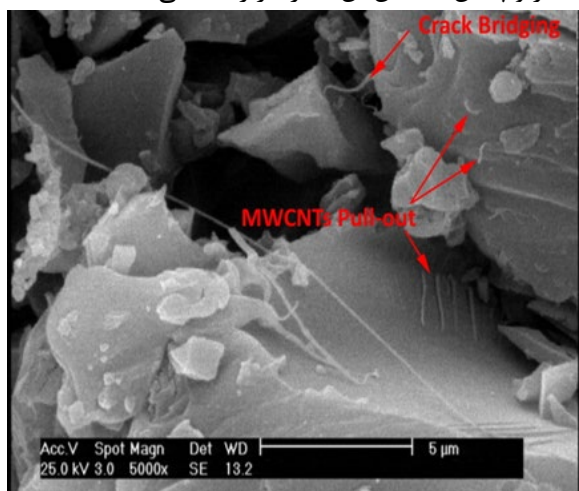
به‌منظور بررسی سطح شکست نمونه‌ها و تحلیل مکانیسم اثرگذاری نانولوله‌های کربنی در فاز زمینه و نقش آن‌ها در ایجاد، اشاعه و یا جلوگیری از رشد ترک، از میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۱</sup> مارک فیلیپس<sup>۲</sup> در دانشکده متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، استفاده گردید (شکل ۹).

همان‌طور که در شکل ۱۰ ملاحظه می‌گردد سطح الیاف نمونه بدون نانولوله‌های کربنی تقریباً صاف بوده و جدایش بین الیاف و زمینه کاملاً مشهود است. این موضوع نشان‌دهنده چسبندگی ضعیف مابین الیاف و زمینه می‌باشد ولی سطح الیاف نمونه حاوی ۰/۲ درصد نانولوله کربنی در شکل ۱۱ دارای قطعات زمینه چسبیده به آن می‌باشد که نشان‌دهنده چسبندگی مطلوب الیاف با زمینه در این حالت می‌باشد.

<sup>1</sup> Scanning electron microscopic (SEM)

<sup>2</sup> Philips

نانولوله‌های کربنی می‌باشد. در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که نانولوله‌ها همانند یک پل بر روی دهانه ترک قرار گرفته و از باز شدن آن‌ها جلوگیری می‌کنند. البته بیرون زدگی<sup>۲</sup> نوک نانولوله‌ها از سطح شکست که حاصل پاره شدن آن‌ها در حین شکست می‌باشد نیز می‌تواند مبین این موضوع باشد. اما مسئله‌ای که می‌تواند باعث کاهش میزان جذب انرژی توسط نمونه‌های حاوی ۰/۶ درصد وزنی نانولوله کربنی باشد، پدیده کلوخه شدن<sup>۳</sup> نانولوله‌های کربنی به علت افزایش مقدار و پخش ناهمگن آن‌ها در فاز زمینه می‌باشد.



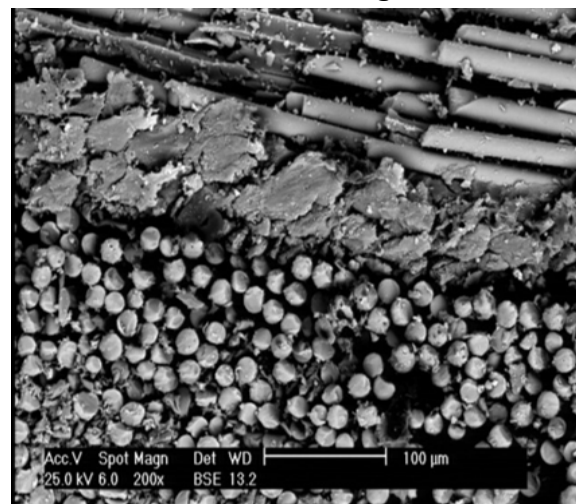
شکل (۱۴): پل زنی ترک در نمونه با ۰/۴ درصد نانولوله کربنی.

شکل ۱۵، سطح شکست نمونه حاوی ۰/۶ درصد وزنی نانولوله کربنی را نشان می‌دهد که در آن پدیده کلوخه شدن و وجود کلوخه‌ها در زمینه قابل مشاهده است. این پدیده باعث ایجاد مراکز تمرکز تنش و سهولت در اشاعه ترک می‌گردد که نتیجه آن کاهش میزان جذب انرژی و در نتیجه کاهش سرعت حد بالستیک می‌باشد.

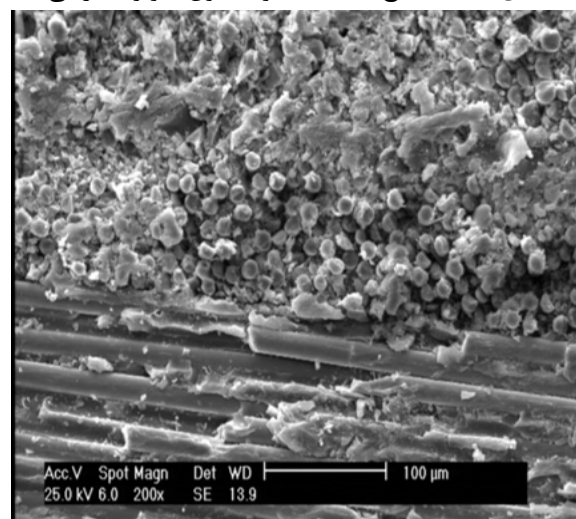
#### ۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، اثر افزودن نانولوله کربنی بر رفتار ضربه سرعت‌بالای چندلایه‌های الیافی-فلزی از نوع گلار ۵ به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. نمونه‌های مورد نیاز با درصدهای وزنی ۰، ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ از نانولوله کربنی چند

می‌باشد و مواد زمینه در ناحیه شکست، الیاف را احاطه کرده‌اند که علت آن تقویت چسبندگی مابین فاز زمینه و الیاف توسط نانولوله‌های کربنی می‌باشد. نتیجه‌ای که از مقایسه این دو تصویر می‌توان گرفت آن است که در ارتباط با نمونه دارای نانولوله کربنی ترک خوردن زمینه و در ارتباط با نمونه بدون نانولوله کربنی جدایش فصل مشترک الیاف و زمینه می‌تواند به عنوان مکانیسم‌های غالب برای توجیه شکست نمونه‌ها مطرح شوند.



شکل (۱۲): سطح شکست نمونه بدون نانولوله کربنی.



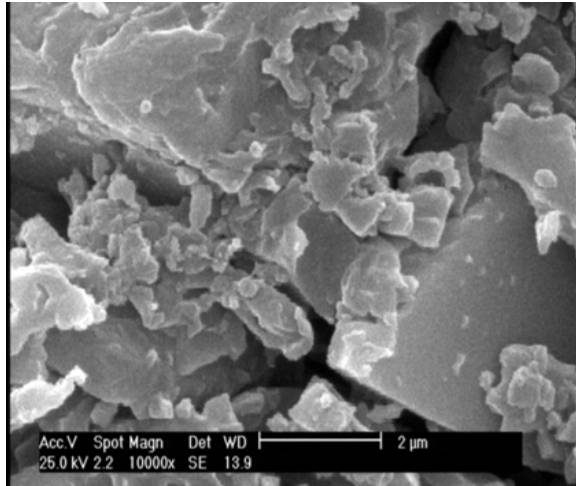
شکل (۱۳): سطح شکست نمونه با ۰/۴ درصد نانولوله کربنی.

یکی از دلایل افزایش انرژی جذب شده در نمونه‌های با ۰/۴ درصد وزنی نانولوله، رخ دادن مکانیسم پل زنی ترک<sup>۱</sup> توسط

<sup>۲</sup> Pull-out

<sup>۳</sup> Agglomeration

<sup>۱</sup> Crack bridging



شکل (۱۵): کلوخه شدن نانو ذرات در نمونه با ۰/۶ درصد نانولوله کربنی.

## ۵- مراجع

- [1] Sinmazçelik T, Avcu E, Bora MÖ, Çoban O. A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods. *Materials & Design*. 2011;32(7):3671-85.
- [2] Salve A, Kulkarni R, Mache A. A review: Fiber metal laminates (FML's)—Manufacturing, test methods and numerical modeling. *International Journal of Engineering Technology and Sciences (IJETS)*. 2016;6(1):71-84.
- [3] Botelho EC, Silva RA, Pardini LC, Rezende MC. A review on the development and properties of continuous fiber/epoxy/aluminum hybrid composites for aircraft structures. *Materials Research*. 2006;9(3):247-56.
- [4] Villanueva GR, Cantwell W. The high velocity impact response of composite and FML-reinforced sandwich structures. *Composites Science and Technology*. 2004;64(1):35-54.
- [5] Khan R. Fiber bridging in composite laminates: A literature review. *Composite Structures*. 2019;111418.
- [6] Treacy MJ, Ebbesen TW, Gibson JM. Exceptionally high Young's modulus observed for individual carbon nanotubes. *nature*. 1996;381(6584):678-80.
- [7] Androulidakis C, Tsoukleri G, Koutroumanis N, Gkikas G, Pappas P, Parthenios J, et al. Experimentally derived axial stress-strain relations for two-dimensional materials such as monolayer graphene. *Carbon*. 2015;81:322-8.

جداره ساخته‌شده و با پرتابه فولادی سر مخروطی تحت آزمون ضربه بالستیک قرار گرفتند. نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان به صورت خلاصه به صورت زیر نوشت:

- (۱) با افزودن نانولوله‌های کربنی در داخل اپوکسی، چسبندگی بین زمینه و الیاف بهبود یافته و در نتیجه انتقال تنش بهتری بین الیاف و زمینه ایجاد شده است. نانولوله‌های کربنی به واسطه مکانیسم پل زنی و ایجاد چسبندگی بهتر بین زمینه و الیاف، استحکام و چقرمگی شکست چندلایه‌های الیافی- فلزی را افزایش می‌دهند.
- (۲) بیشترین میزان اثربخشی نانولوله کربنی در نمونه‌های حاوی ۰/۴ درصد وزنی حاصل شد به طوری که میزان جذب انرژی ۱۳/۷ درصد و سرعت بالستیک ۶/۵ درصد افزایش را نسبت به نمونه‌های فاقد نانولوله کربنی نشان می‌دهد.
- (۳) افزایش بیشتر از ۰/۴ درصد وزنی نانولوله کربنی به واسطه، پدیده کلوخه شدن موجب پخش ناهمگن آن‌ها در فاز زمینه گردیده و در نتیجه باعث ایجاد مراکز تمرکز تنش و سهولت در اشاعه ترک می‌گردد که نتیجه آن کاهش میزان جذب انرژی و در نتیجه کاهش سرعت حد بالستیک می‌باشد.
- (۴) مکانیسم‌های شکست ناشی از ضربه بالستیک بر روی چندلایه‌های الیافی- فلزی را می‌توان به چهار دسته: (۱) تغییر شکل پلاستیک و شکست لایه آلومینیوم، (۲) شکسته شدن ماتریس و الیاف، (۳) جدایش بین لایه‌های کامپوزیت و (۴) جدایش بین لایه آلومینیوم و لایه کامپوزیت تقسیم نمود که هر یک بخشی از انرژی جنبشی پرتابه را به خود جذب نموده و باعث افزایش سرعت حد بالستیک می‌شوند. این مسئله که هر یک از این مکانیسم‌های شکست چه درصدی از انرژی جنبشی پرتابه را به خود جذب می‌نمایند، می‌تواند موضوع تحقیقات آتی باشد.

- and polyurethane core. *Aerospace Science and Technology*. 2014;32(1):142-52.
- [19] Zarei H, Sadighi M, Minak G. Ballistic analysis of fiber metal laminates impacted by flat and conical impactors. *Composite Structures*. 2017;161:65-72.
- [20] Eslami-Farsani R, Shahrabi-Farahani A, Khosravi H, Zamani MR. A study on the flexural response of grid composites containing multi-walled carbon nanotubes. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2017;4(1):101-8.
- [21] Zhang J, Ju S, Jiang D, Peng H-X. Reducing dispersity of mechanical properties of carbon fiber/epoxy composites by introducing multi-walled carbon nanotubes. *Composites Part B: Engineering*. 2013;54:371-6.
- [22] Shokrieh MM, Zeinedini A, Ghoreishi SM. Effects of adding multiwall carbon nanotubes on mechanical properties of Epoxy resin and Glass/Epoxy laminated composites. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(9):125-33.
- [23] Bashiri Goodarzi H, Yarmohammad Tooski M. An experimental study of the effects of carbon nanotube and graphene addition on the impact strength of Epoxy/Basalt fiber composite. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2019;6(3):411-8.
- [24] Khoramishad H, Alikhani H, Dariushi S. An experimental study on the effect of adding multi-walled carbon nanotubes on high-velocity impact behavior of fiber metal laminates. *Composite Structures*. 2018;201:561-9.
- [25] Aghamohammadi H, Eslami-Farsani R, Tcharkhtchi A. The effect of multi-walled carbon nanotubes on the mechanical behavior of basalt fibers metal laminates: An experimental study. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2020;98:102538.
- [26] ASTM-D2651-01. Standard Guide for Preparation of Metal Surfaces for Adhesive Bonding. American Society for Testing and Materials (ASTM) West Conshohocken, PA; 2001.
- [27] Ghashochi-Bargh H, Hasani M. Investigation of lamb waves propagation in variable stiffness fiber metal laminated plates using finite element method. *Journal of Aerospace Mechanics*. 2023;19(3): 81-92.
- [8] Wong EW, Sheehan PE, Lieber CM. Nanobeam mechanics: elasticity, strength, and toughness of nanorods and nanotubes. *science*. 1997;277(5334):1971-5.
- [9] Fischer H. Polymer nanocomposites: from fundamental research to specific applications. *Materials Science and Engineering: C*. 2003;23(6-8):763-72.
- [10] Yaghoubi AS, Liaw B. Thickness influence on ballistic impact behaviors of GLARE 5 fiber-metal laminated beams: Experimental and numerical studies. *Composite Structures*. 2012;94(8):2585-98.
- [11] Sitnikova E, Guan Z, Schleyer G, Cantwell W. Modelling of perforation failure in fibre metal laminates subjected to high impulsive blast loading. *International Journal of Solids and Structures*. 2014;51(18):3135-46.
- [12] Khosravi H, Eslami-Farsani R, Ebrahimnezhad-Khaljiri H. An experimental study on mechanical properties of epoxy/basalt/carbon nanotube composites under tensile and flexural loadings. *Journal of Science and Technology of composites*. 2016;3(2):187-94.
- [13] Taraghi I, Fereidoon A, 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 & Design*. 2014;53:152-8.
- [14] Khajeh Arzani H, Kabiri Ataabadi AR, Chaparian Y. Investigation of effect of structural parameters on high velocity impact resistance of fiber metal laminates. *Modares Mechanical Engineering*. 2019;19(6):1529-38.
- [15] Lighat GH, Pol MH. Experimental investigation of effects of nanoclay on ballistic properties of GLARE. *Modares Mechanical Engineering*. 2014;14(4):141-6.
- [16] Khansari M, Khodarahmi H, Vaziri A. Experimental study of ballistic properties of hybrid aluminum and epoxy matrix composite reinforced with carbon nanotube. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(8):126-32.
- [17] Chaparian Y, Kabiri A, Khaje Arzani H, Gerami G. Experimental and numerical investigation of high velocity impact resistance in fiber metal laminates. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2018;5(1):99-108.
- [18] Ghalami-Chooobar M, Sadighi M. Investigation of high velocity impact of cylindrical projectile on sandwich panels with fiber-metal laminates skins