



## بررسی تجربی تاثیر ضربه سرعت بالا بر ساندویچ پنل کامپوزیتی ساخته شده از الیاف کربن با هسته M شکل تقویت شده با نانوذرات $\text{SiO}_2$

همین خالدی<sup>۱</sup> و یاسر رستمیان<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد علی آباد کتول، دانشگاه آزاد اسلامی، علی آباد کتول، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۰۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۱۸

### چکیده

در این پژوهش، ساندویچ پنل‌های الیاف کربن-اپوکسی با هسته M شکل همراه با نانوذرات سیلیس به منظور رسیدن به لمینتی عاری از هرگونه عیب، ساخته شده و سپس، فوم پلی‌یورتان به هسته‌ی ساندویچ پنل تزریق گردید. در مقاله حاضر از روش انتقال رزین تحت خلاء استفاده شده است. اثر پارامترهایی نظیر ذرات نانو سیلیکا بر استحکام کششی لمینت و ضربه سرعت بالا بر ساندویچ پنل مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزودن ۱ تا ۳ درصد وزنی نانو سیلیس به الیاف کربن، تاثیر قابل توجهی روی استحکام کششی دارد؛ همچنین در آزمایش تست ضربه سرعت بالا، نتایج نشان داد که با افزایش درصد وزنی نانوذرات از ۱ تا ۳ درصد، مقدار سرعت خروجی پرتابه کاهش می‌یابد. از طرفی نتایج نشان داد، با برخورد پرتابه به هسته ساندویچ پنل مقدار سرعت خروجی صفر می‌شود، ولی هنگامی که پرتابه به هسته برخورد نمی‌کند، دارای سرعت خروجی است. سرعت خروجی پرتابه از ساندویچ پنل با فوم پلی‌یورتان در مقایسه با ساندویچ پنل بدون فوم پلی‌یورتان کمتر است. با استفاده از عکس‌های میکروسکوپ الکترونی عبوری مشخص شد که رزین به خوبی بین الیاف پخش شده است و عاری از هرگونه حفره و تخلخل است.

**کلمات کلیدی:** ساندویچ پنل؛ الیاف کربن؛ نانو ذرات سیلیکا؛ استحکام کششی؛ ضربه سرعت بالا.

## Experimental Investigation of High-velocity Impact Effects on Composite Sandwich Panel with M-Type Lattice Core Made of Carbon Fiber Reinforced by Nano-SiO<sub>2</sub>

H. Khaledi<sup>1</sup>, Y. Rostamiyan<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Department of Mechanical engineering, Aliabad Katoul Branch, Islamic Azad University, Aliabad Katoul, Iran.

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Mechanical engineering, Sari Branch, Islamic Azad University, Sari, Iran.

### Abstract

In this study, a composite sandwich panel with M-type lattice core made of carbon fiber reinforced by nano-SiO<sub>2</sub> has been manufactured in order to achieve a laminate without any defect. Afterward, polyurethane foam has been injected into the core of the sandwich panel. The vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) has been used in the present research. Eventually, The effects of parameters such as the amount of nano-SiO<sub>2</sub> on the tensile strength of the laminate and high-velocity impact on the carbon fiber sandwich panel resistance were investigated. It was figured out that adding 1 to 3 wt% of nano-SiO<sub>2</sub> into the carbon fiber had the most desirable effects on the enhancement of tensile strength. Also, in the high-velocity impact test, the results showed that by increasing 1 to 3 wt% of nano-SiO<sub>2</sub> in the carbon fiber, the output velocity of the projectile decreases. On the other hand, the results showed when the projectile collides with the M-type core of the sandwich panel, the output speed will be zero, but when the projectile does not hit the core, output velocity will have a value. The output velocity of the projectile from the sandwich panel with the polyurethane foam is more less compared to sandwich panel without foam. The scanning electron microscope (SEM) images showed nano-SiO<sub>2</sub> has been well distributed between the resin and the fibers.

**Keywords:** Sandwich Panel; Carbon Fiber; Nano-SiO<sub>2</sub>; Tensile Strength; High-Velocity Impact.

## ۱- مقدمه

امروزه نسبت استحکام یا سفتی به وزن از مهمترین چالش‌های صنایع حمل و نقل و هوافضا است. ساختارهای ساندویچی با داشتن وزن کم و استحکام زیاد با قابلیت جذب انرژی خوب به طور عمده در سازه‌های مدرن استفاده می‌شود. در این مسئله برای ساخت و تولید لمینت از الیاف کربن دو جهته همراه با نانو ذرات سیلیکا استفاده می‌شود و دلیل انتخاب الیاف کربن و نانو ذرات سیلیکا مورد بحث قرار می‌گیرد.

بیوتراگو و همکاران<sup>۱</sup> [۱] ضربه سرعت بالا روی ساندویچ‌هایی با پوسته کربن اپوکسی و هسته لانه زنبوری آلومینیومی را به روش المان محدود مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که بیشترین جذب انرژی متعلق به پوسته‌ها بوده، به نحوی که برای سرعت‌های بالاتر از ۲۵۰ متر بر ثانیه تقریباً ۴۵ و ۴۰ درصد انرژی جذب شده به ترتیب مرتبط با پوسته‌های بالایی و پستی است و برای سرعت‌های نزدیک به حد بالستیک پوسته بالایی ۶۰ درصد از انرژی برخورد را جذب می‌کند. شکست الیاف در پوسته، تغییر شکل پلاستیک دیواره هسته و مکانیزم‌های اصلی جذب انرژی در مقاله آنها گزارش شده‌اند. ایوانز و همکاران<sup>۲</sup> [۲]، صفحات ساندویچ پنل با الیاف پلی‌استر بدون هسته فومی و با هسته فومی را مورد مطالعه قرار دادند. در تحقیق آنها مشخص گردید که الیاف پلی‌استر با هسته فومی در تست ضربه سرعت بالا انرژی بیشتری را نسبت به نمونه بدون فوم جذب می‌کند. نصیرزاده و همکاران [۳]، اثر تغییرات چگالی فوم در پنل‌های ساندویچی متشکل از پوسته الیاف شیشه با پایه پلی‌استر اشباع نشده و هسته فومی پلی‌یورتان را در ضربه سرعت بالا مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که فوم با چگالی ۴۹ کیلوگرم بر مترمکعب بیشترین جذب انرژی و بالاترین ظرفیت بالستیکی را از خود نشان می‌دهد. رستمیان و همکاران [۴] در بررسی تجربی و عددی مربوط به ساندویچ پنل‌های با هسته شبکه خربایی هرمی با الیاف کربن به این نتیجه دست یافتند که نشیمن‌گاه‌های هسته خربایی هرمی

هرچقدر بزرگتر باشد، سازه نیروی فشاری و برشی بیشتری تحمل می‌کند. رستمیان و همکاران [۵] در تحقیقی به صورت تجربی از نانو ذرات زیرکونیا با درصد وزنی‌های ۱ تا ۳ و ۵ نسبت به وزن کل کامپوزیت به منظور افزایش مقاومت مکانیکی پلی‌کربنات به‌ویژه مقاومت به ضربه سرعت بالا استفاده کردند. نتایج نشان داد که کامپوزیت‌ها با ۳ درصد نانو زیرکونیا دارای بیشترین مقاومت در برابر ضربه سرعت بالا می‌باشند. چان و همکاران<sup>۳</sup> [۶] با انجام آزمایش‌هایی اثر زاویه قرارگیری الیاف را در مقاومت بالستیک و مقدار انرژی جذب شده کامپوزیت که تحت شلیک گلوله‌های سرتخت برنزی قرار دارد بررسی کردند. گلداسمیت و همکاران<sup>۴</sup> [۷]، تأثیر چند پارامترهایی همچون سرعت، شرایط مرزی، استحکام اتصالات بین هسته لانه زنبوری و رویه‌های آلومینیومی را روی جذب انرژی در طول نفوذ کامل به طور تجربی بررسی کردند. پل و همکارانش<sup>۵</sup> [۸]، یک مدل تحلیلی برای نفوذ پرتابه‌های سرتخت در مواد مرکب چند لایه شیشه/اپوکسی بر اساس تقسیم مدت زمان نفوذ به اجزای کوچک و محاسبه انرژی جذب شده توسط هدف ارائه کردند. جانسون و همکاران<sup>۶</sup> [۹] با شبیه سازی ضربه روی کامپوزیت‌های پوسته‌ای به این نتیجه رسیدند که سفتی ضربه‌زن یکی از فاکتورهای موثر بر میزان آسیب ایجاد شده در کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف است. وو و چوی<sup>۷</sup> [۱۰] به تحلیل شکست در نوع ترک لبه‌ای در لایه چینی‌های مختلف با دو جنس مختلف کامپوزیت پرداختند. آنها نمونه‌ها را از دو طرف تحت کشش قرار دادند و فرکانس غالب سیگنال‌های حاصله از روش انتشار صوت در لایه چینی‌های مختلف کامپوزیت را به روش تبدیل فوریه سریع به دست آوردند. دکا و همکارانش<sup>۸</sup> [۱۱] به بررسی پاسخ کامپوزیت‌های لایه‌ای تحت اثر ضربه چندگانه با سرعت بالا از دیدگاه مدل‌سازی و آزمایش تجربی پرداختند. آزمایش روی کامپوزیت سه‌لایه‌ای تحت خلاء با الیاف شیشه انجام

<sup>1</sup> Buitrago et al

<sup>2</sup> Ivañez et al

<sup>3</sup> Chan et al

<sup>4</sup> Goldsmith et al

<sup>5</sup> Pol et al

<sup>6</sup> Johnson et al

<sup>7</sup> Woo and Choi

<sup>8</sup> Deka and Bartus

کامپوزیت‌ها به دلیل وجود نانوذرات سیلیکا سه تا چهار برابر افزایش یافت.

با توجه به آخرین تحقیقات انجام شده و به منظور تکمیل مطالعات قبلی، هدف از این تحقیق دستیابی به مقاومت بالا در برابر ضربه سرعت بالا با ارائه و طراحی هسته‌های مشبک M شکل و مقایسه عملکرد آنها برای درصد‌های وزنی مختلف نانوذرات است. علاوه بر این، هدف دیگر مطالعه حاضر بررسی اثر فوم پلی‌یورتان روی مقاومت ساندریج پانل تحت ضربه سرعت بالا است؛ لذا در مطالعه حاضر سه هدف ذیل را دنبال می‌کنیم:

- ۱- ارائه روشی مناسب برای تولید لمینت، عاری از هرگونه مک.
- ۲- ابداع طرحی نو برای رسیدن به هسته خرپایی مطلوب، به منظور رسیدن به بالاترین سطح استحکام مکانیکی با رعایت نکات مهندسی.
- ۳- ارائه طرحی جدید برای هسته خرپایی M شکل به گونه‌ای که فاکتور حداقل نمودن استفاده از چسب در طراحی رعایت شده باشد. برای رسیدن به این هدف اعضای خرپا را به شکل نر و مادگی درآورده، به طوری که برای اتصال به داخل یکدیگر جاسازی شوند و نیازی به استفاده از چسب در آنها نباشد.

## ۲- مواد و روش

در این پژوهش از رزین اپوکسی EC 130 LV استفاده شده است که مشخصات رزین اپوکسی در جدول ۱ نشان داده شده است. برای ساخت لمینت از الیاف کربن با چگالی ۱۷۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب، بافته شده (دو جهته) با مشخصات نشان داده شده در جدول ۲ استفاده شده است؛ همچنین از نانوذرات سیلیکا کروی، با قطر متوسط ۵۰ نانومتر به عنوان تقویت کننده استفاده شده است.

شد و آسیب‌های به وجود آمده روی آن توسط روش غیرمخرب نوری ارزیابی گردید.

نایک و شیرارو<sup>۱</sup> [۱۲]، انرژی جنبشی منتقل شده را ترکیبی از انرژی جنبشی انتقال، تغییرشکل برشی، شکست کششی الیاف، ترک خوردگی در ماتریس و در نهایت لایه لایه شدن توصیف نمودند. لوپز و همکاران<sup>۲</sup> [۱۳]، در به بررسی انرژی اتلافی در ضربه سرعت بالا و پایین پرداختند. آنها در این تحقیق اتلاف انرژی در ضربه سرعت پایین را، اتلاف انرژی گلوله در انتقال انرژی جنبشی، تغییر شکل الاستیک هدف، آسیب به صورت ترک خوردگی در لایه‌ها، لایه لایه شدن، شکست برشی و کششی الیاف دانستند. آنها همچنین این اتلاف را در حالت ضربه سرعت بالا در انتقال خطی مومنتم، آسیب ماده هدف در ضمن شکست الیاف در کشش و خرد نمودن در راستای ضخامت لمینت تشریح کردند.

سانچز و همکاران<sup>۳</sup> [۱۴] به توسعه روش عددی پرداختند که قدرت پیش بینی آسیب ناشی از برخورد پرتابه با سرعت بالا روی اهداف کامپوزیتی کربن-اپوکسی را داشت. در این شبیه‌سازی در حالات نفوذ کامل، سرعت خروجی و سطح شکست محاسبه و نتایج با داده‌های تجربی اعتبارسنجی شد. اشپرنگر و همکاران<sup>۴</sup> [۱۵] لمینت‌های اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن همراه با نانوذرات سیلیکا را ساخته و خواص مکانیکی لمینت‌ها را مورد بررسی قرار دادند.

تسای و همکارانش<sup>۵</sup> [۱۶] کامپوزیت‌های لمینت اپوکسی-الیاف شیشه از نانوذرات سیلیس و ذرات لاستیک را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بدست آمده از آزمایش کشش نشان داد، به دلیل کاهش نرمی اپوکسی با وجود نانوذرات لاستیکی می‌تواند توسط نانوذرات سیلیکا به طور موثر جبران شود.

مانجانسا و همکارانش<sup>۶</sup> [۱۷] از رزین اپوکسی و نانوذرات اصلاح شده برای ساخت لمینت‌های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف شیشه استفاده کردند. تست خستگی کششی روی این کامپوزیت‌ها انجام شد. براساس مطالعه آنها، عمر خستگی

<sup>1</sup> Naik and Shrirao

<sup>2</sup> López et al

<sup>3</sup> Sánchez et al

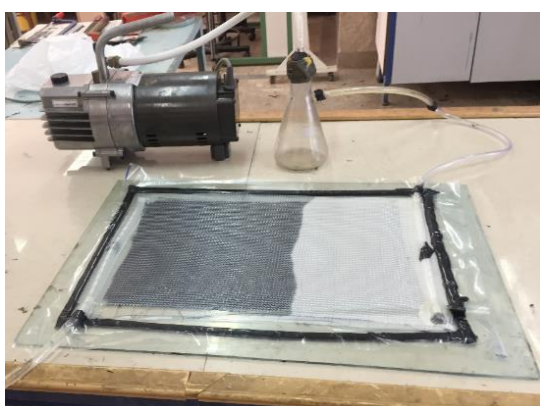
<sup>4</sup> Sprenger et al

<sup>5</sup> Tsai et al

<sup>6</sup> Manjunathaa et al

جدول ۱- خواص رزین اپوکسی [۱۵]

W340	EC 130 LV	نام تجاری
سخت کننده	رزین	
۰/۹۲- ۰/۹۴	۱/۱۴- ۱/۱۶	چگالی در دمای 25 °C ( $\frac{Kg}{m^3}$ )
-	۹۵-۱۱۷	مدت زمان سخت شدن (min)
-	۵۰۰-۸۰۰	ویسکوزیته اولیه مخلوط در دمای 25 °C (mPas)
۴۵-۵۵	۱۲۰۰-۱۶۰۰	ویسکوزیته (25 °C) (mPas)



شکل ۱- دستگاه Vacuum Bag برای ایجاد فضای خلاء روی نمونه

مدت ۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد داخل آون قرار می‌دهیم. تمامی نمونه‌ها ضخامتی برابر با ۲ میلی‌متر دارند. مرحله دوم ساخت هسته خرپای M شکل است. روی لمینت بدست آمده توسط دستگاه واتر جت عملیات برش انجام می‌شود (شکل ۲-الف). ابعاد و اندازه‌های قسمت نری و مادگی هسته در شکل ۲-ب نشان داده شده است. سپس الگوهای بدست آمده، طبق نقشه روی هم قرار می‌گیرند و در آخر، هسته‌ها به صورت قسمت مادگی (شکل ۳-الف) و قسمت نری (شکل ۳-ب) مونتاژ شده و هسته تشکیل می‌شود (شکل ۳-ج). سپس لمینت بالا و پایین را با رزین اپوکسی روی هسته جانمایی می‌کنیم. برای متصل کردن لمینت به هسته، ساندویچ پنل‌ها را به مدت ۹ ساعت در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد داخل آن قرار می‌دهیم. تمامی ساندویچ پنل‌های ساخته شده دارای هندسه مکعبی با

جدول ۲- خواص الیاف کربن دوجته [۱۵]

مقدار	خواص
۱/۷۶	چگالی ( $gr/cm^3$ )
۳۵۰۰	مقاومت کششی (MPa)
۲۳۰	مدول کششی (GPa)
۱/۵	کرنش

### ۳- مراحل ساخت

ساخت نمونه‌ها در دو مرحله انجام گرفته است:

مرحله اول ساخت لمینت از روش انتقال رزین تحت خلاء<sup>۱</sup> انجام می‌شود. فضایی محصور، توسط خمیر سیلانت، روی شیشه ایجاد می‌کنیم و داخل فضای ایجاد شده را با واکس اتومبیل آغشته می‌کنیم. لوله‌هایی به قطر ۰/۵ میلی‌متر را به حالت مارپیچ برش زده و به منظور ورود و خروج رزین روی شیشه جا نمایی می‌شود. لایه‌های الیاف برش خورده را داخل فضای محصور قرار داده و سپس به دنبال آن پارچه سفید رنگی به نام داک رون (کمی بزرگتر از نمونه) برای نجسبیدن لایه توزیع به نمونه روی آن قرار می‌دهیم. لایه توزیع (آبی رنگ که باید از نمونه کمی کوچکتر باشد) که باعث عبور رزین می‌شود را روی نمونه قرار می‌دهیم، سپس کیسه خلاء را برای ایجاد فضای خلاء روی نمونه می‌کشیم (شکل ۱). لمینت بدست آمده شامل ۸ لایه الیاف کربن بافته شده با رزین اپوکسی است. نمونه‌های بدست آمده را در حالت وکیوم به مدت ۱۲ ساعت در دمای اتاق قرار داده تا کاملاً خشک شوند. سپس نمونه‌ها را به

<sup>۱</sup> VARTM

ثابت ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه است. لازم به ذکر است، نمونه تست شده مستطیلی شکل بوده و دارای ابعاد هندسی  $۲۵۰ \times ۲۵ \times ۲$  میلیمتر است که دارای مدول الاستیسیته ۵۶۰۰ مگاپاسکال است؛ همچنین ضریب پواسون در تمام نمونه‌ها صفر است که بیانگر دو جهته بودن الیاف‌هاست (شکل ۴).

#### ۴-۲- تست ضربه سرعت بالا (آزمایش بالستیک)

برای بررسی خواص بالستیکی ساندویچ پنل‌ها از آزمون ضربه سرعت بالا (۲۳۵ متر بر ثانیه) که توسط یک تفنگ گازی انجام گرفته، استفاده شده است (شکل ۵). برای انجام این آزمایش، هر یک از صفحات هدف، درون یک نگه دارنده مربعی به ابعاد  $۹۰ \times ۹۰$  میلیمتر به‌طور ثابت قرار می‌گیرد (شکل ۶). پرتابه یک

اضلاع  $۹۰ \times ۹۰ \times ۳۴$  میلیمتر می‌باشند (شکل ۳-د). سپس از فوم پلی‌یورتان با چگالی ۸۰ کیلوگرم در متر مکعب برای پر کردن فضای خالی بین هسته نوع M و سطوح ساندویچ پانل استفاده شده است که با ترکیب دو ماده پلی‌آل و ایزوسیانات بدست می‌آید. در انتها، ساندویچ پانل با فوم همانطور ساخته می‌شود که در شکل ۳-ه نشان داده شده است.

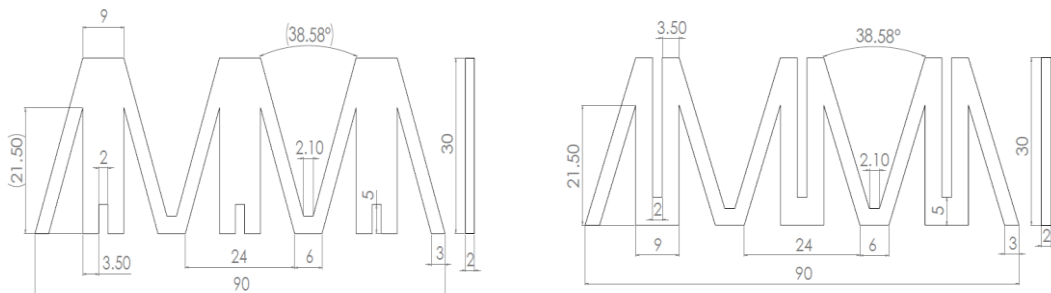
#### ۴- نتایج تجربی

##### ۴-۱- آزمایش کشش

به منظور تعیین خواص مکانیکی لمینیت‌ها، از تست کشش، تحت ASTM D3039 استفاده شده است. نرخ حرکت کَلگی با

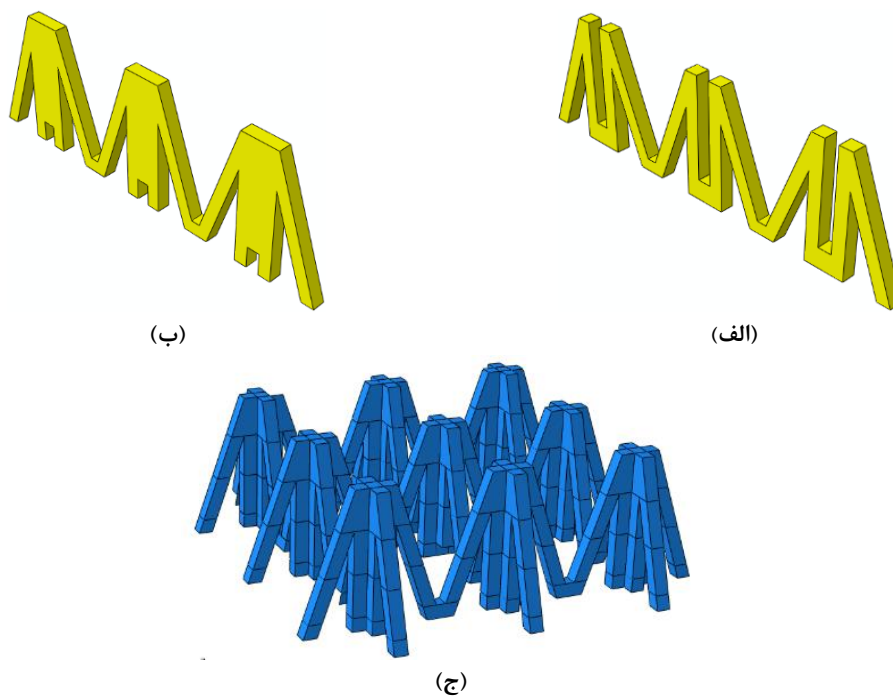


(الف)

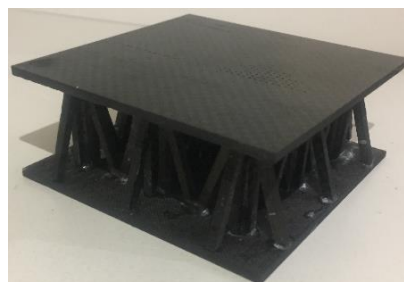


(ب)

شکل ۲- الف) عملیات برش لمینیت توسط دستگاه واتر جت و ب) نقشه ابعاد و اندازه‌های هسته (بر حسب میلیمتر)



(ه)



(د)

شکل ۳- مراحل مونتاژ ساندویچ پانل؛ (الف) خریای ماده گی، (ب) خریای نری، (ج) هسته M شکل، (د) ساندویچ پانل بدون فوم و (ه) ساندویچ پانل همراه با فوم

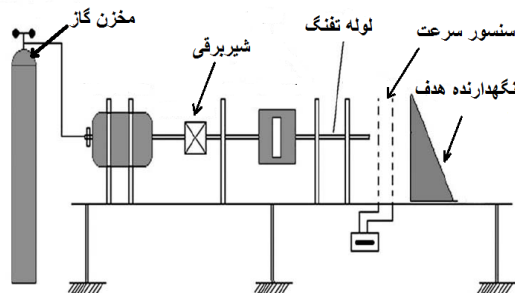


شکل ۵- تفنگ گازی



شکل ۴- نمونه لمینیت های الیاف کربن در تست کشش





شکل ۷- تصویر شماتیک از تفنگ گازی [۱۲]

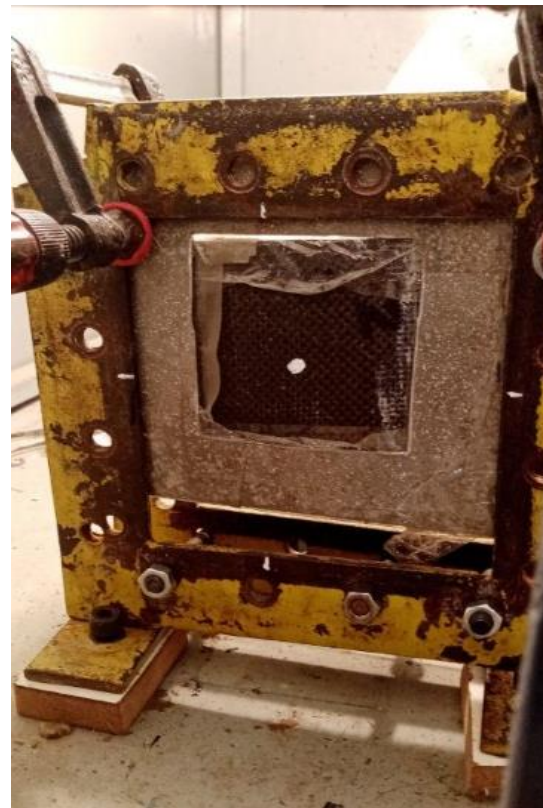
از میکروسکوپ الکترونی روبشی TESCAN MV2300 استفاده شده است.

به منظور بررسی مورفولوژی سطح کامپوزیت تولید شده از لحاظ پخش مناسب صفحات پلیمری و نحوه ایجاد تخلخل در آنها، نمونه‌های ساخته شده از سطح مقطع خود برش خوردند و تحت آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی قرار گرفتند. تصاویر میکروسکوپی بدست آمده از سطح مقطع نمونه در شکل ۸ نمایان است که با مشاهده به آن می‌توان نتیجه گرفت ماتریس به خوبی در لایه‌های الیاف کربن پخش شده و به‌طور کامل الیاف توسط رزین آغشته شده است. از طرفی حضور نانوذرات در ماتریس تخلخل را کاهش داده و فضاهای خالی را پر کرده است تا از ایجاد تمرکز تنش در این نقاط جلوگیری شود.

همچنین شکل ۹ حضور نانوذرات سیلیکا در کامپوزیت با درصدهای ۱ تا ۳ درصد وزنی را نشان می‌دهد. از شکل مشخص است، با افزایش درصد وزنی سیلیکا در سطح ماتریس، حضور نانوذرات بیشتر شده است. این امر باعث گردیده از ایجاد تخلخل در سطح ماتریس تا حد زیادی جلوگیری شود تا تمرکز تنش در این نقاط بر روی نمونه تحت بارگذاری مکانیکی تا حد زیادی کاهش یابد. به همین خاطر با افزایش درصد وزنی سیلیکا از ۱ تا ۳ درصد استحکام نمونه افزایش یافته است.

#### ۶- نتایج و بحث

آزمایشات به منظور بررسی خواص مکانیکی نمونه‌های ساندویچ پنل ساخته شده با نانوذرات سیلیکا با درصدهای ۰٪، ۱٪، ۲٪ و ۳٪ تحت آزمون ضربه سرعت بالا انجام شد.



شکل ۶- ابزار نگهدارنده قطعه هدف

کره فولادی به قطر ۸/۷ میلیمتر و به جرم ۸/۵ گرم است. برخورد در سرعت حد بالستیک در آزمایش‌ها اندازه‌گیری شده است. به‌منظور اندازه‌گیری سرعت اولیه، در جلوی لوله تفنگ گازی از یک جفت منبع نور لیزر و دیود حساس نوری استفاده شده است که متصل به یک شمارنده زمان هستند. به دلیل اینکه پس از نفوذ، پرتابه از مسیر خود منحرف می‌شود، امکان اندازه‌گیری سرعت باقی‌مانده با روش اندازه‌گیری سرعت ورودی وجود ندارد. به همین دلیل از دو پرده دو بعدی موازی، که هر یک شامل ۸۰ عدد منبع نور لیزر در دو راستای افقی و عمودی می‌باشند برای تعیین موقعیت محل عبور پرتابه استفاده شده است. این دیودهای حساس به نور هر یک به‌طور جداگانه به شمارنده زمان متصل می‌باشند و سرعت خروجی باقی‌مانده پرتابه از هدف یا ساندویچ پنل را ثبت می‌کنند. شکل ۷ تصویری از شماتیک تفنگ گازی نشان می‌دهد.

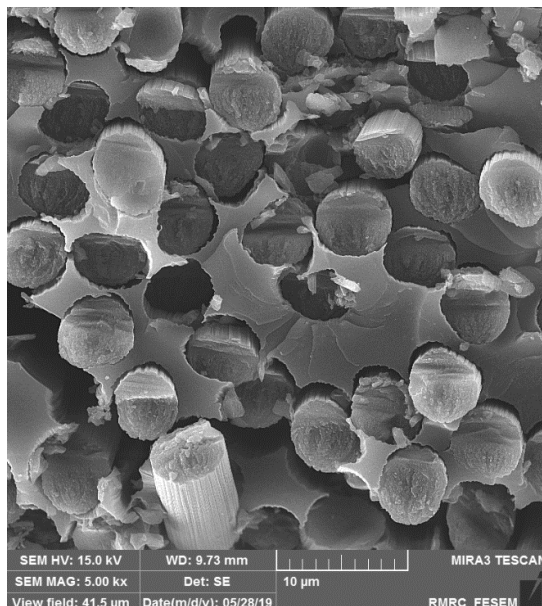
#### ۴-۳- تجزیه و تحلیل مورفولوژی

در این تحقیق، به‌منظور تجزیه و تحلیل مورفولوژی نانوکامپوزیت‌ها

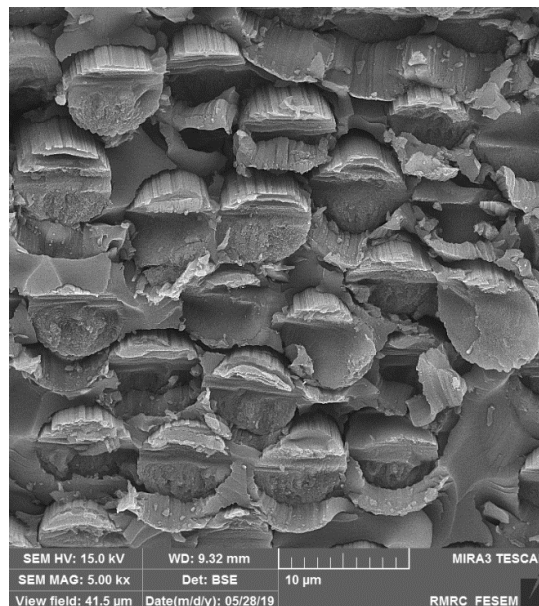
۶-۱- خواص لمینیت در تست کشش

شده با نانوذرات سیلیس بدست آمده است. همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، با افزایش درصد وزنی سیلیکا از صفر تا ۳ درصد استحکام لمینت‌ها افزایش یافته است.

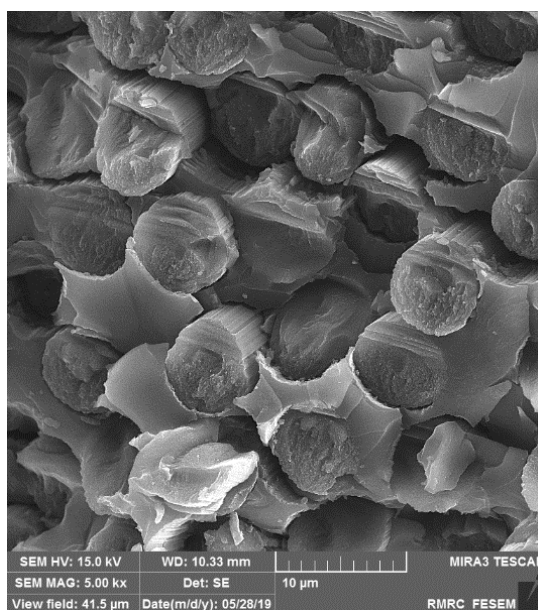
شکل ۱۰ نمودار جایجایی نیرو را نشان می‌دهد که از داده‌های آزمون کششی در آزمایش تجربی برای مواد الیاف کربن تقویت



(ب)



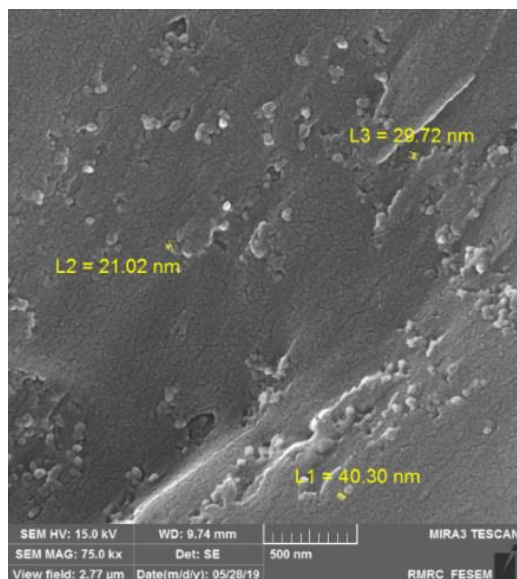
(الف)



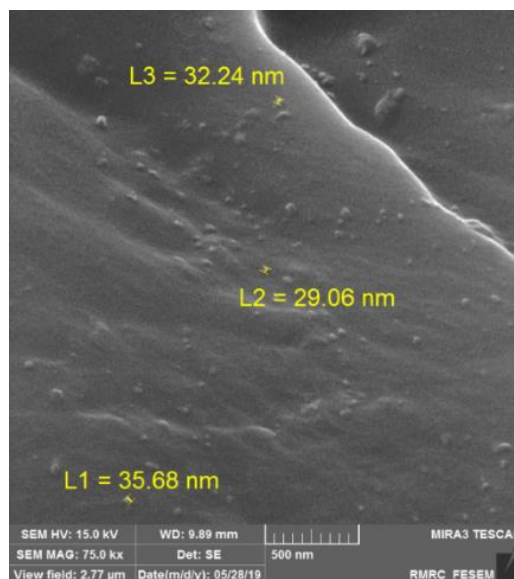
(ج)

شکل ۸- الف) تصویری از آغشته شدن و پخش مناسب رزین با الیاف برای نمونه ۱ درصد نانوسیلیکا، ب) تصویری از آغشته شدن و پخش مناسب رزین با الیاف برای نمونه ۲ درصد نانوسیلیکا و ج) تصویری از آغشته شدن و پخش مناسب رزین با الیاف برای نمونه ۳ درصد نانوسیلیکا

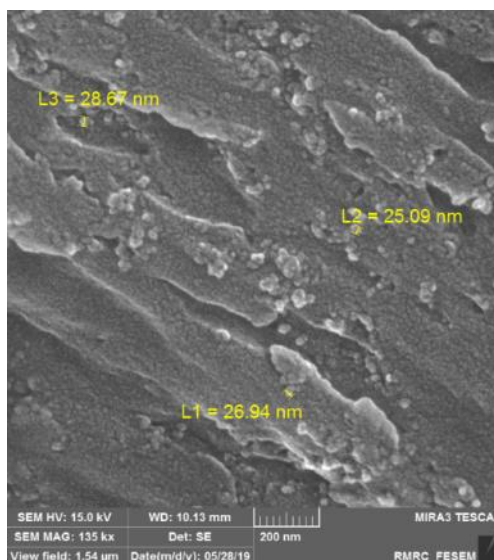




(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۹- الف) حضور نانوذرات سیلیکا در ماتریس برای نمونه ۱ درصد نانوسیلیکا، ب) حضور نانوذرات سیلیکا در ماتریس برای نمونه ۲ درصد نانوسیلیکا و ج) حضور نانوذرات سیلیکا در ماتریس برای نمونه ۳ درصد نانوسیلیکا

پلیمری می‌شود که این دلیلی بر انتقال بهتر تنش به الیاف کربن و افزایش استحکام لمینیت است؛ همچنین با افزایش درصد نانو ذرات سیلیکا در بستر پلیمری باعث گردیده از تخلخل در سطح ماتریس جلوگیری شود؛ همچنین وجود نانوذرات در بستر پلیمری رشد و اشاعه ترک را به تاخیر و در

جدول ۳ حداکثر نیرو نمونه تحت کشش را در آزمایش تجربی نشان می‌دهد. مقایسه نتایج جدول ۳ و شکل ۱۰ نشان می‌دهد که با افزایش درصد وزنی سیلیکا از صفر تا ۳ درصد استحکام لمینیت‌ها افزایش یافته است که وجود نانوذرات باعث کاهش تحرک ماتریس در سطح مشترک بین نانوذرات سیلیکا و ماتریس و همچنین سطح مشترک الیاف کربن و زمینه

ساندویچ پنل ساخته شده با هسته M شکل بدون فوم و با فوم با نانوذرات سیلیکا تحت آزمون ضربه سرعت بالا مورد بررسی قرار گرفت. سرعت اولیه پرتابه برای تمامی نمونه ها ۲۳۵ متربر ثانیه است.

جدول ۳- بیشترین نیرو نمونه تحت کشش در آزمایش تجربی

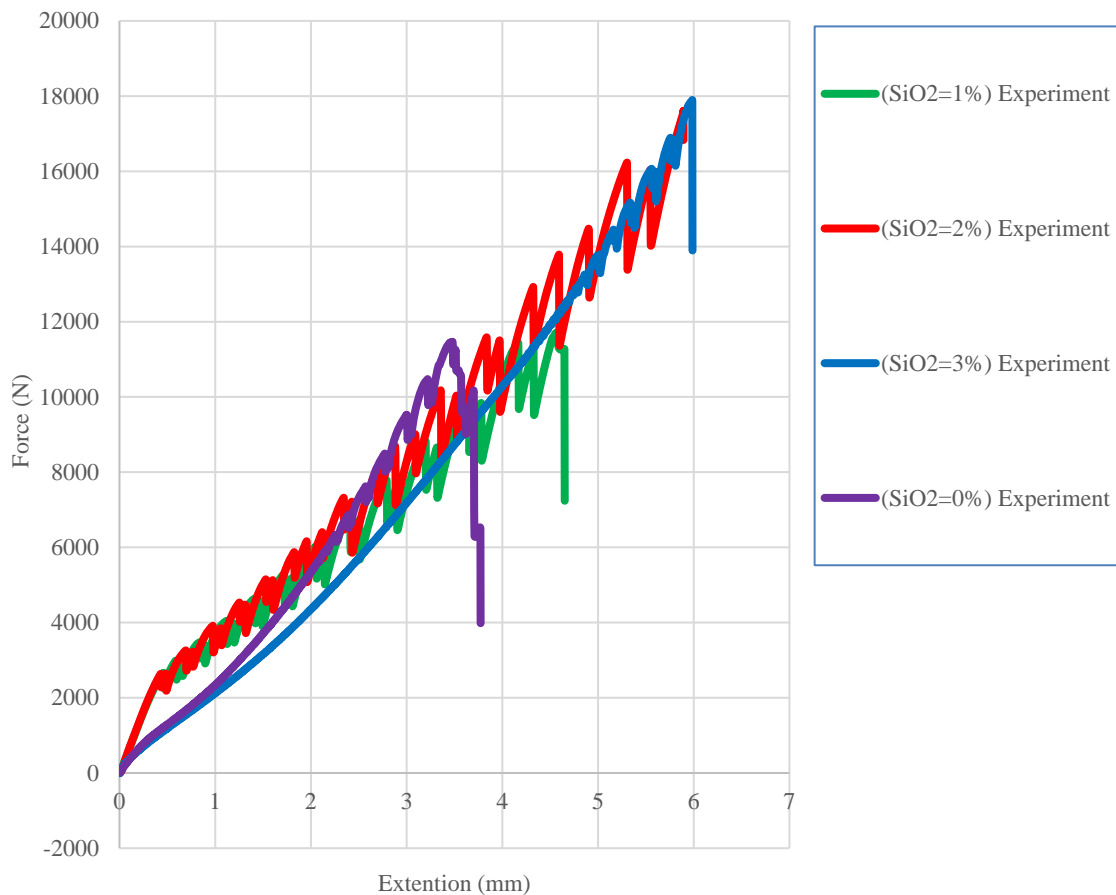
درصد وزنی ذرات سیلیس	نتایج تجربی
٪۰	۱۱۴۶۶/۷
٪۱	۱۱۷۰۲/۸۴
٪۲	۱۷۶۰۶/۹۹
٪۳	۱۷۸۹۷/۱۰

برخورد ترک با نانو ذرات مجبور به تغییر مسیر رشد نموده و باعث بهبود استحکام لمینیت می شود.

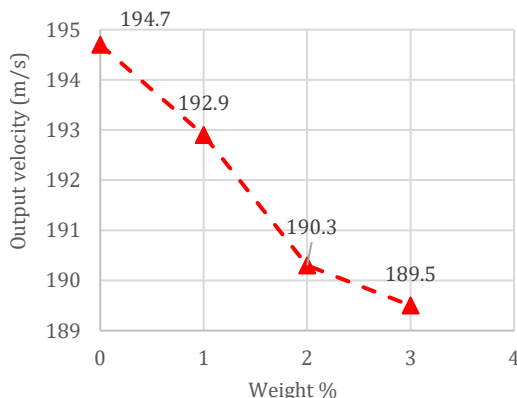
از طرفی میزان کشیدگی لمینیت ها با افزایش درصد وزنی افزایش یافته، یعنی مقدار تغییر شکل پلاستیکی آن بیشتر شده است؛ همچنین شکل ۱۱ نمودار میله ای میزان استحکام نهایی کششی نمونه های مختلف را نشان می دهد.

### ۲-۶- خواص بالستیکی ساندویچ پانل

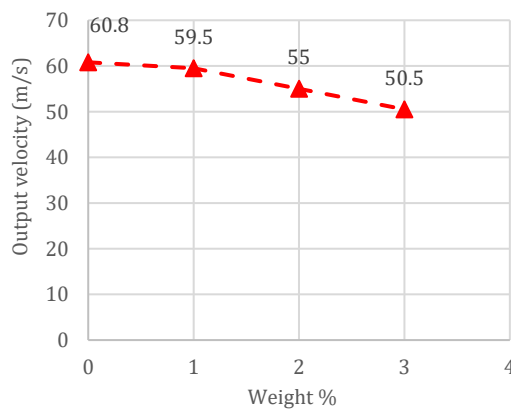
مکانیزم های شکست در کامپوزیت ها می تواند شامل شکست الیاف، ترک ماتریس و یا لایه لایه شدن باشد. در هسته های هرمی شکل جذب انرژی بیشتر به صورت برش و جدایش اتصال چسبی است [۱۸]. در مورد سازه ساندویچی ساخته شده از رویه های کامپوزیتی و هسته M شکل انتظار می رود، ترکیبی از مکانیزم های بیان شده، انرژی را جذب کنند.



شکل ۱۰- نمودار نیرو بر حسب جابجایی نمونه تحت کشش با درصدهای مختلف نانو ذرات سیلیس در آزمایش تجربی



(الف)

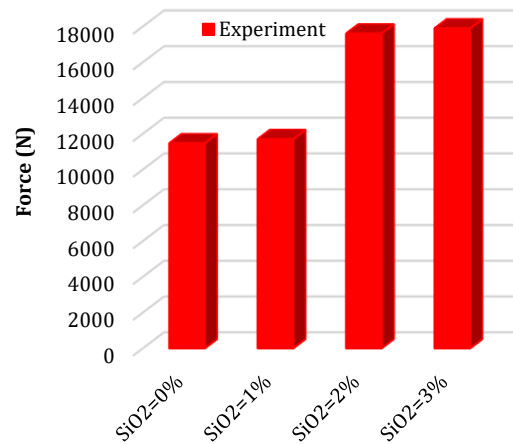


(ب)

شکل ۱۲- الف) نمودار سرعت خروجی بر حسب درصد وزنی نانوذرات  $SiO_2$  ساندویچ پنل بدون فوم و بدون برخورد پرتابه به هسته M شکل و ب) نمودار سرعت خروجی بر حسب درصد وزنی نانوذرات  $SiO_2$  ساندویچ پنل بدون فوم در برخورد پرتابه با ۱/۴ هسته M شکل

طبق فرمول (۲) با افزایش درصد وزنی نانوذرات افزایش یافته است [۲۰].

از طرفی، هنگامی که پرتابه به هسته ساندویچ پنل برخورد نمی‌کند، دارای سرعت خروجی است (شکل ۱۲-الف)؛ یعنی انرژی توسط صفحه رویه‌ها جذب شده است. از طرفی با برخورد پرتابه با ۱/۴ هسته، مقدار سرعت خروجی نسبت به موقعی که پرتابه به هسته برخورد نمی‌کند تا حدی کاهش می‌یابد (شکل ۱۲-ب)؛ اما وقتی پرتابه به طور کامل به هسته ساندویچ پنل برخورد می‌کند، مقدار سرعت خروجی صفر خواهد شد؛ یعنی صفحه رویه و هسته انرژی گلوله را کاملاً جذب کرده و گلوله در نمونه گیر می‌کند.



شکل ۱۱- نمودار میله‌ای استحکام نهایی نمونه‌های مختلف

برای بدست آوردن سرعت حد بالستیک سازه ساندویچی، ابتدا در چند سرعت متفاوت آزمایش‌هایی انجام می‌گیرد. سپس با استفاده از رابطه ۱ (رابطه رشت-ایپسون) حد بالستیک به صورت تقریبی تخمین زده می‌شود. سپس در برخورد بعدی سرعت کاهش و یا افزایش داده می‌شود تا نفوذ کامل انجام گیرد؛ به طوری که سرعت باقی‌مانده صفر شود، در این صورت سرعت اولیه پرتابه سرعت حد بالستیک نامیده می‌شود [۱۹].

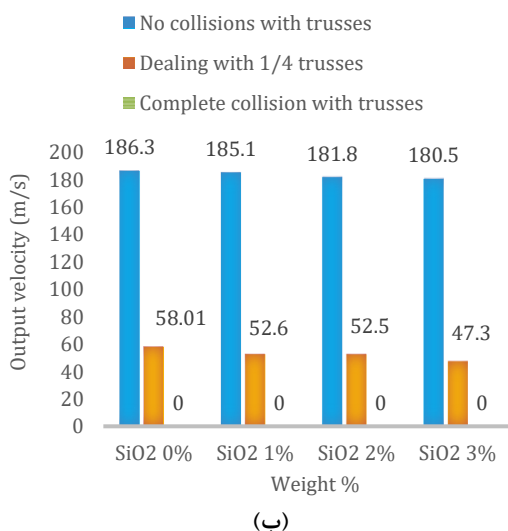
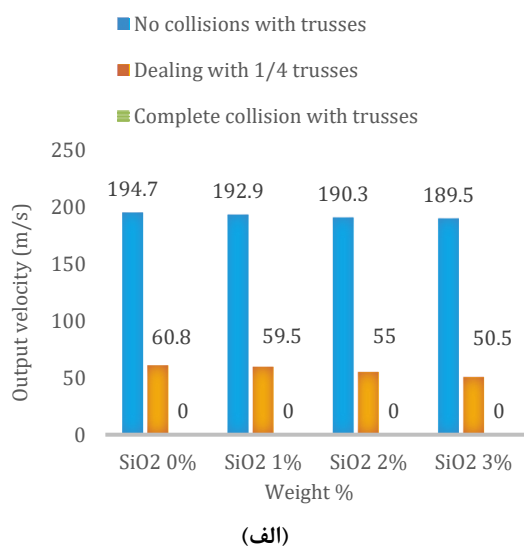
$$V_{50} = \sqrt{v_o - \left(m_o - \frac{m_{plug}}{m_o}\right) v_r} \quad (1)$$

که در آن  $V_{50}$  سرعت حد بالستیک،  $v_o$  سرعت ورودی و  $v_r$  سرعت خروجی پرتابه است.  $m_o$  و  $m_{plug}$  به ترتیب جرم پرتابه و جرم پلاگ تشکیل شده در اثر برخورد گلوله کروی است که به دلیل کوچک بودن جرم پلاگ می‌توان از آن صرف نظر کرد. همچنین با صرف نظر کردن از جرم پلاگ می‌توان انرژی جنبشی که صرف فرایند نفوذ و مکانیزم‌های شکست جذب شده‌است را با توجه به رابطه (۲) محاسبه کرد.

$$E_p = \frac{1}{2} m (v^2 - v_0^2) \quad (2)$$

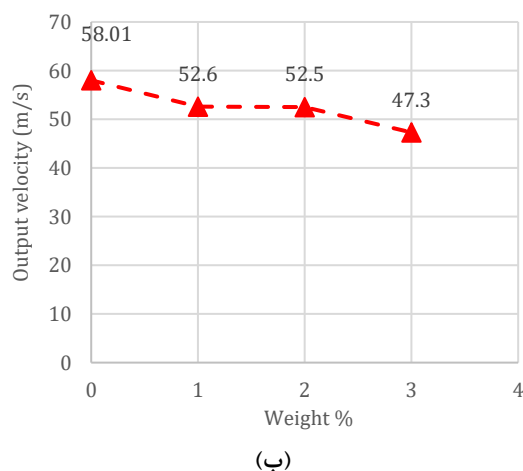
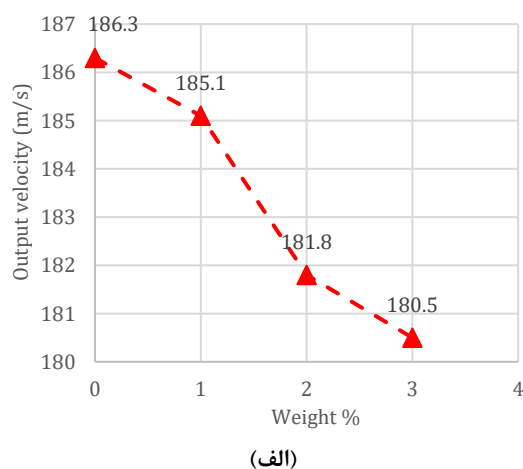
نتایج بدست آمده برای نمونه‌های ساندویچ پنل بدون فوم در شکل ۱۲-الف و ب نشان داده شده است. با انجام آزمون ضربه سرعت بالا، نتایج حاکی از آن است که با افزایش درصد وزنی نانوذرات از ۱ تا ۳ درصد مقدار سرعت خروجی پرتابه کاهش پیدا کرده است؛ یعنی مقدار انرژی جذب شده

در شکل ۱۵ عکس رادیولوژی از نمونه ساندویچ پنل با هسته M شکل نشان داده شده است. در این تصویر مشخص شده است که پرتابه کامل به هسته ساندویچ پنل برخورد کرده و سرعت آن صفر می شود؛ بنابراین انرژی گلوله توسط هسته و صفحه رویه کاملا جذب گردیده و گلوله درون هسته گیر می کند.



شکل ۱۴- الف) نمودار میله‌ای برای نقاط مختلف برخورد به ساندویچ پنل بدون فوم و ب) نمودار میله‌ای برای نقاط مختلف برخورد به ساندویچ پنل همراه با فوم

نتایج بدست آمده برای ساندویچ پنل با فوم در برخورد کامل پرتابه و برخورد ۱/۴ آن به هسته در شکل ۱۳- الف و ب مشخص شده است. نتایج نشان می دهد که با حضور فوم در هسته، مقدار سرعت خروجی در نقاط مختلف برخورد پرتابه به ساندویچ پنل نسبت به ساندویچ پنل بدون فوم کمتر شده است؛ یعنی انرژی جذب شده گلوله توسط صفحه رویه، هسته و فوم باعث جذب بیشتر آن شده است [۲۰ و ۲۱]. شکل ۱۴ نمودار میله‌ای برای نقاط مختلف برخورد پرتابه با ساندویچ پنل با فوم و بدون فوم با سرعت خروجی را نشان می دهد.

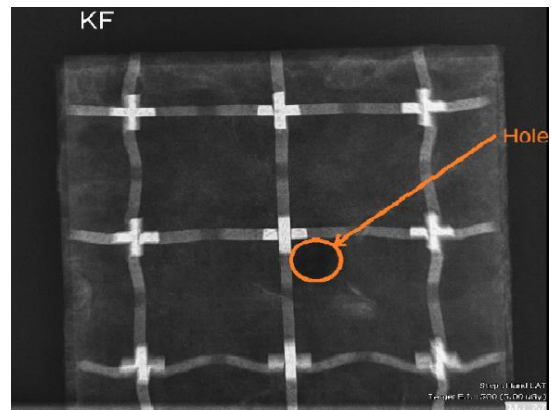


شکل ۱۳- الف) نمودار سرعت خروجی بر حسب درصد وزنی نانوذرات SiO<sub>2</sub> ساندویچ پنل همراه با فوم و بدون برخورد پرتابه به هسته M شکل و ب) نمودار سرعت خروجی بر حسب درصد وزنی نانوذرات SiO<sub>2</sub> ساندویچ پنل همراه با فوم در برخورد پرتابه با ۱/۴ هسته M شکل

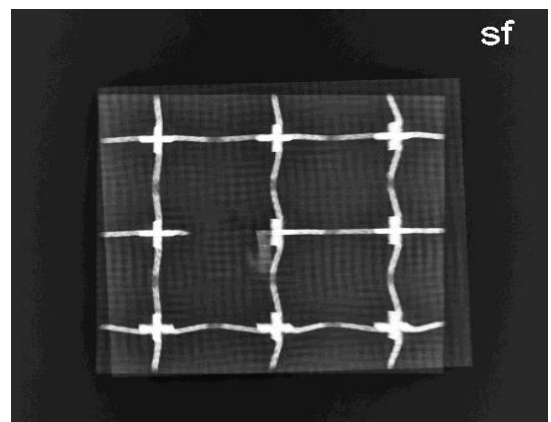
در ساندویچ پنل‌های کامپوزیتی همراه با فوم به دلیل وجود فوم امکان بررسی هسته مشبک خرابایی M شکل بعد از برخورد پرتابه مقدور نمی‌باشد؛ در نتیجه با استفاده از دستگاه رادیولوژی تغییرات داخلی ساندویچ پنل و نقاط دقیق برخورد پرتابه قابل مشاهده است. در شکل ۱۵-الف تصویر رادیولوژی کاملاً مشخص می‌کند که پرتابه به هسته مشبک هیچ برخوردی نداشته و دارای سرعت خروجی از ساندویچ پنل است که پرتابه تنها با رویه‌های بالا و پایین و فوم پلی‌یورتان برخورد داشته است و هسته مشبک دچار هیچ آسیبی نشده است و هسته مشبک کاملاً سالم است؛ همچنین در شکل ۱۵-ب برخورد پرتابه با ۱/۴ هسته خرابایی که دچار شکست و آسیب شده بطور واضح مشخص است. در شکل ۱۵-ج مشخص شده است که پرتابه کامل به هسته مشبک برخورد کرده و سرعت آن صفر می‌شود؛ بنابراین انرژی گلوله توسط هسته خرابایی و صفحه رویه کاملاً جذب گردیده و گلوله درون هسته گیر می‌کند.

در شکل ۱۶ و شکل ۱۷ به ترتیب برخورد پرتابه به نمونه ساندویچ پنل بدون فوم و همراه با فوم در پشت نمونه را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که وقتی پرتابه کامل به هسته برخورد می‌کند، گلوله در نمونه خواهد ماند (شکل ۱۶-الف و شکل ۱۷-الف)؛ اما وقتی به هسته به صورت کامل یا اینکه اصلاً برخورد نکند، گلوله با کمی انحراف از نمونه خارج می‌شود (شکل ۱۶-ب و شکل ۱۷-ب)؛ همچنین در شکل ۱۶-ب و شکل ۱۷-ب با خروج گلوله مساحت خرابایی نمونه در پشت ساندویچ پنل نسبت به نمونه‌ای که گلوله خارج نشده، بیشتر شده است [۲۱].

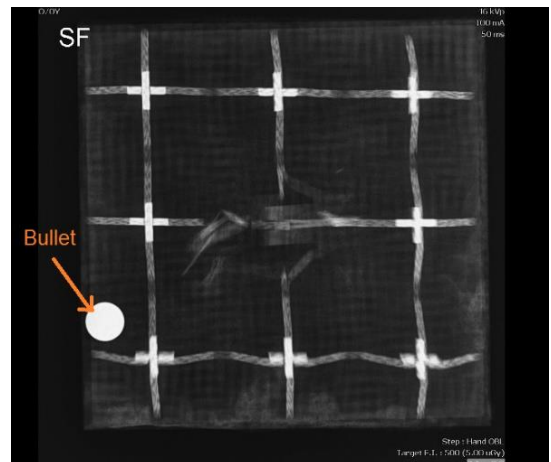
همچنین در شکل ۱۸ شکست و تخریب هسته خرابایی پس از برخورد گلوله به هسته کامل نشان داده شده که سرعت خروجی گلوله از ساندویچ پنل صفر است و در شکل ۱۹ شکست و آسیب هسته خرابایی پس از برخورد گلوله به ۱/۴ هسته خرابایی را نشان می‌دهد که گلوله دارای سرعت خروجی از ساندویچ پنل است و در نمونه‌های بدون برخورد گلوله به هسته خرابایی فقط رویه‌های روبرو و پشت دچار آسیب و شکست می‌شود و همچنین ساندویچ پنل‌های فوم‌دار که قابلیت دیده شدن شکست خراباها را ندارند، به صورت عکس رادیولوژی در شکل ۱۵ نشان داده شده‌اند.



(الف)



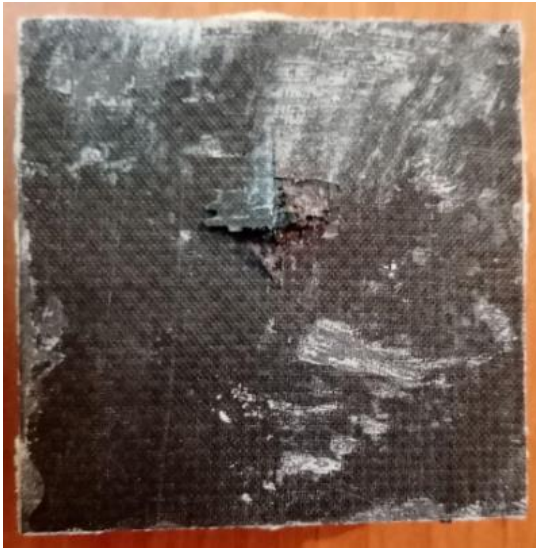
(ب)



(ج)

شکل ۱۵-الف) تصویر رادیولوژی خروج پرتابه از ساندویچ پنل بدون برخورد به هسته مشبک M شکل، (ب) تصویر رادیولوژی خروج پرتابه و برخورد با ۱/۴ هسته مشبک و (ج) تصویر رادیولوژی برخورد کامل پرتابه به هسته مشبک و گیر کردن داخل ساندویچ پنل





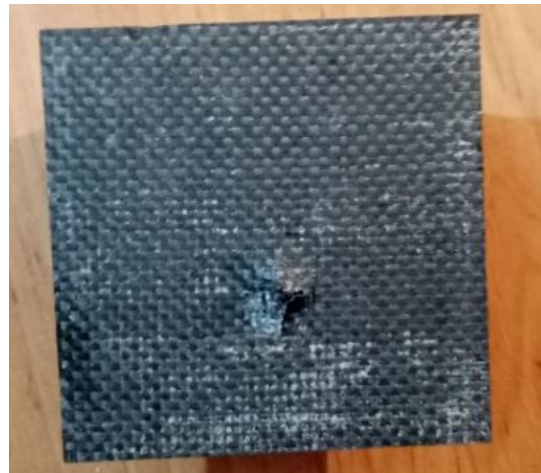
(الف)



(الف)



(ب)



(ب)

شکل ۱۶- الف) تصویر پشت نمونه با برخورد پرتابه به هسته ساندویچ پنل بدون فوم و ب) تصویر پشت نمونه بدون برخورد پرتابه به هسته ساندویچ پنل بدون فوم

شکل ۱۷- الف) تصویر پشت نمونه با برخورد پرتابه به هسته ساندویچ پنل همراه با فوم و ب) تصویر پشت نمونه بدون برخورد پرتابه به هسته ساندویچ پنل همراه با فوم

- مورفولوژی لمینیت ساخته شده نشان می‌دهد که ماتریس به خوبی در لایه‌های الیاف کربن پخش شده و به‌طور کامل الیاف توسط رزین آغشته شده است. از طرفی حضور نانوذرات در ماتریس منجر به عدم ایجاد تخلخل گشته و فضاهای خالی را پر می‌کند.

#### ۷- نتیجه گیری

مطالعه تجربی روی ساندویچ پنل‌های کامپوزیتی ساخته شده با پایه پلیمری EP / CF تقویت شده توسط ذرات نانو سیلیکا با هسته M شکل انجام شد. اثر پارامترهایی نظیر ذرات نانو سیلیکا بر استحکام کششی لمینیت و ضربه سرعت بالا بر ساندویچ پنل مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده پس از انجام این تحقیق و بررسی به شرح زیر است:



شد؛ اما وقتی پرتابه به هسته ساندویچ پنل برخورد نمی‌کند، دارای سرعت خروجی است.

- نتایج این پژوهش نشان داد که سرعت خروجی پرتابه هنگام برخورد آن به ساندویچ پنل همراه با فوم نسبت به ساندویچ پانل‌های بدون فوم تا حدی کاهش یافته است.

#### ۸- ضمایم

سرعت حد بالاستیک	$V_{50}$
سرعت ورودی	$V_0$
سرعت خروجی پرتابه	$V_r$
جرم پرتابه	$m_0$
جرم پلاگ	$m_{plug}$
انرژی	$E_p$

#### ۹- مراجع

- [1] Buitrago BL, Santiuste C, Sánchez-Sáez S, Barbero E, Navarro C (2010) Modelling of composite sandwich structures with honeycomb core subjected to high-velocity impact. *Compos Struct* 92(9): 2090-2096.
- [2] Ivañez I (2011) Numerical modelling of foam-cored sandwich plates under high-velocity impact. *Compos Struct* 93: 2392-2399.
- [3] Nasirzadeh R (2014) Study of foam density variations in composite sandwich panels under high velocity impact loading. *Impact Eng* 63: 129-139.
- [4] Rostamiyan Y (2015) Experimental and numerical study of flatwise compression behavior of carbon fiber composite sandwich panels with new lattice cores. *Constr Build Mater* 100: 22-30
- [5] Rostamiyan Y (2016) High-speed impact and mechanical strength of ZrO<sub>2</sub>/polycarbonate nanocomposite. *Damage Mech* 0: 1-14.
- [6] Chan S, Fawaz Z, Behdinan K, Amid R (2007) Ballistic limit prediction using a numerical model with progressive damage capability. *Compos Struct* 77(4): 466-474.
- [7] Goldsmith W, Dharan CKH, Chang H (1995) Quasi-static and ballistic perforation of carbon fiber laminates. *Int J Solids Struct* 32(1): 89-103.
- [8] Pol H, Liaghat GH (2013) Analytical modeling propagation of projectiles into Glass/Epoxy composite. *Modares Mechanical Engineering* 12: 11-19.



شکل ۱۸- شکست هسته خرابایی با برخورد کامل گلوله به هسته



شکل ۱۹- شکست هسته خرابایی با برخورد گلوله به ۱/۴ هسته

- نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش درصد وزنی نانوذرات از ۱ تا ۳ درصد، باعث کاهش سرعت خروجی پرتابه می‌شود؛ یعنی با افزایش درصد وزنی نانوذرات، مقدار انرژی جذب شده افزایش می‌یابد.
- نتایج این پژوهش نشان داد که مقدار سرعت خروجی پرتابه هنگام برخورد با هسته ساندویچ پنل صفر خواهد

- and silica nanoparticles. *Compos Sci Technol* 105: 86-95.
- [16] Tsai JL, Huang BH, Cheng YL (2011) Enhancing fracture toughness of glass/epoxy composites for wind blades using silica nanoparticles and rubber particles. *Procedia Eng* 14: 1982-1987.
- [17] Manjunathaa CM, Taylora AC, Kinlocha AJ, Sprenger S (2010) The tensile fatigue behaviour of a silica nanoparticle-modified glass fibre reinforced epoxy composite. *Compos Sci Technol* 70(1): 193-199.
- [18] Liaghat GH, Alavi-Nia A (2010) Ballistic limit evaluation for impact of cylindrical projectiles on honeycomb panels. *Thin-Walled Struct* 1: 55-61.
- [19] Ben-Dor G, Dubinsky A, Elperin T (2002) On the Lambert Jonas approximation for ballistic impact. *Mech Res Commun* 1: 137-139.
- [20] Chatterjee VA, Verma SK, Bhattacharjee D, Biswas I, Neogi S (2019) Enhancement of energy absorption by incorporation of shear thickening fluids in 3D-mat sandwich composite panels upon ballistic impact. *Compos Struct* 225: 111148.
- [21] Wang Y, Yu Y, Wang C, Zhou G, Karamoozian A, Zhao W (2020) On the out-of-plane ballistic performances of hexagonal, reentrant, square, triangular and circular honeycomb panels. *Int J Mech Sci* 173: 105402.
- [9] Johnson AF, Holzapfel M (2003) Modelling soft body impact on composite structures. *Compos Struct* 61: 103-113.
- [10] Woo SC, Choi NS (2007) Analysis of fracture process in single-edge-notched laminated composites based on the high amplitude acoustic emission events. *Compos Sci Technol* 67: 1451-1458.
- [11] Deka LJ, Bartus SD, Vaidya UK (2009) Multi-site impact response of S2- glass/epoxy composite laminates. *Compos Sci Technol* 69: 725-735.
- [12] Naik N, Shrirao P (2004) Composite structures under ballistic impact. *Compos Struct* 66(1-4): 579-590.
- [13] López-Puente J, Zaera R, Navarro C (2008) Experimental and numerical analysis of normal and oblique ballistic impacts on thin carbon/epoxy woven laminates. *Compos Part A-Appl S* 39 (2): 374-387.
- [14] Pernas-Sánchez J, Artero-Guerrero JA, ZahrViñuela J, Varas D, López-Puente J (2014) Numerical analysis of high velocity impacts on unidirectional laminates. *Compos Struct* 107: 629-634.
- [15] Sprenger S, Kothmann MH, Altstaedt V (2014) Carbon fiber-reinforced composites using an epoxy resin matrix modified with reactive liquid rubber