



پاسخ ضربه سرعت پایین در کامپوزیت‌های کارال تقویت‌شده با نانو ذرات

رضا عمویی‌دیزجی¹، مجتبی یزدانی^{2*}

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

* تبریز، صندوق پستی 51335/1996، m.yazdani@sut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 20 آذر 1395

پذیرش: 25 دی 1395

ارائه در سایت: 10 بهمن 1395

کلید واژگان:

الیاف کربن بافت ساده

نانو لوله‌های کربنی چند دیواره

نانو سیلیکا

روش انتقال رزین به قالب توسط خلا

ضربه سرعت پایین

در این مقاله، تأثیر افزودن نانو ذرات سیلیکا و نانو لوله‌های کربنی چند دیواره بر پاسخ ضربه سرعت پایین مورد بررسی تجربی قرار گرفته است. نانو مواد مرکب با زمینه اپوکسی و با 11 لایه الیاف کربن بافته‌شده با جرم واحد سطح 200 گرم بر متر مربع، رزین R510، سخت‌کننده H515 و با کسر حجمی الیاف 66% و به روش انتقال رزین به قالب توسط خلا ساخته شده است. نمونه‌ها با درصد جرمی 1 نانو سیلیکا و نانو لوله‌های کربن چند دیواره ساخته شدند، همچنین کارال آماده از دو رویه آلومینیوم با آلیاژ 2024 ساخته شده است. آزمایش‌های ضربه سرعت پایین با استفاده از دستگاه ضربه افتان در انرژی‌های 20، 40 و 60 ژول با سرعت‌های 2.6، 3.68 و 4.5 متر بر ثانیه انجام گرفت. نتایج حاصل از آزمایش ضربه سرعت پایین نشان‌دهنده بهبود عملکرد مواد مرکب فیبر-فلز به سبب نانو لوله‌های کربنی، همچنین تأثیر نانو لوله‌های کربنی چند دیواره در بهبود خواص ضربه کامپوزیت چند لایه فیبر-فلز بهتر از تأثیر نانو سیلیکاست. چسبندگی و پخش‌شوندگی بهتر نانو لوله‌های کربنی و ایجاد اتصال بین لایه‌ای قوی از دیگر عوامل تأثیرگذار در پاسخ ضربه نمونه تقویت‌شده با نانو لوله کربن چند دیواره نسبت به نانو سیلیکاست.

Low Velocity Impact Response of CARALL composites reinforced with nano particles

Reza Amooyi Dizaji¹, Mojtaba Yazdani^{1*}

1- Department of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

* P.O.B. 51335/1996 Tabriz, Iran, m.yazdani@sut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 10 December 2016

Accepted 14 January 2017

Available Online 29 January 2017

Keywords:

Plain weave carbon fiber

MWCNT

Nano silica

VARTM

Low velocity impact

ABSTRACT

In, this research, the effects of adding silica and multiwall carbon nanotubes (MWCNT) nano particles on the low velocity impact response are experimentally studied. Vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) method has been used to manufacture nano composite with 11 layers of plain weave carbon fibers 200 g/m², resin R510 and hardener H515 with 66% fiber volume fraction. Samples made of nano silica and MWCNT particles have been dispersed with 1 wt. %. The prepared CARALL is made of two Aluminum 2024 facing sheets. Low velocity impact tests have been conducted using by drop weight device at the impact energy of 20, 40 and 60 J with velocity of 2.6, 3.68 and 4.5 m/s. The results of the low velocity impact experiments indicates that the MWCNT improves performance of fiber metal composite material and the effects of MWCNT in improving the impact properties of fiber metal laminate composite is better than of nano silica. Better adherence and dispersion of MWCNT and strong interfacial creation are some other effect factors of impact response sample reinforced with multiwall carbon nanotubes in comparison to nano silica.

1- مقدمه

پایین آمدن نرخ رشد ترک شده است. لایه‌های فلزی دارای قدرت تحمل بالا و مقاومت به ضربه مناسبی هستند که ترکیب سفتی و استحکام بالا همراه با خواص جذب انرژی ضربه بالا مزیت برتری برای استفاده از کامپوزیت‌های چندلایه کربن-آلومینیوم شده است. چندلایه‌های فیبر-فلز علاوه بر ترکیب مزیت‌های خوب فلز و الیاف تقویت‌کننده ماتریس باعث رفع معایب هر یک از این لایه‌ها مانند مقاومت در برابر ضربه پایین و تعمیرپذیری ضعیف الیاف و مشکلات خستگی و خوردگی فلز شده است [2,1].

جی فان و همکاران [3] پاسخ ضربه سرعت کم را در کامپوزیت‌های چندلایه فیبر-فلز و کامپوزیت‌های ساده مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن است که کامپوزیت‌های چندلایه فیبر-فلز نسبت به کامپوزیت‌های

در حال حاضر تقاضا برای ساختارهایی با جرم کم و عملکرد بهتر در سازه‌های هوافضا منجر به ساخت کامپوزیت‌های¹ چندلایه فیبر-فلز² شده که ترکیبی از لایه‌های فلزی نازک و لایه‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف است. الیاف کربن تقویت‌کننده پلیمر، دارای نسبت بالای استحکام به جرم و سفتی به جرم بالاست که به‌طور گسترده در بسیاری از زمینه‌های هوافضا استفاده شده است.

سفتی بالای کربن در کامپوزیت‌های چندلایه کربن-آلومینیوم موجب

¹ Composite

² FML(Fiber Metal Laminate)

Please cite this article using:

R. Amooyi Dizaji, M. Yazdani, Low Velocity Impact Response of CARALL composites reinforced with nano particles, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 58-64, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

R. Amooyi Dizaji, M. Yazdani, Low Velocity Impact Response of CARALL composites reinforced with nano particles, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 58-64, 2017 (in Persian)

بررسی تأثیر نانو ذرات لوله‌های کربنی چند دیواره و سیلیکا در کامپوزیت‌های چندلایه کارال هدف اصلی و کار جدید این پژوهش است که به روش انتقال رزین به قالب توسط خلا هست که موجب بالا رفتن و یکنواختی نسبت رزین به الیاف، کاهش زمان ساخت، کاهش مصرف رزین اپوکسی شده است.

2- ساخت نمونه‌ها

2-1- مواد

کامپوزیت‌های چندلایه فیبر- فلز از رویه‌های آلومینیومی و لایه‌های کامپوزیتی تشکیل، لایه آلومینیومی از جنس 2024-T3 و ضخامت 0.6 میلی‌متر انتخاب شده و الیاف استفاده شده برای ساخت لایه‌های کامپوزیتی از جنس کربن است. این الیاف به‌صورت بافت ساده استفاده شده که دارای مشخصات کاملاً یکسان در راستاهای طولی و عرضی، جرم واحد سطح الیاف برابر با 200 گرم بر مترمربع است (شکل 1).

رزین مورد استفاده از خانواده اپوکسی و تهیه شده از شرکت ماناپار با نام تجاری R510 و با سخت‌کننده H515 است. نسبت جرمی رزین به سخت‌کننده استفاده شده در این تحقیق براساس اطلاعات شرکت سازنده 100 به 15 و جزء رزین‌های سخت است.

در ساخت لایه‌های کامپوزیتی کربن اپوکسی از دو نوع نانو ذره سیلیکا و نانو لوله‌های کربنی چند دیواره با درصد جرمی 1% استفاده شده است.

2-2- ساخت فلز- ماده مرکب کربن اپوکسی

در این پژوهش برای ساخت نمونه‌ها از روش انتقال رزین به قالب توسط خلا⁵ استفاده شده است. روش انتقال رزین به قالب توسط خلا فرایندی کم‌هزینه است که می‌تواند برای تولید قطعه‌های کامپوزیتی باکیفیت بالا مورد استفاده قرار گیرد. فرایند انتقال رزین به قالب توسط خلا در بسیاری از کاربردها به دلیل ویژگی صرفه‌جویی در زمان، مقدار رزین مصرفی پایین، کیفیت ساخت بالا و مقرون به‌صرفه بودن مورد استفاده قرار می‌گیرد. اکنون این فرایند در بسیاری از کاربردهای بخش دفاعی استفاده می‌شود. برای ساخت نمونه‌ها با استفاده از روش انتقال رزین به قالب توسط خلا از پمپ خلا، قالب، لوله و روکش پلاستیکی، قابل مشاهده در شکل 2، استفاده شده است.

در این تحقیق نمونه‌ها با 1% جرمی نانو سیلیکا و نانو لوله‌های کربنی نسبت به جرم کل ماتریس اضافه شد. افزودن نانو ذرات به رزین اپوکسی به این صورت بوده است که پس از اندازه‌گیری مقدار نانو توسط ترازوی

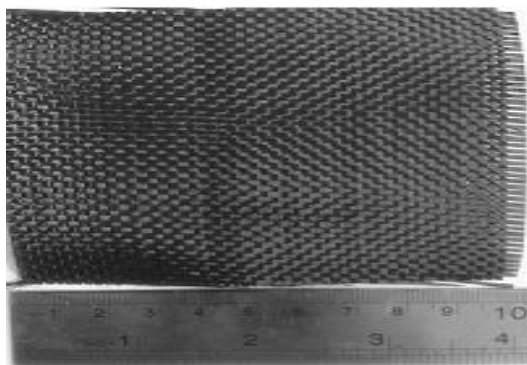


Fig.1 Carbon fiber woven

شکل 1 الیاف بافت‌شده کربنی

ساده مقاومت در برابر سوراخ شدگی بالاتری دارند. گو و همکاران [4] کامپوزیت‌های چندلایه فیبر- فلز، کارال¹ و گلیر² را تحت ضربه سرعت پایین به‌صورت عددی مورد بررسی قرار دادند که نتایج شبیه‌سازی برای کارال، بارهای بحرانی بزرگ‌تر و جابه‌جایی کوچک‌تری تحت انرژی ضربه یکسان نشان می‌دهد، همچنین تأثیر آلیاژهای مختلف آلومینیوم در مقاومت به ضربه کارال را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که با افزایش استحکام تسلیم آلیاژ آلومینیوم، خواص مقاومت به ضربه بهبود می‌یابد. تساریس و همکاران [5] به بررسی مقاومت به ضربه کامپوزیت‌های چندلایه فیبر- فلز تحت ضربه سرعت پایین پرداخته، سپس توانستند طراحی بهینه‌ای را برای مقاومت به ضربه کاربردهای هوافضا ارائه کند، همچنین نشان دادند که کامپوزیت‌های چندلایه فیبر- فلز قادر به جذب انرژی، از طریق تغییر شکل پلاستیک و شکست، بین سطح مشترک لایه‌ها هستند. به‌خصوص لایه‌لایه شدگی‌ها در صفحه پشته‌ی ورق آلیاژ آلومینیوم و مجاور اپوکسی تقویت شده با الیاف و در بین لایه‌ها اتفاق افتاده است. جی فان و همکاران [6] شکست سوراخ در سه نوع لایه چینی مختلف کامپوزیت‌های چندلایه فیبر- فلز را تحت ضربه سرعت پایین مورد بررسی قرار داده و مشاهده کردند که افزایش ضخامت با افزایش لایه چینی منجر به افزایش انرژی سوراخ شدگی می‌شود، همچنین افزایش ضخامت لایه‌های کامپوزیت موجب افزایش مقاومت در برابر ضربه شده است. افزایش اندازه پرتابه و اندازه صفحه منجر به افزایش انرژی سوراخ‌شدگی و تغییر محل برخورد پرتابه، تأثیر اندکی در پاسخ ضربه در این نوع کامپوزیت‌ها دارد. صدیقی و همکاران [7] مقاومت در برابر ضربه کامپوزیت چندلایه فیبر- فلز را با انواع فلز و ضخامت‌های مختلف تحت ضربه سرعت پایین مورد بررسی قرار داده و مشاهده کردند که افزایش ضخامت آلومینیوم موجب بهبود عملکرد کامپوزیت فیبر- فلز تحت ضربه شده است، اما افزایش ضخامت موجب افزایش جرم شده است؛ بنابراین در جاهایی که عامل وزن تأثیرگذار نیست می‌تواند در نظر گرفته شود. هیومینگ نیگ و همکاران [8] بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های چند لایه فیبر- فلز براساس کامپوزیت تقویت شده با کربن و آلومینیوم را با روش‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمون‌ها بهبود در خواص مکانیکی از طریق اچ کردن اسیدی³ و افزودن نانو مواد را نشان می‌دهد که به طور مؤثر سبب بهبود بار بحرانی و چقرمگی شکست مود⁴ می‌شود. زمانی و همکاران [9] پاسخ خواص مکانیکی و ضربه سرعت بالای نانو کامپوزیت‌های پلی‌پروپیلن همراه با نانو لوله‌های کربنی چند جداره را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه استحکام ضربه برای نمونه سوراخ شده نانو کامپوزیتی به دلیل جلوگیری از گسترش ترک افزایش یافته است. مدول ینگ و استحکام تسلیم نانو کامپوزیت‌های پلیمری با افزودن نانو کربن بیشتر شده است. با این حال شکل‌پذیری کامپوزیت با افزایش درصد نانو لوله‌های کربنی چند جداره کاهش یافته است. اسلام و همکاران [10] پاسخ ضربه سرعت پایین کامپوزیت‌های کربن تقویت‌شده را با نانو لوله‌های کربنی چند دیواره با درصدهای جرمی مختلف مورد بررسی قرار دادند. با توجه به نتایج آزمایش براساس محدوده نفوذ و بیشترین نیرو مشاهده شد که با استفاده از نانو لوله‌های کربنی چند دیواره 1.5% از جرم رزین اپوکسی سبب بهبود 50% در انرژی نفوذ شده است. استفاده از نانو لوله‌های کربنی به‌طور مؤثر سبب بهبود پاسخ ضربه سرعت پایین صفحات کامپوزیت کربنی تحت ضربه شده است.

¹ CARALL

² GLARE

³ Acid Etching

⁴ Mode

⁵ Vacuum Assisted Resin Transfer Molding

سیلیکا با لایه‌چینی 2-1 و ضخامت 4.2 میلی‌متر [11] تحت انرژی 40 ژول مورد بررسی قرار گرفت.

ابعاد نمونه کارال ساخته شده 10 در 10 سانتی‌متر است. پرتابه از جنس فولاد به قطر 8 میلی‌متر به طول قسمت استوانه‌ای 30 میلی‌متر و جرم 14 گرم انتخاب شد (شکل 4). جرم مجموعه پرتابه 5.9 کیلوگرم است. با توجه به شکل 5 نگه‌دارنده نمونه به‌صورت دایره‌ای از جنس فولاد در نظر گرفته شد که توسط 12 پیچ بسته می‌شود. قطر ناحیه آزمایش 80 میلی‌متر در نظر گرفته شد.

2-3- استخراج نمودار

داده‌ها پس از انجام آزمایش از شتاب‌سنج به نرم‌افزار دستگاه ضربه افتان انتقال می‌یابد. چون شتاب در بازه زمانی زیادی ثبت و همچنین اثر لرزش و ارتعاش هم ثبت شده، لازم است بخش‌هایی که جزء فرایند ضربه نیست از منحنی پالایش شود. با توجه به اطلاعات حس‌گر استفاده شده در دستگاه آزمایش این حس‌گر فقط می‌تواند فرکانس‌هایی تا 10 کیلوهرتز را شناسایی کند و بعد از آن مقدار پاسخ‌ها صحیح نیست، به همین دلیل فرکانس‌های



Fig.3 Low velocity impact device

شکل 3 دستگاه ضربه سرعت پایین



Fig.4 Projectile of blunt cylinder

شکل 4 پرتابه استوانه‌ای سرتخت

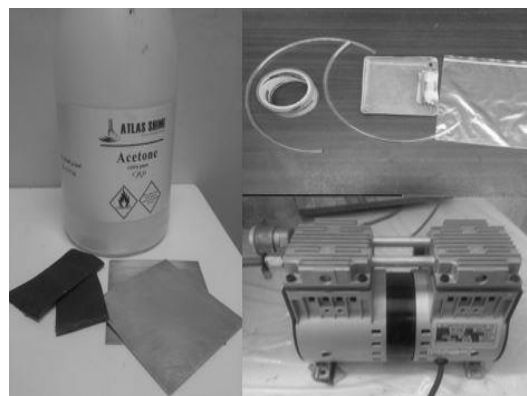


Fig.2 Tools used in manufacture of samples with VARTM method

شکل 2 وسایل مورد استفاده در ساخت نمونه به روش انتقال رزین به داخل قالب توسط خلا

دیجیتال، به‌منظور پخش بهتر نانو ذرات در رزین، رزین اپوکسی توسط استون رقیق شده، مقدار نانو اندازه گرفته شده به رزین اپوکسی رقیق اضافه شده است. ابتدا مخلوط با هم‌زن هم زده شده و سپس به مدت 10 دقیقه سونیکیت شده است.

مخلوط برای بخارشدن استون و حباب‌زدایی درون کوره خلا قرار گرفته است. مخلوط رزین اپوکسی همراه با نانو در دمای محیط گذاشته و سخت‌کننده پس از خنک‌شدن اضافه شده است. رقیق کردن استون برای بهتر حل شدن نانو در رزین اپوکسی است.

در این تحقیق نمونه‌ها با لایه چینی 2-1 که بیانگر دو صفحه آلومینیومی با یک هسته کامپوزیتی است. هسته کامپوزیتی شامل 11 لایه الیاف کربن بافت ساده است. ضخامت میانگین به‌دست‌آمده از روش انتقال رزین به قالب توسط خلا برای هر لایه الیاف کربن بافت ساده 0.2 میلی‌متر است. مشخصات نمونه‌های ساخته شده در جدول 1 آورده شده است.

3- آزمایش

3-1- آزمایش ضربه سرعت پایین

آزمایش‌های ضربه سرعت پایین در دانشگاه صنعتی سهند با استفاده از دستگاه ضربه افتان که قابلیت اندازه‌گیری شتاب را داشت انجام شد (شکل 3).

چهار مجموعه آزمایش انجام شد که مجموعه نخست مربوط به بررسی تکرارپذیری آزمایش برای سه نمونه با لایه چینی 2-1 تحت انرژی 60 ژول، مجموعه دوم مقایسه دو نمونه تقویت شده با نانو سیلیکا و نانو لوله‌های کربن چند دیواره تحت انرژی 20 ژول، مجموعه سوم تحت انرژی 40 ژول و مجموعه چهارم مقایسه نمونه مبتنی بر الیاف کربن بافت ساده تقویت شده با نانو سیلیکا با نمونه مبتنی بر الیاف شیشه بافت ساده تقویت‌شده با نانو

جدول 1 مشخصات نمونه‌ها

Table 1 Sample properties					
نمونه	نوع الیاف	نانو ذره	درصد وزنی	لایه چینی	ضخامت (mm)
1	کربن	-	-	2-1	4.2
2	کربن	سیلیکا	1	2-1	4.2
3	کربن	نانو لوله‌های کربنی چند دیواره	1	2-1	4.2

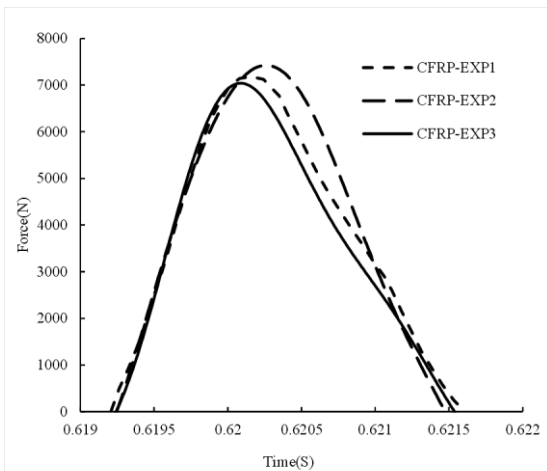


Fig.6 Comparison samples with 2-1 lay-up under 60J impact energy

شکل 6 مقایسه سه نمونه با لایه چینی 2-1 تحت انرژی ضربه 60 ژول



Fig.7 Comparison samples with 2-1 lay-up under 60J impact energy

شکل 7 مقایسه سه نمونه با لایه چینی 2-1 تحت انرژی ضربه 60 ژول

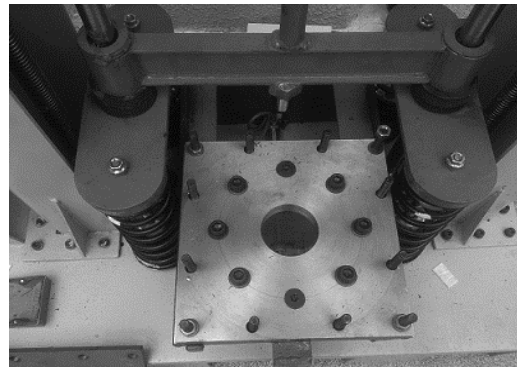


Fig.5 Sample fixture

شکل 5 نگهدارنده نمونه

بالای 10 کیلوهرتز حذف شده است. به این صورت که با استفاده از معادله (1) زمان تقریبی برخورد محاسبه شده و با توجه به این که پرتابه توسط پیستون نگه‌داشته شده و پیستون در لحظه فرمان شروع کنار رفته و پرتابه از طریق میله‌های راهنما سقوط می‌کند، از این‌رو زمان تأخیر به‌طور میانگین 0.2 ثانیه نیز باید به زمان محاسبه شده به صورت رابطه (1) افزوده شود.

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (1)$$

بازه زمان استخراج شده در برنامه دستگاه ضربه افتان پس از استخراج تقریبی زمان برخورد پرتابه قرار گرفته و موقعیت موج ضربه مشخص می‌شود. نمودار شتاب زمان ثبت‌شده به صورت نوسانی بوده و پراکندگی بسیاری دارد. برای استخراج نمودارهای انرژی لازم است نمودار شتاب به صورت پیوسته باشد که با استفاده از نرم‌افزار خود دستگاه منحنی پالایش و پیوسته می‌شود.

4- نتایج و بحث

برای کامپوزیت آلومینیوم-کربن جذب انرژی می‌تواند به‌صورت بهم پیوستگی ترک به لایه آلومینیومی به دلیل سفتی بالای الیاف کربن، فرو رفتگی لایه اول، شکست الیاف و شکل‌گیری پتال آلومینیوم در قسمت پشتی باشد. چگونگی تغییر شکل نقش مؤثری در میزان جذب انرژی دارد.

شکل 6 تکرارپذیری آزمایش ضربه سرعت پایین تحت انرژی 60 ژول را برای نمونه‌ها با لایه چینی 2-1 بر پایه الیاف کربن بافت ساده نشان می‌دهد. برای هر سه منحنی سطح زیر نمودار محاسبه شد که میزان ضربه را نشان می‌دهد. مقدار ضربه برای آزمایش اول 9.31، آزمایش دوم 9.61 و آزمایش سوم 8.75 بر حسب نیوتن بر ثانیه به‌دست آمد. درصد اختلاف مقدار ضربه با در نظر گرفتن آزمایش نخست به‌عنوان مبنا برای نمونه دوم 3.3% و برای نمونه سوم 5.8% به‌دست آمده است که نشان می‌دهد اختلاف جزئی در بین نمونه‌ها وجود دارد و این نیز ناشی از خطاهای آزمایشگاهی می‌شود.

شکل 7 سطوح پشتی هر سه نمونه مربوط به آزمایش بررسی تکرارپذیری تحت انرژی 60 ژول را نشان می‌دهد. با توجه به شکل هر سه نمونه پس از ضربه سوراخ شده و دارای آسیب صفحه پشتی یکسانی هستند. شکل 8 منحنی نیرو-زمان برای دو نمونه با لایه چینی 2-1 با دو نوع نانو ذره متفاوت تحت انرژی ضربه 20 ژول را نشان می‌دهد. هر دو منحنی در مراحل بارگذاری و بار برداری رفتار مشابهی از خود نشان داده‌اند.

با محاسبه سطح زیر منحنی برای هر دو منحنی مشاهده می‌شود که مقدار مقاومت در برابر ضربه برای نمونه تقویت شده با نانو لوله‌های کربنی 23.04 نیوتن بر ثانیه و برای نمونه تقویت شده با نانو سیلیکا مقدار ضربه



Fig.9 Aluminum front face damage a) with MWCNT b) with nano silica

شکل 9 آسیب صفحه آلومینیوم جلویی (الف) همراه با نانو لوله‌های کربن چند دیواره (ب) همراه با نانو سیلیکا

تقویت‌شده با نانو لوله‌های کربنی چند دیواره و نمونه تقویت‌شده با نانو سیلیکا در جدول 2 آورده شده است. براساس مقادیر به‌دست‌آمده در جدول 2 مشاهده می‌شود که انرژی جذب‌شده توسط نمونه تقویت‌شده با نانو لوله‌های کربن چند دیواره نسبت به نانو سیلیکا بیشتر است.

لایه‌لایه‌شدگی از حالت‌های آسیب رایج در ساختار کامپوزیت‌های چند لایه فیبر-فلز تحت ضربه سرعت پایین است که میان لایه‌های کامپوزیتی یا لایه کامپوزیتی با لایه فلزی گسترش می‌یابد. این لایه‌لایه‌شدگی در نمونه با الیاف کربن بافت ساده همراه با نانو لوله‌های کربنی مشاهده می‌شود، درحالی که لایه‌لایه‌شدگی در نمونه تقویت‌شده با نانو سیلیکا کمتر و نشان می‌دهد که انرژی جذب‌شده در نمونه با الیاف کربن بافت ساده همراه با نانو لوله‌های کربنی بیشتر از نمونه تقویت‌شده با نانو سیلیکا است. گسترش لایه‌لایه‌شدگی در لایه‌های کامپوزیتی بافت ساده به عوامل متعددی مانند کرنش الیاف، چقرمگی رزین و ضخامت کلی نمونه بستگی دارد. تغییری که در منحنی

جدول 2 مقدار انرژی جذب‌شده هدف

نمونه	انرژی ضربه (J)	مقدار ضربه (Ns)	انرژی جذب‌شده (J)
نمونه تقویت‌شده با نانولوله‌های کربن چند دیواره	40	24.68	39.26
نمونه تقویت‌شده با نانو سیلیکا	40	10.41	29.13

16.68 نیوتن بر ثانیه به‌دست‌آمده است که دارای درصد اختلاف 38.12 نیوتن بر ثانیه است. میزان مقادیر به‌دست‌آمده نشان‌دهنده این است که مقدار مقاومت در برابر ضربه نمونه تقویت‌شده با نانو لوله‌های کربنی بیش از نمونه تقویت‌شده با نانو سیلیکا است. منحنی نمونه تقویت‌شده با نانو لوله‌های کربنی نشان‌دهنده این موضوع است که استفاده از نانو لوله‌های کربنی در کامپوزیت‌های چندلایه کربن-آلومینیوم نسبت به نمونه‌های تقویت‌شده با نانو سیلیکا موجب بهبود عملکرد نمونه در کاهش ناحیه آسیب در منطقه نفوذ تحت ضربه سرعت پایین می‌شود. چسبندگی بهتر نانو لوله‌های کربنی و ایجاد اتصال بین لایه‌ای قوی از دیگر عوامل تأثیرگذار در پاسخ ضربه نمونه تقویت‌شده با نانو لوله کربن چند دیواره نسبت به نانو سیلیکا است.

شکل 9 سطح جلویی دو نمونه بر پایه الیاف کربن بافت ساده همراه با دو نوع تقویت‌کننده متفاوت را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود مقدار فرورفتگی در نمونه تقویت‌شده با نانو لوله‌های کربنی چند دیواره کمتر از نمونه تقویت‌شده با سیلیکا است که مقاومت بیشتر نمونه را نشان می‌دهد. با توجه به این که عمق نفوذ در نمونه تقویت‌شده با نانو سیلیکا بیشتر است؛ بنابراین نیروی عکس‌العمل از نمونه نسبت به نمونه تقویت‌شده با نانو لوله‌های کربن کمتر است.

در شکل 10 دو نمونه تقویت‌شده با نانو تحت انرژی ضربه 40 ژول مقایسه شده است. برای به‌دست‌آوردن مقدار انرژی جذب‌شده نمونه از سطح زیر منحنی نیرو-زمان انتگرال گرفته شده که سطح کلی به صورت رابطه (2) به‌دست‌آمده است.

$$A_{\text{total}} = \int_0^{\infty} F(t) dt \quad (2)$$

سپس با استفاده از رابطه (3) مقدار انرژی جذب‌شده توسط نمونه به‌دست می‌آید.

$$E_{\text{total}} = v_0 \times A_{\text{total}} \left(1 - \frac{v_0 \times A_{\text{total}}}{4E_{\text{impact}}} \right) \quad (3)$$

E_{total} انرژی جذب‌شده توسط نمونه، v_0 سرعت ضربه و E_{impact} انرژی ضربه است [12]. مقادیر به‌دست‌آمده از میزان انرژی جذب‌شده برای نمونه

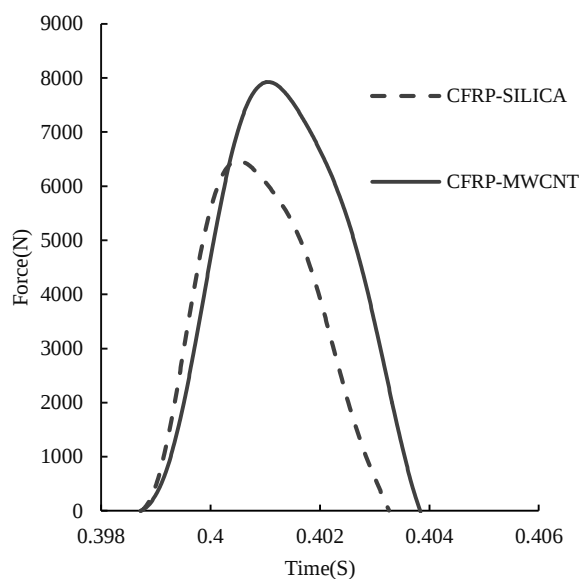


Fig.8 Comparison of two samples with 2-1 lay-up under 20j impact
شکل 8 مقایسه دو نمونه با لایه چینی 2-1 تحت ضربه 20 ژول



Fig.11 Aluminum back face damage a) with MWCNT b) with nano silica

شکل 11 آسیب صفحه آلومینیوم پشتی (الف) همراه با نانو لوله‌های کربنی چند دیواره (ب) همراه با نانو سیلیکا

جدول 3 مقدار انرژی جذب‌شده هدف

انرژی ضربه	مقدار ضربه	انرژی جذب‌شده	نمونه
(J)	(Ns)	(J)	
40	18.07	38.85	گلیر تقویت‌شده با نانو سیلیکا
40	10.41	29.13	کارال تقویت‌شده با نانو سیلیکا

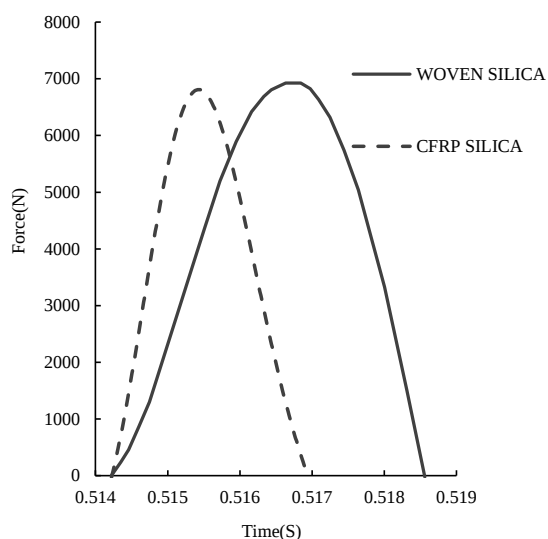


Fig.12 Comparison of two samples with 2-1 lay-up under 40j impact

شکل 12 مقایسه دو نمونه با لایه چینی 2-1 تحت ضربه 40 ژول

مربوط به نمونه تقویت‌شده با نانو لوله‌های کربنی مشاهده می‌شود مربوط به برخورد و برگشت پرتابه از سطح نمونه است در حالی که در نمونه تقویت‌شده با نانو سیلیکا پرتابه در 3 میلی ثانیه از نمونه را سوراخ کرده است. آسیب صفحه پشتی آلومینیوم در دو نمونه شکل 11 مشاهده می‌شود. در نمونه تقویت‌شده با نانو لوله‌های کربنی پرتابه سبب فرورفتگی در نمونه شده و تنها جابه‌جایی آلومینیوم صفحه پشتی را موجب شده است، در نمونه تقویت‌شده با نانو سیلیکا نمونه به‌طور کامل سوراخ شده است. مقایسه دو نمونه بر پایه الیاف کربن بافت ساده تقویت‌شده با نانو سیلیکا و الیاف شیشه بافت ساده تقویت‌شده با نانو سیلیکا [11] در شکل 12 نشان داده شده است.

رفتار منحنی پاسخ به ضربه کارال و گلیر تقویت شده با نانو سیلیکا یکسان است، ولی مقدار مقاومت در برابر ضربه نمونه الیاف شیشه بافته شده نسبت به نمونه الیاف کربن بافته‌شده بیشتر است، تأثیر منفی ذرات نانو سیلیکا در الیاف کربن از دلایل این تفاوت مقدار مقاومت به ضربه است. کارال مقدار تماس زمانی کم‌تری به دلیل استحکام و سفتی بالاتر داراست. رفتار سفتی کارال موجب جابه‌جایی مرکزی نهایی کوچک‌تری نسبت به گلیر می‌شود.

در جدول 3 مقادیر انرژی جذب‌شده برای نمونه‌های گلیر تقویت شده با نانو سیلیکا و نمونه کارال تقویت‌شده با نانو سیلیکا به‌دست آمده است. نمونه گلیر تقویت‌شده با نانو سیلیکا براساس نتایج به‌دست‌آمده در جدول 3 میزان انرژی بیشتری نسبت به نمونه کارال تقویت‌شده با نانو سیلیکا جذب کرده است.

تفاوت نوع آسیب در صفحه جلویی آلومینیوم برای دو نمونه الیاف کربن بافته‌شده و الیاف شیشه بافته‌شده تقویت‌شده با نانو سیلیکا در شکل 13 مشاهده می‌شود. مقدار نیروی تماسی بیشتر موجب ایجاد تنش بیشتر و عیوب در کامپوزیت شده که کاهش مقاومت به ضربه نمونه مبتنی بر الیاف کربن تقویت‌شده با نانو سیلیکا را منجر شده است. سازه هر اندازه انرژی بیشتری جذب کند، کمتر دچار عیوب شود، با توجه به شکل 13 مقاومت به

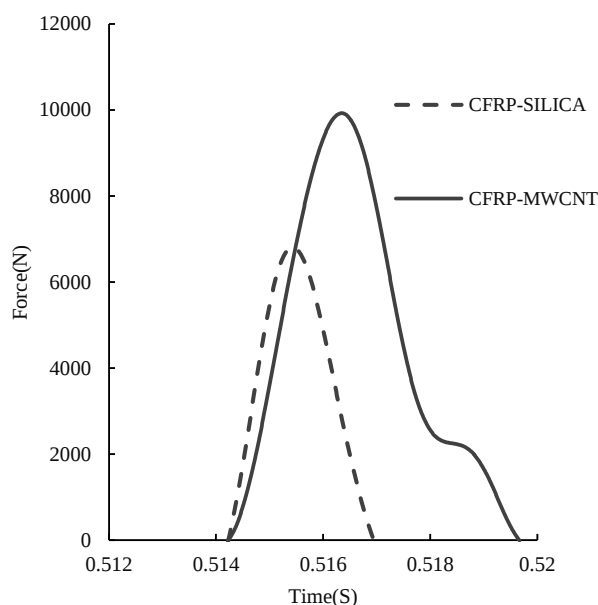


Fig.10 Comparison of two samples with 2-1 lay-up under 40j impact

شکل 10 مقایسه دو نمونه با لایه چینی 2-1 تحت ضربه 40 ژول

نسبت به نانو سیلیکاست.

مقایسه دو نمونه کارال و گلیر تقویت‌شده با نانو سیلیکا نشان داد که تقریباً دارای رفتار پاسخ به ضربه یکسانی هستند، در حالی که کارال مقادیر تماسی زمانی کم‌تری به دلیل استحکام و سفتی بالاتر دارد. رفتار سفتی کارال موجب جابه‌جایی مرکزی نهایی کوچک‌تری نسبت به گلیر شده، میزان انرژی جذب‌شده گلیر نیز نسبت به کارال بیشتر است.

6- تقدیر

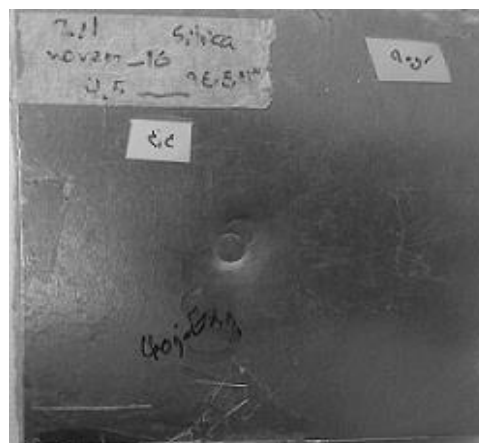
از حمایت‌های بی‌دریغ سازمان تحقیقات و جهاد خودکفایی نازجا برای یاری و همکاری در انجام و اتمام این پروژه کمال تشکر را دارد.

7- مراجع

- [1] S. Song, Y. Byun, T. Ku, W. Song, J. Kim, B. Kang, Experimental and numerical investigation on impact performance of carbon reinforced aluminum laminates, *Materials Science & Technology*, Vol. 26, No. 4, pp. 327-332, 2010.
- [2] G. Rajkumar, M. Krishna, H. N. Murthy, S. Sharma, K. V. Mahesh, Investigation of repeated low velocity impact behaviour of GFRP/Aluminium and CFRP/Aluminium laminates, *Soft Computing and Engineering*, Vol. 1, No. 6, pp. 50-58, 2012.
- [3] J. Fan, W. Cantwell, Z. Guan, The low-velocity impact response of fiber-metal laminates, *Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 30, No. 1, pp. 26-35, 2011.
- [4] G.-C. Yu, L.-Z. Wu, L. Ma, J. Xiong, Low velocity impact of carbon fiber aluminum laminates, *Composite Structures*, Vol. 119, pp. 757-766, 2015.
- [5] N. Tsartsaris, M. Meo, F. Dolce, U. Polimeno, M. Guida, F. Marulo, Low-velocity impact behavior of fiber metal laminates, *Composite Materials*, Vol. 45, No. 7, pp. 803-814, 2011.
- [6] J. Fan, Z. Guan, W. Cantwell, Numerical modelling of perforation failure in fibre metal laminates subjected to low velocity impact loading, *Composite structures*, Vol. 93, No. 9, pp. 2430-2436, 2011.
- [7] M. Sadighi, T. Pärnänen, R. Alderliesten, M. Sayeefabi, R. Benedictus, Experimental and numerical investigation of metal type and thickness effects on the impact resistance of fiber metal laminates, *Applied Composite Materials*, Vol. 19, No. 3-4, pp. 545-559, 2012.
- [8] H. Ning, Y. Li, N. Hu, M. Arai, N. Takizawa, Y. Liu, L. Wu, J. Li, F. Mo, Experimental and numerical study on the improvement of interlaminar mechanical properties of Al/CFRP laminates, *Materials Processing Technology*, Vol. 216, pp. 79-88, 2015.
- [9] M. M. Zamani, A. Fereidoon, A. Sabet, Multi-walled carbon nanotube-filled polypropylene nanocomposites: high velocity impact response and mechanical properties, *Iranian Polymer*, Vol. 21, No. 12, pp. 887-894, 2012.
- [10] E. M. Soliman, M. P. Sheyka, M. R. Taha, Low-velocity impact of thin woven carbon fabric composites incorporating multi-walled carbon nanotubes, *Impact Engineering*, Vol. 47, pp. 39-47, 2012.
- [11] R. Amooyi Dizaji, M. Yazdani, An experimental investigation of the effect of 3D fabric in the amount of energy absorbed in the GLARE composite, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 49-54, 2016. (in Persian)
- [12] B. Alcock, N. Cabrera, N.-M. Barkoula, T. Peijs, Low velocity impact performance of recyclable all-polypropylene composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 66, No. 11, pp. 1724-1737, 2006.



(الف)
a)



(ب)
b)

Fig.13 Aluminum front face damage a) CARALL b) GLARE

شکل 13 آسیب صفحه آلومینیوم جلویی الف) کارال ب) گلیر

ضربه آن نیز مناسب‌تر است، که نمونه مبتنی بر الیاف شیشه بافت ساده تقویت‌شده با نانو سیلیکا مقاومت به ضربه بهتری در مقایسه با نمونه مبتنی بر الیاف کربن بافته‌شده تقویت‌شده با نانو سیلیکا از خود نشان داده است.

5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر تقویت کامپوزیت‌های چندلایه کربن-آلومینیوم با استفاده از نانو لوله‌های کربنی چند دیواره و سیلیکا تحت ضربه سرعت پایین بررسی شده است. استفاده از نانو لوله‌های کربنی به‌طور مؤثر سبب بهبود پاسخ ضربه سرعت پایین صفحه‌های کامپوزیتی تحت ضربه شده است، همچنین نمونه تقویت شده با نانو لوله‌های کربنی چند دیواره به میزان 21.53% نیوتن تحت انرژی 20 ژول و 44.11% نیوتن تحت انرژی 40 ژول مقاومت در برابر ضربه بیشتری از خود نشان داده است.

نانولوله‌های کربنی چند دیواره نسبت به نانو سیلیکا موجب افزایش جذب انرژی در نمونه‌های کارال شده است.

چسبندگی بهتر نانو لوله‌های کربنی و ایجاد اتصال بین لایه‌ای قوی از عوامل تأثیرگذار در پاسخ ضربه نمونه تقویت‌شده با نانو لوله کربن چند دیواره