



بررسی آزمایشگاهی خواص بالستیک سازه‌های ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی فلز-فایبر و هسته فوم ترکیبی تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی

محمود خاشعی و رنامخواستی¹، احسان احمدی^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد لنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان

2- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد لنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان

* اصفهان، صندوق پستی 84741-68333، Ahmadi@iauln.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

در این مقاله خواص بالستیک سازه‌های ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی فلز-فایبر و هسته فوم ترکیبی تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی به‌صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. برای ساخت فوم ترکیبی از رزین اپوکسی و میکروبالن‌های شیشه‌ای با کسر حجمی 30%، 40% و 55% استفاده شده است. علاوه بر این، یک سری نمونه تقویت‌شده با کسر حجمی 40% میکروبالن و 4% نانولوله کربنی چند جداره نیز ساخته شده است. رویه‌های کامپوزیتی فلز-فایبر نیز در هر طرف از یک لایه آلومینیوم و دو لایه کامپوزیت پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه تشکیل شده است. سازه‌ها با استفاده از دستگاه تفنگ گازی و پرتابه سرمخروطی تحت آزمایش ضربه سرعت بالا قرار گرفته‌اند. از نتایج این آزمایش‌ها برای بررسی اثر کسر حجمی میکروبالن و تقویت هسته فوم ترکیبی با نانولوله کربنی بر پارامترهای رفتار بالستیک سازه از جمله سرعت باقیمانده پرتابه، سرعت حد بالستیک و انرژی نفوذ سازه استفاده شده است. نتایج نشان داده است که افزایش کسر حجمی میکروبالن تا 40% موجب کاهش سرعت باقیمانده پرتابه و افزایش سرعت حد بالستیک و انرژی نفوذ سازه می‌شود. در حالیکه با افزایش بیشتر کسر حجمی میکروبالن، این اثر معکوس شده است. همچنین نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه تقویت هسته فوم ترکیبی با نانولوله‌های کربنی بر خواص بالستیک این سازه بوده است.

دریافت: 1402/12/24

پذیرش: 1403/05/26

کلیدواژگان

فوم ترکیبی تقویت‌شده، خواص بالستیک، ضربه سرعت بالا، نانولوله کربنی، رویه فلز-فایبر

Experimental investigation of ballistic properties of sandwich structures with syntactic foam core and fiber-metal laminate skins

Mahmoud Khashei Varnamkhasti¹, Ehsan Ahmadi^{2*}

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

* P.O.B. 84741-68333, Isfahan, Iran, Ahmadi@iauln.ac.ir

Keywords

Reinforced Syntactic Foam, Ballistic Properties, High-Velocity Impact, Carbon Nanotubes, Fiber-Metal Laminate Skins

Abstract

In this paper, an experimental investigation was conducted to study the ballistic properties of sandwich structures with fiber-metal laminate skins and reinforced syntactic foam core with carbon nanotubes. The syntactic foam was produced using epoxy resin and glass microballoon with volume fractions of 30%, 40%, and 55%. In addition, a series of reinforced samples was created using 40% volume fraction of microballoon and 4% multi-walled carbon nanotubes. The composite fiber-metal laminate skins on each side of the cores were made of one aluminum layer sheet and two layers of glass fiber reinforced polymer composite (GFRP). The structures were subjected to high-velocity impact tests using a gas gun and a conical head projectile. The results were analyzed to determine the effects of microballoon volume fraction and carbon nanotubes reinforced foam on the ballistic behavior of sandwich structures. The experiments showed that increasing microballoon volume fraction up to 40% decreased the projectile residual velocity and increased the ballistic limit velocity and penetration energy. Furthermore, reinforcing syntactic foam with carbon nanotubes significantly affected the ballistic properties of the structure.

1- مقدمه

ترکیب مواد در ساخت قطعات احساس می‌گردد. در این صنایع به محصولاتی نیاز است که ضمن داشتن استحکام بالا، وزن کمی داشته و به اندازه کافی سبک باشند. همچنین مقاومت به ضربه خوبی داشته و در دماهای بالا استحکام خود را از دست ندهند. از این‌رو نقش مواد کامپوزیتی و سازه‌های ساندویچی

امروزه در بسیاری از کاربردهای مهندسی، امکان استفاده از یک نوع ماده که همه خواص موردنظر را داشته و کلیه نیازهای مرتبط را برآورده سازد وجود نداشته و در بسیاری از صنایع مانند صنایع هوافضا و صنایع دریایی، نیاز به

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Khashei Varnamkhasti, M., Ahmadi, E., "Experimental investigation of ballistic properties of sandwich structures with syntactic foam core and fiber-metal laminate skins," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 11, No. 2, pp. 2458-2467, 2024.

https://doi.org/10.22068/JSTC.2024.2024144.1879

نمونه‌های کامپوزیت‌های نانولوله کربنی، مربوط به استفاده از 0.3 درصد وزنی از نانولوله کربنی در فاز زمینه می‌باشد.

در پژوهش دیگری باوفا بیگدیلو و همکاران [9] به بررسی تأثیر افزودن نانولوله کربنی چند جداره بر رفتار ضربه سرعت بالای کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف کولار و الیاف پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بالا با چیدمان لایه‌لایه پرداختند. آن‌ها نمونه‌های کامپوزیتی هیبریدی ساخته‌شده در درصدهای وزنی 0.1، 0.3، 0.5 و 0.9 از نانولوله کربنی را تحت آزمایش ضربه سرعت بالا با پرتابه نوک‌تیز قرار دادند که نتایج به‌دست‌آمده نشان داد جذب انرژی برای نمونه حاوی 0.1 درصد وزنی نانولوله کربنی نسبت به نمونه بدون نانو به میزان 13.56 درصد افزایش یافته است.

ایساکلور و همکاران [10] نیز بر روی دیگر خواص فیزیکی فوم ترکیبی تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی از قبیل مقاومت در مقابل نفوذ مواد نفتی و روغن تحقیق کرده‌اند. آن‌ها دریافتند که به‌دلیل مقاومت خوب این مواد در مقابل نشت آب، مواد نفتی و روغنی، می‌توان از آن‌ها به‌عنوان عایق استفاده کرد. در یکی از معدود مطالعات رفتار فوم ترکیبی تقویت‌شده تحت ضربه سرعت بالا، حامد احمدی و همکاران [11] سازه‌های ساندویچی با هسته فوم ترکیبی با کسر حجمی‌های 20%، 40% و 60% میکروبالن را با استفاده از تفنگ گازی⁷ و پرتابه فولادی سرتخت، تحت آزمایش ضربه سرعت بالا قرار داده‌اند. نتایج این تحقیق نشان داده است که نمونه‌های ساخته‌شده با کسر حجمی 40% میکروبالن دارای مقاومت به ضربه بهتری نسبت به بقیه نمونه‌ها بوده‌اند. همچنین آن‌ها هسته تعدادی از نمونه‌ها را با نانورس⁸ تقویت کرده‌اند که این کار موجب افزایش سرعت حد بالستیک در حدود 10% گردیده است. در مطالعه دیگری خدادادی و همکاران [12] عملکرد بالستیکی چندلایه‌های کامپوزیتی دو و چهار لایه ساخته‌شده از پارچه کولار و رزین اپوکسی را مورد بررسی قرار دادند. نمونه‌های ساخته‌شده، با استفاده از تفنگ گازی و پرتابه‌های سرکروی و سرتخت تحت آزمایش ضربه بالستیک قرار گرفته و حد بالستیک و انرژی جذب‌شده، مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد حد بالستیک برای کامپوزیت دو و چهار لایه تحت ضربه پرتابه سرتخت، به ترتیب 32.5 متر بر ثانیه و 43.7 می‌باشد که نسبت به پرتابه سرکروی 14 و 16 درصد افزایش دارد. مطالعات صورت گرفته بر روی خواص بالستیک سازه‌های ساندویچی با هسته فوم ترکیبی، تا حد زیادی اهمیت تقویت هسته را در این سازه‌ها نشان می‌دهد. از طرف دیگر با توجه به تحقیقاتی که تا به امروز انجام شده است به نظر می‌رسد بررسی اثر استفاده همزمان از ویژگی‌های فلز، کامپوزیت پلیمری و فوم ترکیبی تقویت‌شده بر خواص بالستیک سازه‌های ساندویچی می‌تواند تا اندازه زیادی راهگشا و کاربردی بوده ولی کمتر مورد توجه محققین بوده است که این مسئله ضرورت انجام این مطالعه را دوچندان می‌کند.

به همین منظور در پژوهش حاضر، به‌عنوان یک طراحی جدید و نوآورانه، سازه‌های ساندویچی با هسته فوم ترکیبی که در هر طرف با یک لایه آلومینیوم و دو لایه کامپوزیت پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه پوشانده شده، مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. هسته فوم ترکیبی به دو صورت ساده و تقویت‌شده با نانولوله کربنی در نظر گرفته شده و پارامتر کسر حجمی میکروبالن (ϕ) نیز متغیر بوده است. سازه‌ها با استفاده از دستگاه تفنگ گازی تک‌مرحله‌ای و پرتابه آلومینیومی سر مخروطی تحت آزمایش ضربه سرعت بالا قرار گرفته‌اند. از نتایج این آزمایش‌ها برای بررسی اثر کسر حجمی میکروبالن و تقویت هسته فوم

ساخته‌شده از مواد سبکی همچون کامپوزیت‌های تقویت‌شده بسیار پررنگ و پراهمیت بوده و روز به روز توجه بیشتری را به خود جلب می‌کند. به‌عنوان نمونه حیدری شاهملکی و همکاران [1] در پژوهش خود از الیاف گیاهی پنبه و رزین اپوکسی برای ساخت هسته‌های موجی کسینوسی یک‌طرفه و دو طرفه در سازه‌های ساندویچی استفاده کرده‌اند. نتایج این تحقیق نشان داده است که سازه‌های تقویت‌شده با الیاف پنبه، خواص خمشی بهتری نسبت به نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه دارند.

یکی از مواد کامپوزیتی که امروزه برای ساخت هسته سازه‌های ساندویچی بسیار مورد توجه قرار گرفته است فوم‌های ترکیبی¹ می‌باشند. فوم‌های ترکیبی موادی مهندسی هستند که از یک رزین به‌عنوان ماتریس و میکروبالن² به‌عنوان تقویت‌کننده تشکیل شده‌اند. با توجه به خواص بسیار مطلوب این مواد از جمله سبکی، استحکام فشاری بالا، جذب آب و ثابت دی‌الکتریک پایین، فوم‌های ترکیبی کاربردهای روزافزونی در صنایع مختلف به‌ویژه صنایع حمل‌ونقل و هوافضا، پیدا کرده‌اند [2].

سازه‌های ساندویچی با هسته فوم ترکیبی از جمله سازه‌هایی هستند که با ایجاد نسبت استحکام به وزن بالا، به‌طور گسترده‌ای در صنایع هوایی استفاده می‌شوند. این سازه‌ها معمولاً در طول عمر کاری خود در معرض پرتابه‌هایی با سرعت بالا قرار می‌گیرند که می‌تواند آسیب جدی به عملکرد آن‌ها وارد کند. باید توجه داشت که رفتار رویه‌ها و هسته سازه‌های ساندویچی، هر دو می‌توانند بر عملکرد این سازه‌ها در مقابل ضربه‌های سرعت بالا مؤثر باشند [3]. یکی از مطالعاتی که به بررسی اثر پارامترهای مختلف سازه ساندویچی با هسته فوم ترکیبی تحت ضربه سرعت بالا³ پرداخته است، پژوهش احسان احمدی و همکاران [4] است که رفتار نفوذ در سازه‌های ساندویچی با هسته فوم ترکیبی و لایه‌های فلز-فایبر⁴ (FML) را تحت ضربه سرعت بالا به‌صورت عددی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این پژوهش اثر پارامترهای ضخامت هسته، ضخامت لایه فلز-فایبر و سرعت ضربه، بر رفتار نفوذ⁵ سازه ساندویچی بررسی شده است. این محققین در پژوهشی دیگر، تأثیر شکل پرتابه، جرم پرتابه و ترتیب چیدمان لایه‌های فلز-فایبر را نیز بر رفتار بالستیک سازه‌های ساندویچی با هسته فوم ترکیبی به‌صورت عددی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار داده‌اند [5].

مطالعات مختلفی نیز بر روی رفتار فوم‌های ترکیبی تقویت‌شده صورت گرفته است. فنگ‌لینگ‌بانو و همکاران [6] رفتار نمونه‌هایی از فوم ترکیبی با کسر حجمی‌های 50% و 70% میکروبالن و تقویت‌شده با نانولوله کربنی⁶ (0.6% و 1.2%) را تحت آزمایش کشش، فشار و ضربه سرعت پایین مطالعه کرده‌اند.

در پژوهشی دیگر، آنیروود و همکاران [7] بر روی خواص فوم ترکیبی تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی کار کرده‌اند. آن‌ها دریافتند که نحوه توزیع و پراکندگی نانولوله‌های کربنی در ساختار فوم ترکیبی می‌تواند تأثیر بسزایی بر روی بعضی از خواص مکانیکی آن داشته باشد. بشیری گودرزی و همکاران [8] با اضافه کردن مواد نانولوله کربنی با درصد وزنی‌های 0.1، 0.3 و 0.5 در فاز زمینه کامپوزیت متشکل از رزین اپوکسی و الیاف بازالت، نمونه‌های ساخته‌شده را برای تعیین میزان تغییرات انرژی جذب‌شده شکست، تحت آزمون ضربه شارپی قرار داده و مشاهده کردند بیشترین میزان انرژی ضربه جذب‌شده در

⁵ Penetration behavior

⁶ Carbon Nano Tube (CNT)

⁷ Gas gun

⁸ Nano clay

¹ Syntactic foam

² Microballoon

³ High-Speed Impact

⁴ Fiber-Metal laminates

بافت حصیری^۵ بوده که دارای مقاومت مکانیکی بالا می‌باشند [17]. مشخصات مکانیکی این الیاف شیشه با نام تجاری EWR200 در جدول 5 آورده شده است.

2-5- آلومینیوم: به‌منظور تقویت هسته در مقابل بارهای جانبی و ضربه، از یک لایه ورق آلومینیومی از نوع 3105B در هر طرف آن استفاده شده است. مشخصات فنی و فیزیکی ورق آلومینیومی استفاده‌شده، در جدول 6 آورده شده است [18].

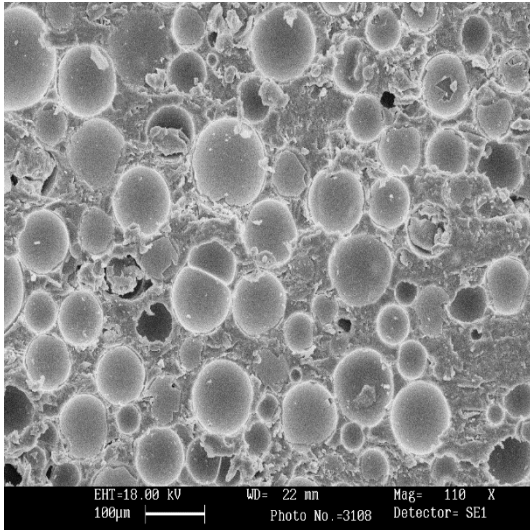


Fig. 1 Scanning Electron Microscope of Syntactic foam
شکل 1 تصویر میکروسکوپ الکترونی فوم ترکیبی

ترکیبی با نانولوله کربنی بر پارامترهای رفتار بالستیک سازه از جمله سرعت باقیمانده پرتابه، سرعت حد بالستیک و انرژی نفوذ سازه استفاده شده است.

2- مواد

1-1- رزین: به‌منظور ساخت هسته از ترکیب رزین و میکروبالن استفاده می‌شود. رزین استفاده‌شده در این پژوهش از نوع اپوکسی ELR440 بوده که علاوه بر ارزان و در دسترس بودن، دارای خواص مکانیکی مطلوبی از جمله قدرت چسبندگی مناسب، چقرمگی، سختی و مقاومت بالا در مقابل سایش، مواد شیمیایی و رطوبت و جمع شدگی^۱ کم بوده و به‌دلیل نداشتن بو و سمی نبودن، کار با آن ساده و بی‌خطر می‌باشد. مشخصات فنی رزین مذکور در جدول 1 آورده شده است [13].

2-2- میکروبالن: به پودرهای پلیمری گفته می‌شود که از بالن‌های بسیار کوچک از جنس پلیمر ساخته شده‌اند و به‌منظور کاهش وزن و چگالی سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. میکروبالن مورد استفاده در این پژوهش از نوع شیشه‌ای با نام تجاری H38H ساخت کشور چین و سفیدرنگ می‌باشد که تصویر میکروسکوپی آن در شکل 1 و مشخصات فنی آن در جدول 2 ارائه شده است [14].

3-2- نانولوله کربنی: این مواد ساختارهای حلقوی توخالی و متشکل از اتم‌های کربن داشته که دارای خواص فلزی و شبه رسانایی نیز هستند. نانولوله استفاده‌شده در این پژوهش از نوع نانولوله کربنی چند جداره^۲ (MWCNT) بوده که اطلاعات کامل آن در جدول‌های 3 و 4 آورده شده است [15، 16].

4-2- الیاف شیشه: الیافی که به‌منظور ساخت کامپوزیت پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه^۴ (GFRP) استفاده شده است از نوع الیاف شیشه با

جدول 1 مشخصات فنی رزین اپوکسی ELR440 [13]

Table 1 Technical specifications of epoxy resin ELR440 [13]

نام تجاری	مقاومت فشاری (kgf/cm ²)	مقاومت خمشی (kgf/cm ²)	استحکام کششی (kgf/cm ²)	چگالی (gr/cm ³)	مقاومت چسبندگی (kf)	مقاومت ضربه‌ای (kJ/m ²)
ELR440	751	652	503	0.1	85	6.398

جدول 2 مشخصات فنی پودر میکروبالن H38H [14]

Table 2 Technical specifications of microballoon powder H38H [14]

نام تجاری	چگالی متوسط (gr/cm ³)	اندازه متوسط (µm)	استحکام خردشدگی (MPa)	هدایت حرارتی (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	قابلیت شناوری (GPa)
H38H	0.38	50	38	0.054	92-96

جدول 3 مشخصات فیزیکی پودر نانولوله کربنی [15]

Table 3 Physical specifications of carbon nanotube powder [15]

مدول یانگ (GPa)	استحکام کششی (GPa)	رسانایی گرمایی (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	رسانایی الکتریکی (S/M)	چگالی (gr/cm ³)
1200	1500	3000	10 ⁵ -10 ⁷	2.6

جدول 4 مشخصات هندسی و اجزاء تشکیل‌دهنده پودر نانولوله کربنی [16]

Table 4 Geometrical specifications and Components of carbon nanotube powder [16]

تعداد دیواره‌ها (لایه)	قطر داخلی (mm)	قطر خارجی (mm)	ضخامت جداره (nm)	طول (nm)	کربن (%)	کلر (%)	آهن (%)	نیکل (%)
42-56	5-10	20-30	0.36	10000-30000	98.39	0.45	0.23	0.93

⁴ Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)

⁵ Woven

¹ Shrinkage

² Multi-Walled Carbon Nano Tube (MWCNT)

³ Glass fiber

جدول 5 مشخصات مکانیکی الیاف شیشه [17]

Table 5 Mechanical specifications of glass fiber [17]

نام تجاری	تعداد نخ‌ها در پارچه (root/cm)		جرم واحد طول (gr/m)	مقاومت در برابر شکست (N)		عرض (mm)
	نخ تار	نخ پود		نخ تار	نخ پود	
EWR200	6	5	200±15	1300	1100	1000

جدول 6 مشخصات فنی و فیزیکی ورق آلومینیومی [18]

Table 6 Technical & physical specifications of aluminum sheet [18]

نام آلیاژ	نام تجاری	ابعاد ورق (m)	جرم واحد سطح (kg/m ²)	چگالی (kg/m ³)	ضخامت (mm)
3105B	MFG J678	1×2	1.62	2700	0.3

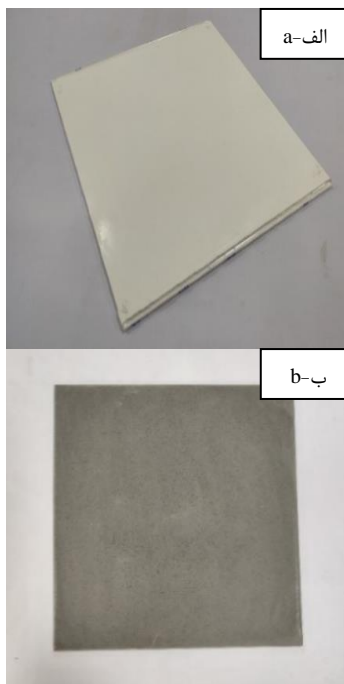


Fig. 2 a) Syntactic foam core without carbon nanotube, b) Syntactic foam core reinforced with carbon nanotube

شکل 2 الف) هسته فوم ترکیبی بدون نانولوله کربنی، ب) هسته فوم ترکیبی تقویت‌شده با نانولوله کربنی

3- مطالعه آزمایشگاهی

3-1- سازه ساندویچی

قالب سیلیکونی: برای ساخت و قالب‌گیری هسته فوم ترکیبی نیاز به یک عدد قالب سیلیکونی می‌باشد که برای ساخت آن، یک عدد قطعه مستر¹ لازم است. در این پژوهش برای این منظور از یک قطعه با جنس پلکسی گلاس² استفاده شده است که سطوح صاف و کاملاً صیقلی دارد.

هسته فوم ترکیبی (بدون نانولوله کربنی): برای ساخت هسته فوم ترکیبی می‌بایست رزین با پودر میکروبالن ترکیب گردد. به منظور به دست آوردن وزن میکروبالن لازم برای کسر حجمی‌های مورد نظر، ابتدا حجم هسته محاسبه شده، سپس با استفاده از تناسب و درصدگیری، حجم و در نهایت وزن میکروبالن مورد نیاز به دست آمده است. به این ترتیب برای ساخت هسته با کسر حجمی‌های 30%، 40% و 55% به ترتیب نیاز به 68، 51 و 93.5 گرم پودر میکروبالن می‌باشد. همچنین با توجه به ابعاد هسته، 200 گرم رزین اپوکسی نیاز است. پس از اختلاط کامل رزین و میکروبالن، هاردنر³ به آن‌ها اضافه شده و مخلوط حاصل، داخل قالب سیلیکونی ریخته شده است. در این مرحله، زمانی در حدود 24 ساعت به قالب فرصت داده شده تا هسته به‌طور کامل شکل گرفته و خشک شود. سپس هسته از درون قالب خارج شده است. یک نمونه از هسته ساخته‌شده با کسر حجمی 30% در شکل 2-الف نشان داده شده است.

هسته فوم ترکیبی تقویت‌شده با نانولوله کربنی: برای ساخت این نوع هسته ابتدا مقدار 200 گرم رزین و 8 گرم پودر نانولوله کربنی (معادل 4%) به مدت 5 دقیقه به‌طور آهسته و پیوسته هم زده شده و سپس برای مخلوط شدن به‌طور کامل و همگن شدن، به مدت 1 ساعت داخل دستگاه التراسونیک پرابی قرار داده شده است. در ادامه مقدار 68 گرم پودر میکروبالن (معادل کسر حجمی 40%) به محلول اضافه کرده و در نهایت هاردنر به مخلوط اضافه شده و تا اختلاط کامل به‌آرامی هم‌زده می‌شود. پس از این مرحله، مخلوط آماده‌شده به‌آرامی و در چند مرحله متوالی داخل قالب سیلیکونی ریخته شده و پس از کامل شدن آن، قالب برای مدت 24 ساعت در دمای محیط قرار داده شده تا هسته به‌طور کامل سفت شده و شکل بگیرد. شکل 2-ب هسته ساخته‌شده از فوم ترکیبی تقویت‌شده با نانولوله کربنی را نشان می‌دهد.

ورق آلومینیومی: قبل از استفاده از ورق‌های آلومینیومی در ساخت سازه ساندویچی، برای چسبندگی و اتصال بهتر آن‌ها به هسته و جلوگیری از پدیده ورقه‌ورقه شدن⁴، سطح آن‌ها به روش مکانیکی و با استفاده از سنباده P400 تا حدودی زبر گردیده و شیارهایی بسیار ظریف روی سطوح آن‌ها ایجاد شده است. سنباده‌زنی به‌صورت 45 درجه و در جهت‌های مثبت و منفی (عمود بر هم) انجام شده است. پس از اتمام عملیات سنباده‌زنی، سطح کل ورق‌ها با استون شستشو داده شده و خشک شده است.

ساخت سازه ساندویچی: به‌منظور استفاده همزمان از ویژگی‌های فلز و کامپوزیت الیافی برای تقویت هسته‌های ساخته‌شده، در هر طرف هسته‌ها از دو لایه کامپوزیت GFRP و یک لایه ورق آلومینیومی استفاده شده است. برای چیدن لایه‌ها روی یکدیگر و ساخت سازه ساندویچی از روش لایه‌چینی دستی⁵ استفاده شده است. شکل 3 ترتیب چیدمان لایه‌ها و شکل 4 شکل شماتیک سازه ساخته شده را نشان می‌دهند.

⁴ Delamination
⁵ Hand Lay-up

¹ Master piece
² Plexy Glass
³ Hardener

3-2- آزمایش ضربه سرعت بالا

این آزمایش با استفاده از یک دستگاه تفنگ گازی و یک عدد پرتابه سرمخروطی انجام شده است.

تفنگ گازی: نحوه کار دستگاه به این صورت است که هوای فشرده ایجاد شده توسط کمپرسور، به مخزن دستگاه انتقال یافته و پس از قرار گرفتن پرتابه مورد نظر درون لوله تفنگ (بلافاصله بعد از شیر برقی کنترل جریان)، با فشردن کلید استارت روی صفحه کنترل، شیر برقی باز شده و پرتابه تحت فشار هوای فشرده، به سمت هدف شلیک می‌شود. تفنگ گازی استفاده شده، در شکل 6 نشان داده شده است.



Fig. 6 Gas gun

شکل 6 تفنگ گازی (استفاده شده در این پژوهش)

پرتابه: در این پژوهش از پرتابه سرمخروطی نوک تیز استفاده شده است. شکل 7 پرتابه استفاده شده و شکل 8 شماتیک این پرتابه را نشان می‌دهند. مشخصات پرتابه استفاده شده در جدول 7 آورده شده است. شکل‌های 9 و 10 نیز به ترتیب نمونه بسته شده در فیکسچر دستگاه را در دو حالت قبل و بعد از آزمایش نشان می‌دهند.



Fig. 7 The projectile used in this research

شکل 7 پرتابه استفاده شده در این پژوهش

جدول 7 مشخصات پرتابه (استفاده شده در این پژوهش)

Table 7 Projectile specifications

جنس	زاویه سر پرتابه (درجه)	جرم (gr)
آلومینیوم	21.5	30



Fig. 3 The arrangement of layers in the sandwich structure

شکل 3 ترتیب چیدمان لایه‌ها در ساختار سازه ساندویچی

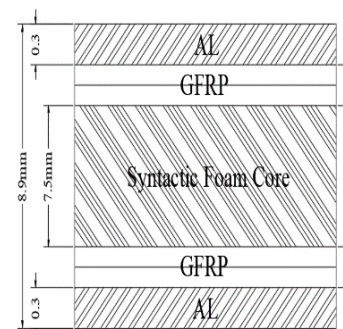


Fig. 4 Schematic of sandwich structure

شکل 4 شماتیک سازه ساندویچی

به منظور ایجاد چسبندگی کامل، سازه‌ها به مدت 24 ساعت با استفاده از 2 عدد جک 2 تنی تحت فشار قرار داده شده‌اند که در نتیجه‌ی این کار، رزین اضافه بین لایه‌های مونتاژ شده از درزهای بین آن‌ها بیرون زده و موجب می‌شود سطوح به‌طور کامل به یکدیگر چسبیده و فضای خالی بین آن‌ها از بین برود. پس از کامل شدن عملیات ساخت سازه ساندویچی، آن‌ها با استفاده از دستگاه برش و اترجت¹، با ابعاد مورد نظر برش داده شده‌اند. پس از اتمام عملیات برشکاری، 4 دسته 4 تایی نمونه سازه ساندویچی با ابعاد 135×135 میلی‌متر ساخته شده که سه دسته با کسر حجمی‌های 30%، 40% و 55% میکروبالن و یک دسته با کسر حجمی 40% میکروبالن و 4% نانولوله کربنی (تقویت شده) می‌باشد. شکل 5 نمای جانبی نمونه‌های نهایی ساخته شده را نشان می‌دهد.

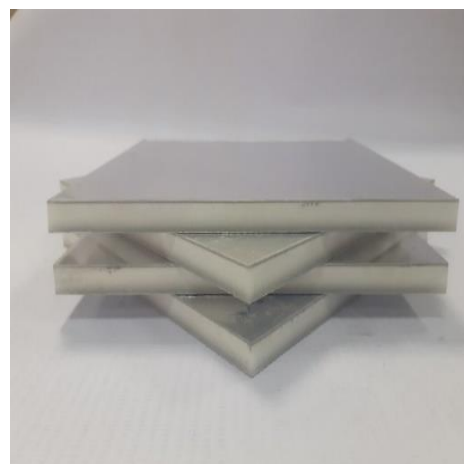


Fig. 5 Final samples

شکل 5 نمونه‌های نهایی ساخته شده

¹ Waterjet Cutting Machine

$$V_b = \sqrt{V_{in}^2 - V_{out}^2} \quad (1)$$

$$E = \frac{1}{2}mV_b^2 = \frac{1}{2}m(V_{in}^2 - V_{out}^2) \quad (2)$$

در این روابط V_{in} ، V_{out} و m به ترتیب سرعت ورودی، سرعت خروجی و جرم پرتابه می‌باشند. به منظور در دست داشتن ابزاری برای مقایسه و بررسی نمونه‌ها از لحاظ شکل ظاهری و دیگر پارامترهای مربوطه، از هر نوع سازه یک نمونه به صورت سالم نگهداشته شده و آزمایش بر روی سه نمونه دیگر انجام شده است.

با داشتن سرعت‌های ورودی و خروجی پرتابه، مقادیر عددی سرعت حد بالستیک و انرژی نفوذ سازه محاسبه گردیده و برای حالت‌های مختلف در جدول‌های 8 تا 11 آورده شده است. به منظور اطمینان از نفوذ کامل پرتابه در نمونه‌ها، سرعت اولیه روی عدد 135 متر بر ثانیه تنظیم شده که در نتیجه آن، پرتابه به طور کامل در نمونه‌ها نفوذ کرده و از آن‌ها خارج شده است. به منظور مقایسه بهتر اثر پارامترهای مختلف، نتایج ارائه شده در جدول‌ها، به صورت نمودار نیز بیان شده‌اند. لازم به ذکر است در ترسیم نمودارها از مقادیر میانگین هر پارامتر استفاده شده است. شکل‌های 11، 12 و 13 به ترتیب تغییرات سرعت خروجی پرتابه، سرعت حد بالستیک و انرژی نفوذ سازه را به ازای کسر حجمی‌های مختلف نشان می‌دهند.

جدول 8 نتایج آزمایش نمونه‌های با کسر حجمی 30% میکروبالن

Table 8 The test results of the samples with 30% volume fraction of microballoon

عنوان نمونه	V_{in} (m/s)	V_{out} (m/s)	V_b (m/s)	E (J)
SF30-1	135	30	131.6	259.8
SF30-2	135	35	130.4	255.1
SF30-3	135	42	128.3	246.9
مقادیر میانگین	135	35.7	130.1	253.9

جدول 9 نتایج آزمایش نمونه‌های با کسر حجمی 40% میکروبالن

Table 9 The test results of the samples with 40% volume fraction of microballoon

عنوان نمونه	V_{in} (m/s)	V_{out} (m/s)	V_b (m/s)	E (J)
SF40-1	135	27	132.3	262.5
SF40-2	135	24	132.8	264.5
SF40-3	135	31	131.4	259
مقادیر میانگین	135	27.3	132.2	262

جدول 10 نتایج حاصل از آزمایش نمونه‌های با کسر حجمی 55% میکروبالن

Table 10 The test results of the samples with 55% volume fraction of microballoon

عنوان نمونه	V_{in} (m/s)	V_{out} (m/s)	V_b (m/s)	E (J)
SF55-1	135	42	128.3	246.9
SF55-2	135	51	125	234.4
SF55-3	135	64	118.9	212.1
مقادیر میانگین	135	52.3	124.1	231.1

جدول 11 نتایج آزمایش نمونه‌های با کسر حجمی 40% میکروبالن و هسته تقویت شده با 4% نانولوله کربنی

Table 11 The test results of the samples with 40% volume fraction of microballoon and core reinforced with 4% carbon nanotubes

عنوان نمونه	V_{in} (m/s)	V_{out} (m/s)	V_b (m/s)	E (J)
SF40+CNT-1	135	19	133.6	267.7
SF40+CNT-2	135	14	134.3	270.5
SF40+CNT-3	135	23	133	265.3
مقادیر میانگین	135	18.7	133.6	267.8

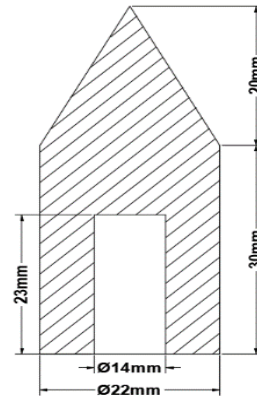


Fig. 8 Schematic of the projectile

شکل 8 تصویر شماتیک پرتابه (استفاده شده در این پژوهش)

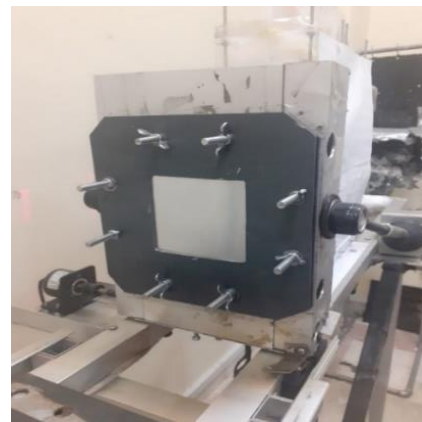


Fig. 9 Clamped specimen in the fixture before testing

شکل 9 نمونه بسته شده داخل فیکسچر دستگاه قبل از انجام آزمایش



Fig. 10 Clamped specimen in the fixture after testing

شکل 10 نمونه بسته شده داخل فیکسچر دستگاه بعد از انجام آزمایش

4- نتایج و بحث

از نتایج انجام آزمایش ضربه سرعت بالا بر روی سازه‌های ساندویچی ساخته شده، برای بررسی اثر پارامترهای کسر حجمی میکروبالن و تقویت هسته فوم ترکیبی با نانولوله کربنی بر خواص بالستیک این سازه‌ها استفاده شده است. پارامتر سرعت خروجی پرتابه مستقیماً توسط سنسورهای دستگاه، اندازه‌گیری شده درحالی‌که دو پارامتر سرعت حد بالستیک و انرژی نفوذ سازه به ترتیب از روابط (1) و (2) به دست آمده‌اند.

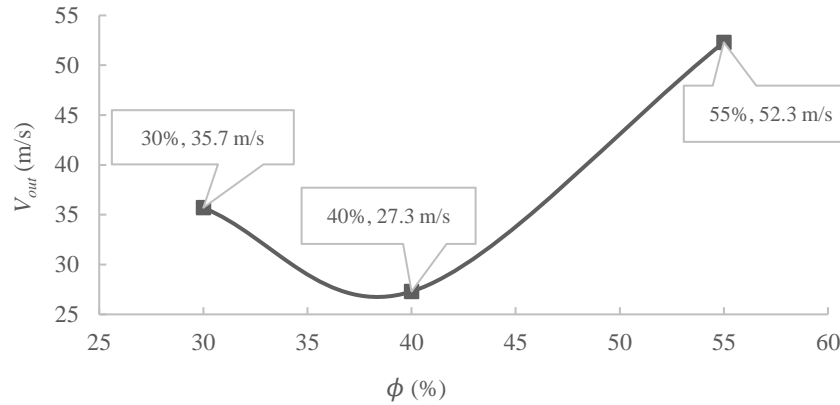


Fig. 11 Output velocity of the projectile as volume fractions of 30%, 40% and 55% microballoon

شکل 11 سرعت خروجی پرتابه به ازای کسر حجمی‌های 30%، 40% و 55% میکروبالن

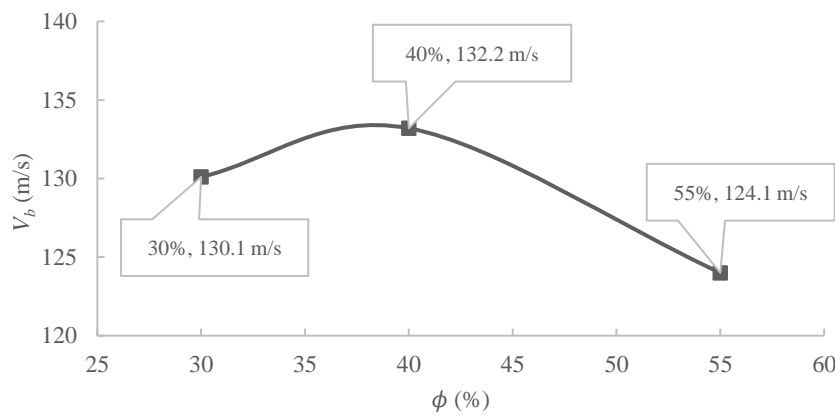


Fig. 12 Ballistic limit velocity of the structure as volume fractions of 30%, 40% and 55% of the microballoon

شکل 12 سرعت حد بالستیک سازه به ازای کسر حجمی‌های 30%، 40% و 55% میکروبالن

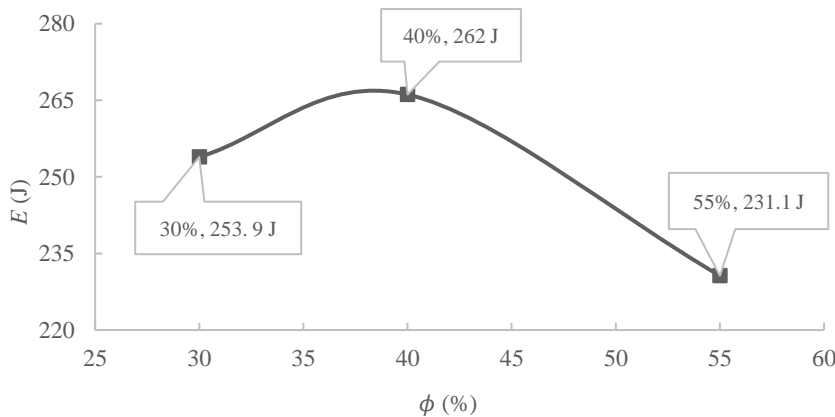


Fig. 13 Penetration energy of the structure as volume fractions of 30%, 40% and 55% of microballoon

شکل 13 انرژی نفوذ سازه به ازای کسر حجمی‌های 30%، 40% و 55% میکروبالن

مقادیر مربوط به سرعت حد بالستیک نشان می‌دهند با افزایش کسر حجمی میکروبالن از 30% تا 40%، سرعت حد بالستیک از 130.1 متر بر ثانیه تا 132.2 متر بر ثانیه افزایش یافته است (حدود 1.6%) درحالی‌که با افزایش کسر حجمی میکروبالن از 40% تا 55%، سرعت حد بالستیک از 132.2 متر بر ثانیه تا 124.1 متر بر ثانیه کاهش یافته است (حدود 6%).

اعداد مربوط به سرعت خروجی پرتابه نشان می‌دهند که با افزایش کسر حجمی میکروبالن از 30% تا 40%، مقدار سرعت باقیمانده از 35.7 متر بر ثانیه تا 27.3 متر بر ثانیه کاهش یافته (حدود 23.5%) ولی در ادامه با افزایش کسر حجمی میکروبالن از 40% تا 55%، سرعت باقیمانده به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای تغییر کرده و از 27.3 متر بر ثانیه تا 52.3 متر بر ثانیه افزایش یافته است (حدود 47.8%).

مکانیزم تخریب پلاگینگ^۲ هسته، مهم‌ترین مکانیزم جذب انرژی پرتابه می‌باشد. فرآیند این مکانیزم تخریب و جذب انرژی که توسط آن انجام می‌شود، به طور مستقیم به استحکام کششی و فشاری فوم مربوط است. با افزایش کسر حجمی میکروبالن از 30% تا 40%، استحکام‌های کششی و فشاری فوم افزایش می‌یابد. علاوه بر این، مدول الاستیک سازه نیز افزایش یافته و موجب افزایش جذب انرژی الاستیک می‌شود. درحالی‌که با افزایش کسر حجمی میکروبالن از 40% تا 55%، به دلیل آسیب بیشتر میکروبالن‌ها و همچنین افزایش پدیده کلوخه‌ای شدن، خواص مکانیکی کششی و فشاری فوم کاهش یافته و در نتیجه جذب انرژی نیز کاهش می‌یابد [19].

بنابراین به نظر می‌رسد از بین کسر حجمی‌های بررسی شده در این پژوهش، کسر حجمی بهینه میکروبالن‌ها جهت ساخت نمونه‌هایی که در برابر ضربه‌ی سرعت بالا مقاومت بهتری داشته باشند، کسر حجمی 40% می‌باشد. با توجه به اینکه یکی از اهداف پژوهش حاضر بررسی تأثیر تقویت هسته فوم ترکیبی با نانولوله کربنی بر خواص بالستیک سازه بوده است لذا آزمایش ضربه سرعت بالا بر روی نمونه‌های فوم ترکیبی با 40% میکروبالن و تقویت شده با 4% نانولوله کربنی هم انجام شده و نتایج حاصل در جدول 11 ارائه شده است.

شکل‌های 14، 15 و 16 نیز به ترتیب مقایسه سرعت خروجی پرتابه، سرعت حد بالستیک و انرژی نفوذ سازه را با هسته فوم ترکیبی 40% میکروبالن برای دو حالت بدون نانولوله کربنی (0%) و تقویت شده با 4% نانولوله کربنی نشان می‌دهند. در این نمودارها، محور افقی نشان‌دهنده کسر حجمی نانولوله می‌باشد.

اعداد مربوط به انرژی نفوذ سازه ساندویچی نشان می‌دهند با افزایش کسر حجمی میکروبالن از 30% تا 40%، انرژی نفوذ از 253.9 ژول تا 262 ژول افزایش یافته است (حدود 3.1%). ولی با افزایش کسر حجمی میکروبالن از 40% تا 55%، مقدار انرژی نفوذ از 262 ژول تا 231.1 ژول کاهش یافته است (حدود 11.8%).

با توجه به اطلاعات به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که به طور کلی با افزایش کسر حجمی میکروبالن از 30% تا 40%، جذب انرژی ضربه افزایش یافته در حالی‌که با افزایش کسر حجمی میکروبالن از 40% تا 55%، این روند معکوس شده و جذب انرژی ضربه کاهش می‌یابد. دلایل مختلفی برای این رفتار متفاوت سازه می‌توان بیان کرد. با توجه به شکل و ساختار میکروبالن (کره توخالی)، با افزایش کسر حجمی میکروبالن از 30% تا 40%، نیز مقدار گاز موجود در فوم (هوا) افزایش می‌یابد؛ ولی این افزایش در مقایسه با حالتی که کسر حجمی میکروبالن از 40% تا 55% می‌رسد، چندان زیاد نبوده به طوری که در حالت کسر حجمی 55%، در هنگام اختلاط رزین و میکروبالن، حباب بسیار بیشتری در ماتریس ایجاد می‌شود. از طرف دیگر به دلیل تراکم و غلظت بالای ترکیب در حالت کسر حجمی 55%، در هنگام اختلاط رزین و میکروبالن، دو پدیده اتفاق می‌افتد. یکی افزایش برخورد میکروبالن‌ها به یکدیگر که در نتیجه تعداد بیشتری از آن‌ها آسیب می‌بینند و دیگری افزایش پدیده کلوخه‌ای شدن^۱ که موجب افت ویژگی‌های میکروبالن‌ها می‌شود. در مجموع، این پدیده‌ها منجر به ضعیف شدن فوم در مقابل ضربه و کاهش انرژی جذب شده توسط فوم تحت ضربه می‌گردد؛ در صورتیکه این اتفاق تا کسر حجمی 40% چندان دیده نمی‌شود. همچنین نتایج پژوهش‌های پیشین نشان داده است که

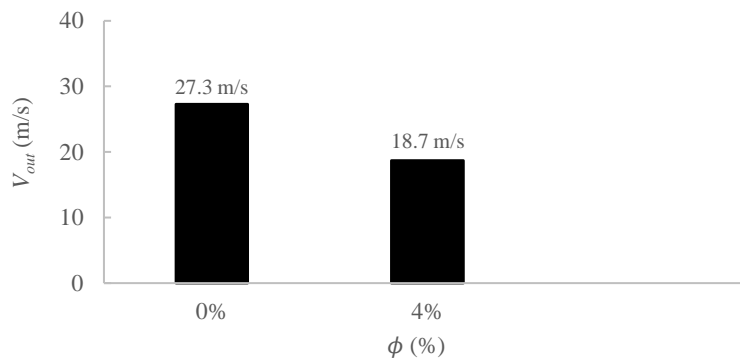


Fig. 14 Output velocity of the projectile in two cases of volume fraction of 0% and 4% CNT

شکل 14 سرعت خروجی پرتابه در دو حالت کسر حجمی 0% و 4% نانولوله کربنی

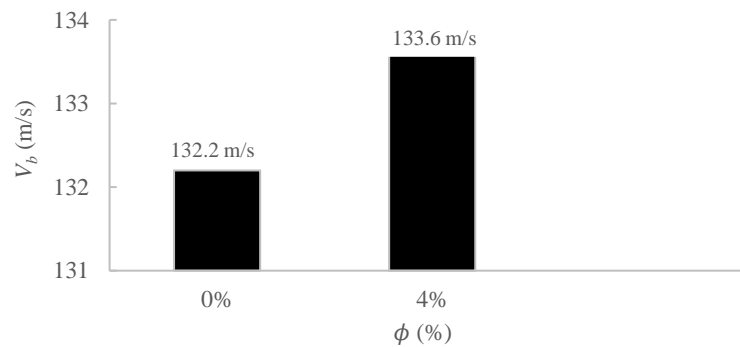


Fig. 15 Ballistic limit velocity of the structure in two cases of volume fraction of 0% and 4% CNT

شکل 15 سرعت حد بالستیک سازه در دو حالت کسر حجمی 0% و 4% نانولوله کربنی

² Plugging

¹ agglomeration

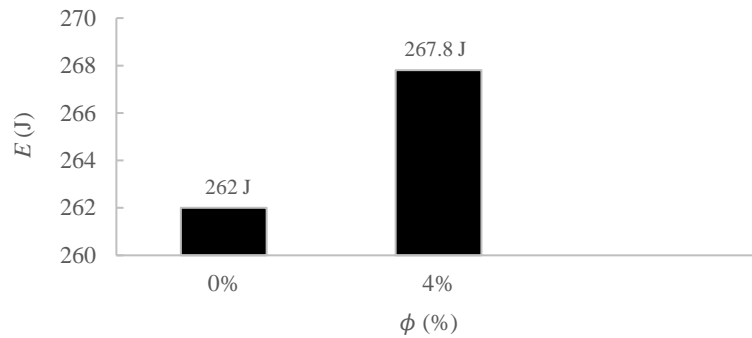


Fig. 16 Penetration energy of the structure in two cases of volume fraction of 0% and 4% CNT

شکل 16 انرژی نفوذ سازه در دو حالت کسر حجمی 0% و 4% نانولوله کربنی

و 60% میکروبالن تحت ضربه سرعت بالا قرار گرفته‌اند. نتایج این پژوهش نیز نشان داده است که نمونه‌های ساخته‌شده با کسر حجمی 40% میکروبالن دارای مقاومت بالستیک بهتری نسبت به بقیه نمونه‌ها بوده‌اند. همان‌طور که پیش از این گفته شد در پژوهش حاضر نیز نمونه‌های ساخته‌شده با 40% میکروبالن نسبت به نمونه‌های ساخته‌شده با 30% و 55% میکروبالن از خواص بالستیک بهتری برخوردار بوده و سرعت حد بالستیک بالاتری دارند. همچنین در پژوهش مذکور [11]، هسته تعدادی از نمونه‌ها با 3% وزنی نانو رس تقویت‌شده که این کار موجب بهبود استحکام سازه، افزایش انرژی نفوذ، افزایش سرعت حد بالستیک و به‌طور کلی افزایش مقاومت بالستیک سازه به میزان 10% شده است.

کامران رحمانی و همکاران [21] نیز در پژوهش خود تأثیر افزودن نانولوله‌های کربنی چند جداره بر رفتار بالستیک چندلایه‌های الیافی- فلزی را به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته داده‌اند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داده است که افزودن نانولوله‌های کربنی اثر مستقیمی بر افزایش حد بالستیک دارد که ماکزیمم مقدار آن در کسر حجمی 4% مشاهده شده است ولی با افزایش کسر حجمی نانوذرات تا 6% به دلیل وقوع پدیده کلوخه‌ای شدن نانولوله‌ها، عملکرد مکانیکی سازه افت می‌کند.

تمامی این نتایج با نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش در رابطه با تقویت هسته فوم ترکیبی با نانولوله کربنی مطابقت خوبی دارد زیرا همان‌طور که پیش از این گفته شد در این پژوهش نیز تقویت فوم ترکیبی با 4% نانولوله کربنی موجب کاهش سرعت باقیمانده پرتابه و افزایش سرعت حد بالستیک و انرژی نفوذ سازه شده است که این پدیده می‌تواند به دلیل تقویت چسبندگی و تعامل نانوذرات و ماتریس اپوکسی باشد؛ زیرا با بهبود چسبندگی بین نانولوله‌ها و ماتریس اپوکسی، به‌واسطه مکانیزم پل‌زنی، انتقال تنش بین الیاف و ماتریس بهتر انجام شده و در نتیجه چقرمگی شکست سازه افزایش می‌یابد [21].

5- نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه هدف از انجام این پژوهش بررسی و تحلیل اثر درصد کسر حجمی میکروبالن و همچنین تقویت هسته فوم ترکیبی با نانولوله‌های کربنی بر رفتار بالستیک سازه‌های ساندویچی با ساختار موردنظر بوده، نتایج به‌دست‌آمده را می‌توان به‌صورت ذیل جمع‌بندی نمود.

- با افزایش کسر حجمی میکروبالن از 30% تا 40%، سرعت خروجی پرتابه کاهش یافته و سرعت حد بالستیک و انرژی نفوذ سازه افزایش یافته‌اند که این روند به معنای افزایش مقاومت به ضربه و بهبود خواص بالستیک سازه می‌باشد.

براساس مقادیر ارائه‌شده در جدول‌های 9 و 11 و همچنین شکل‌های 14، 15 و 16، اضافه کردن 4% نانولوله کربنی به فوم ترکیبی با کسر حجمی 40% میکروبالن، موجب کاهش سرعت باقیمانده از 27.3 متر بر ثانیه تا 18.7 متر بر ثانیه (حدود 31.5%)، افزایش سرعت حد بالستیک از 132.2 متر بر ثانیه تا 133.6 متر بر ثانیه (حدود 1.1%) و همچنین افزایش انرژی نفوذ سازه از 262 ژول تا 267.8 ژول شده است (حدود 2.2%). با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در این قسمت می‌توان دید که اضافه کردن نانولوله کربنی به هسته فوم ترکیبی، بیشترین تأثیر را بر سرعت باقیمانده داشته هرچند تا حد کمی نیز موجب افزایش سرعت حد بالستیک و انرژی نفوذ سازه هم شده است. روند کلی این نتایج نشان می‌دهند تقویت هسته فوم ترکیبی با نانولوله کربنی موجب بهبود استحکام و سختی کامپوزیت‌ها و در نتیجه بهبود خواص بالستیک سازه می‌گردد که دلیل اصلی آن همکاری و تعامل نانولوله و ماتریس اپوکسی می‌باشد و از طرف دیگر با افزایش نانولوله کربنی به فوم، ویسکوزیته فوم افزایش یافته که این اتفاق موجب غیرفعال شدن گاززدایی و در نتیجه شکنندگی فوم ترکیبی شده است [5].

مقایسه روند نتایج به‌دست‌آمده در این مطالعه برای تأثیر تغییرات کسر حجمی میکروبالن و تقویت هسته فوم ترکیبی با نانو ذرات بر استحکام و خواص بالستیک سازه با نتایج ارائه‌شده در مراجع دیگر مطابقت خوبی را نشان می‌دهند و در واقع تأییدکننده نتایج به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر می‌باشند [6, 11, 20, 21]. به‌طور نمونه در مطالعه‌ای که توسط فنگ لینگ بانو و همکاران [6] انجام شده، رفتار نمونه‌هایی از فوم ترکیبی با کسر حجمی‌های 50% و 70% میکروبالن و تقویت‌شده با نانولوله کربنی (0.6% و 1.2%) تحت آزمایش کشش، فشار و ضربه بررسی شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که افزایش مقدار میکروبالن می‌تواند جذب انرژی ضربه را افزایش داده ولی افزودن نانولوله کربنی به دلیل وقوع پدیده کلوخه‌ای شدن در رزین، تأثیر کمتری بر جذب انرژی ضربه دارد. علاوه بر این در نمونه‌های فوم ترکیبی تقویت‌شده با نانولوله کربنی، استحکام افزایش یافته است؛ به‌صورتی که با اضافه کردن 0.6% و 1.2% نانولوله کربنی، استحکام فشاری به‌ترتیب 18% و 25% و استحکام کششی به‌ترتیب 12% و 19% افزایش را نشان داده‌اند. به‌طور کلی روند بهبود استحکام و جذب انرژی توسط فوم ترکیبی در اثر افزایش مقدار میکروبالن یا تقویت فوم با نانولوله کربنی با نتایج به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر نیز کاملاً همخوانی دارد.

در پژوهش دیگری که توسط حامد احمدی و همکاران [11] انجام شده، سازه‌های ساندویچی با هسته فوم ترکیبی با کسر حجمی‌های 20%، 40%

- [14] "Technical Data Sheet of Microballoon," <https://www.pmpcompany.com>, PMP Corporation, 2019.
- [15] "Physical Specification of Multi-Walled Carbon Nanotubes," <https://www.pmpcompany.com>, PMP Corporation, 2019.
- [16] "Components of Multi-Walled Carbon Nanotubes," <https://www.us-nano.com>, 2022.
- [17] "Mechanical Specification of Glass Fiber," <https://polyme.ir/product/fiberglass-woven-roving>, 2022.
- [18] "Technical and Physical Specification of Aluminum sheet," <http://www.parsianaluminum.com>, 2022.
- [19] Ahmadi H, Liaghat G, Shokrieh M, Hadavinia H, Ordys A, Aboutorabi A., "Quasi-Static and Dynamic Compressive Properties of Ceramic Microballoon Filled Syntactic Foam", *Journal of Composite Materials*, Vol. 49, No. 10, pp. 1255-1266, 2015.
- [20] Peng, R., Qiangqiang, T., Liangliang, Y., Yijiang, M., Jie, W., Wei, Z., Zhongcheng, M., Zitao, G., Zhe, Z., "High-Velocity Impact Response of Metallic Sandwich Structures with PVC Foam Core," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 144, 103657, 2020.
- [21] Rahmani, K., Alitavoli, M., Darvizeh, A., "Experimental Study on the Effect of Adding Multi-Walled Carbon Nanotubes on the Ballistic Limit of Fibers Metal Laminates," *Aerospace Mechanics*, Vol. 19, No. 4, pp. 27-39, 2023.
- با افزایش کسر حجمی میکروبالن از 40% تا 55%، روند تغییرات معکوس شده و سرعت خروجی پرتابه افزایش ولی مقادیر سرعت حد بالستیک و انرژی نفوذ سازه کاهش یافته‌اند که این تغییرات به معنای کاهش مقاومت به ضربه و افت خواص بالستیک سازه می‌باشد.
- از بین کسر حجمی‌های آزمایش شده در این پژوهش، به نظر می‌رسد حد بهینه کسر حجمی میکروبالن در هسته‌های ساخته شده از فوم ترکیبی، 40% می‌باشد.
- اضافه کردن نانولوله کربنی به هسته فوم ترکیبی موجب کاهش قابل ملاحظه سرعت خروجی پرتابه و افزایش اندک سرعت حد بالستیک و انرژی نفوذ سازه شده است. بنابراین می‌توان گفت تقویت فوم ترکیبی با نانولوله کربنی باعث بهبود برخی از خواص بالستیک سازه شده است.
- ### 6- مراجع
- [1] Heidari Shahmaleki, E., Zeinoldini, A., "Application of cotton/epoxy laminated composites to fabricate the uni- and bi-directional cosine corrugated cores sandwich panels," In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 7, No. 2, pp. 863-872, 2020.
- [2] Bibin, J., Reghunadhan Nair, C.P., "Handbook of Thermoset Plastics," Third ed., William Andrew Publishing, pp. 511-554, 2014.
- [3] Abrate, S. Ballistic impact on composites. in 16th international conference on composite materials, Kyoto, Japan. 2007.
- [4] Ahmadi, E., Fesharaki, J.J., Atrian, A., Montazerolghaem, H., Saberi, S., "Investigation of Penetration Behavior of Sandwich Structures with Fiber-metal Laminate Skins and Syntactic Foam Core," *Fibers and Polymers*, Vol. 22, No. 10, pp. 2846-2860, 2021.
- [5] Ahmadi, E., Atrian, A., Fesharaki, J.J., Montazerolghaem, H., Saberi, S., "Experimental and Numerical Assessment of High-Velocity Impact Behavior of Syntactic Foam Core Sandwich Structures," *European Journal of Mechanics - A/Solids*, Vol. 90, 104355, 2021.
- [6] Fengling, B., Jie, W., Jun, W., Shaohua, Z., Xinghong, G., "Static and Impact Responses of Syntactic Foam Composites Reinforced by Multi-Walled Carbon Nanotubes," *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 9, No. 6, pp. 12391-12403, 2020.
- [7] Anirudh, S., Jayalakshmi, C.G., Anand, A., Kandasubramanian, B., Ismail, S., "Epoxy/Hollow Glass Microsphere Syntactic Foams for Structural and Functional Application-A review," *European Polymer Journal*, Vol. 171, 111163, 2022.
- [8] Bashiri Goodarzi, H., Tooski, M.Y., "An Experimental Study of the Effect of Adding Carbon Nanotubes and Graphene Sheets on the Impact Strength of Epoxy/Basalt Fiber Composite," In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 3, pp. 411-418, 2019.
- [9] Bavafa Bigdiloo, M., Eslami-Farsani, R., Ebrahimnezhad-khaljiri, H., "The Effect of Carbon Nanotubes on High velocity Impact Behavior of Hybrid Kevlar-ultrahigh molecular weight polyethylene fibers composite with interlayer configuration," In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 4, pp. 533-540, 2020.
- [10] Esaklul, K.A., Mason, J., "27-Nonmetallics Applications in Oil and Gas Production (Pipes, Liners, Rehabilitations)," Editor: El-Sherik, A.M., *Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies*, Woodhead Publishing Series in Energy, pp. 627-660, 2017.
- [11] Ahmadi, H., Liaghat, Gh., Chitsaz Charandabi, S., "High Velocity Impact on Composite Sandwich Panels with Nano-Reinforced Syntactic Foam Core," *Thin-Walled Structures*, Vol. 148, 106599, 2020.
- [12] Khodadadi, A., Liaghat, Gh., Ahmadi, H., Bahramian, A.R., Shahgholian, D., Anani, Y., Asemani, S., "Experimental and Numerical Analysis of High Velocity Impact on Kevlar/Epoxy Composite Plates," In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 2, pp. 265-274, 2019.
- [13] "Technical Data Sheet of Epoxy Resin ELR440," <https://www.pmpcompany.com>, PMP Corporation, 2019.