



مطالعه آزمایشگاهی رفتار ضربه سرعت بالا در سازه‌های ساندویچی با رویه‌های FML و هسته فوم ترکیبی تقویت‌شده با الیاف شیشه

احسان نوری پرکستانی¹، احسان احمدی^{2*}

1- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، 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 پژوهش، رفتار ضربه سرعت بالا در سازه‌های ساندویچی با رویه‌های FML و هسته فوم ترکیبی تقویت‌شده با الیاف شیشه به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور، فوم ترکیبی با استفاده از رزین اپوکسی و میکروبالن‌های شیشه‌ای با درصدحجمی‌های 20%، 30% و 60% ساخته شده است. رویه‌های FML نیز در هر طرف از دو لایه کامپوزیت پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه و یک لایه ورق آلومینیومی تشکیل شده است. علاوه بر این، یک سری نمونه تقویت‌شده با درصدحجمی 30% میکروبالن و 15% الیاف شیشه خردشده نیز ساخته شده است. نمونه‌ها با استفاده از یک دستگاه تفنگ گازی تک مرحله‌ای و شلیک پرتابه سرمخروطی آلومینیومی، تحت آزمایش ضربه سرعت بالا قرار گرفته‌اند. از نتایج آزمایش‌های انجام شده برای بررسی اثر درصدحجمی میکروبالن و همچنین تقویت هسته فوم ترکیبی با الیاف شیشه بر پارامترهای رفتار ضربه سرعت بالا سازه، شامل سرعت باقی‌مانده پرتابه، سرعت حد بالستیک و انرژی نفوذ سازه استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان داده است که با افزایش درصدحجمی میکروبالن از 20% تا 30% سرعت باقی‌مانده پرتابه کاهش و سرعت حد بالستیک و انرژی نفوذ سازه افزایش یافته؛ در حالی که با افزایش بیشتر درصدحجمی میکروبالن از 30% تا 60%، روند تغییرات برعکس شده است. همچنین نتایج به دست آمده نشان داده که تقویت هسته فوم ترکیبی با الیاف شیشه، موجب بهبود قابل توجه رفتار ضربه سرعت بالای این سازه شده است.

دریافت: 1403/04/31

پذیرش: 1403/07/13

کلیدواژگان

سازه ساندویچی، رفتار ضربه سرعت بالا، فوم ترکیبی تقویت‌شده با الیاف شیشه، رویه FML

Experimental study of high-velocity impact behavior of sandwich structures with FML skins and glass fiber reinforced syntactic foam core

Ehsan Noori Parkestani¹, Ehsan Ahmadi^{1*}

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

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

Keywords

Sandwich Structures, High-Velocity Impact Behavior, Glass Fiber Reinforced Syntactic Foam, FML Skin

Abstract

In this research, the high-velocity impact behavior of sandwich structures with FML skins and glass fiber reinforced syntactic foam core was conducted, experimentally. The syntactic foam was produced using epoxy resin and glass microballoon with 30%, 40%, and 60% volume fractions. The FML skins on each side of the cores comprised two layers of glass fiber-reinforced polymer composite (GFRP) and one aluminum layer sheet. In addition, a series of reinforced samples were created using 30% volume fraction of microballoon and 15% chopped glass fibers. The samples were subjected to high-velocity impact tests using a one-stage gas gun and a conical-head aluminum projectile. The results were used to investigate the effects of microballoon volume fraction and glass fiber-reinforced syntactic foam core on the high-velocity impact behavior of structures. The results showed that the increasing microballoon volume fraction from 20% to 30% decreased the projectile residual velocity and increased the ballistic limit velocity and penetration energy. Furthermore, reinforcing syntactic foam with glass fiber significantly affected the high-velocity impact behavior of the structure.

1- مقدمه

مواد ساده با درصدحجمی‌های مختلف و ساختارهای متفاوت ساخته می‌شوند. ویژگی‌های ماده کامپوزیت حاصل، ترکیبی از ویژگی‌های اجزای تشکیل‌دهنده آن خواهد بود. به طور نمونه در صنایع هوافضا به موادی نیاز است که استحکام بالا و وزن کم را به طور همزمان داشته و به اندازه کافی قوی و در عین حال

با توجه به نیاز رو به رشد صنایع به موادی با استحکام بالا و وزن کم، امروزه مواد کامپوزیتی از اهمیت بالایی برخوردار هستند. این مواد پیشرفته از ترکیب

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Noori Parkestani, E., Ahmadi, E., "Experimental study of high-velocity impact behavior of sandwich structures with FML skins and glass fiber reinforced syntactic foam core," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 11, No. 2, pp. 2501-2511, 2024. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2024.2035321.1892>

با هسته فوم ترکیبی به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داده‌اند [8].

تحقیقات مختلفی نیز بر رفتار فوم‌های تقویت‌شده صورت گرفته است. دان-اندی سربان و همکاران [9] اثر تقویت‌کننده‌های الیاف شیشه بر خواص مکانیکی و مورفولوژیکی سازه‌های ساندویچی با هسته فوم پلی‌اورتان را مطالعه نموده‌اند. این محققین با بررسی رفتار سازه تحت خمش سه نقطه‌ای، کشش و برش نشان داده‌اند که جرم الیاف نسبت به طول آن‌ها، اثر بیشتری بر خواص مکانیکی سازه‌ها دارند. مانونیا اوخویلا و همکاران [10] نیز در پژوهشی تجربی و عددی در رابطه با رفتار بالستیک در سازه‌های ساندویچی با هسته فوم پلی‌بزنوکسازین^۷ - پلی‌اورتان تقویت‌شده با دو نوع الیاف شیشه E و S و الیاف آرامید تحقیق کرده‌اند. جی می و همکاران [11] هم با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های عددی، مقاومت سازه‌های ساندویچی با هسته‌های X-frame تقویت‌شده با الیاف را در مقابل ضربه بالستیک، بررسی کرده‌اند. نتایج عددی این تحقیق نشان داده است که هسته ظرفیت جذب انرژی ویژه بهتری نسبت به پوسته‌ها دارد. در پژوهشی دیگر، شاری و همکاران [12] اثر تقویت هسته فوم با الیاف کوتاه مرکب را در سازه‌های ساندویچی تحت ضربه سرعت پایین به صورت آزمایشگاهی و عددی مطالعه نموده‌اند.

مطالعات محدودی نیز در رابطه با رفتار فوم‌های ترکیبی تقویت‌شده انجام شده است. سامی هی و همکاران [13] در پژوهشی تجربی به بررسی مقاومت مکانیکی، انرژی شکست، مدول کششی و استحکام کششی سازه ساندویچی با هسته فوم ترکیبی تقویت‌شده با الیاف کربن آسیاب‌شده^۸ (MCF) پرداخته‌اند. نتایج این پژوهش نشان داده است که افزودن الیاف کربن، چقرمگی فوم‌های ترکیبی را تا حد زیادی افزایش داده و امکان تولید ساختارهای سبک‌تر یا مقاوم‌تر در برابر آسیب را فراهم می‌کند.

چائو ژی و همکاران [14] نیز در پژوهشی تجربی و عددی به بررسی خواص ضربه سرعت پایین فوم ترکیبی تقویت‌شده با الیاف پارچه بافته‌شده پرداخته‌اند. نتایج نشان داده است که نمونه‌های تقویت‌شده در مقایسه با فوم ترکیبی ساده دارای انرژی آسیب بالاتری بوده و همچنین درصدحجمی و نوع میکروبالن تأثیر قابل توجهی بر عملکرد سازه در مقابل ضربه سرعت پایین دارند.

در یکی از معدود مطالعات انجام شده بر رفتار بالستیک فوم‌های ترکیبی تقویت‌شده، حامد احمدی و همکاران [15] سازه‌های ساندویچی با هسته فوم ترکیبی با درصدحجمی‌های 20%، 40% و 60% میکروبالن سرامیکی را با استفاده از دستگاه تغنگ‌گازی^۹، تحت آزمایش ضربه سرعت بالا قرار داده‌اند. براساس نتایج این تحقیق آزمایشگاهی، نمونه‌های ساخته شده با درصدحجمی 40% میکروبالن مقاومت به ضربه بهتری را نسبت به سایر نمونه‌ها نشان داده‌اند. همچنین این پژوهشگران هسته نمونه 40% را با نانورس تقویت کرده‌اند که این کار موجب افزایش سرعت حد بالستیک در حدود 10% شده است.

مطالعات انجام شده در رابطه با خواص بالستیک سازه‌های ساندویچی با هسته فوم ترکیبی نشان داده است که علیرغم اهمیت تقویت هسته در بهینه شدن عملکرد این سازه‌ها در مقابل ضربه سرعت بالا، تاکنون به این مسأله کمتر پرداخته شده و بنابراین بررسی اثر تقویت‌کننده‌های مختلف به ویژه الیاف، می‌تواند تا حد زیادی به بهبود عملکرد سازه تحت ضربه سرعت بالا کمک نماید. از طرف دیگر با توجه به پژوهش‌های انجام شده تا به امروز، به نظر می‌رسد

سبک باشند. علاوه بر این در دماهای بالا، استحکام به ضربه خوبی داشته باشند. از این رو نقش مواد کامپوزیتی و سازه‌های ساندویچی با هسته‌هایی از جنس مواد سبک و مقاوم، روز به روز افزایش یافته و پژوهش‌های بیشتری بر روی آنها انجام می‌شود. صفراآبادی و همکاران [1] با استفاده از شبیه‌سازی عددی، رفتار ضربه سرعت بالا را در دو نوع صفحات کامپوزیتی غیرهیبرید و هیبرید مطالعه کرده‌اند. این پژوهشگران ضمن معرفی انواع تئوری‌های ارزیابی آسیب، از تئوری ماتزنمیلر^۱ برای پیش‌بینی آسیب در صفحات کامپوزیتی استفاده نموده‌اند.

علاوه بر این، تحقیقاتی نیز در رابطه با تقویت کامپوزیت‌ها با نانوذرات انجام شده است. حسین‌لقب و همکاران [2] اثر تقویت کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی را با استفاده از نانوذرات رس، به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار داده‌اند. همین پژوهشگران در تحقیقی دیگر کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی را با درصد‌های مختلف نانولوله کربنی و نانورس تقویت نموده و رفتار آنها در مقابل ضربه سرعت پایین را بررسی و مقایسه نموده‌اند [3].

یکی از مواد پرکاربرد به عنوان هسته سازه‌های ساندویچی، انواع فوم‌ها می‌باشند. پژوهشگران مختلفی به بررسی رفتار سازه‌های ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی و هسته پرشده با فوم و مقایسه آن با هسته بدون فوم پرداخته‌اند. به طور نمونه، حسین‌خانی و همکاران [4] تأثیر در نظر گرفتن خصوصیات ویسکوالاستیک برای رویه‌های شیشه/اپوکسی و هسته فوم پلی‌اورتان را در سازه‌های ساندویچی تحت ضربه سرعت پایین، به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی کرده‌اند. همچنین خدایی و همکاران [5] رفتار سازه‌های ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی و هسته لانه زنبوری را تحت ضربه بالستیک در دو حالت هسته بدون فوم و هسته پرشده با فوم، به صورت عددی مدل‌سازی نموده‌اند. یکی از انواع فوم‌ها که اخیراً به عنوان هسته سازه‌های ساندویچی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌است، فوم‌های ترکیبی^۲ می‌باشند. فوم‌های ترکیبی موادی کامپوزیتی هستند که از یک رزین به عنوان فاز ماتریس و میکروبالن^۳ به عنوان فاز تقویت‌کننده ساخته می‌شوند. با توجه به خواص بسیار خوب این مواد مانند استحکام فشاری بالا، وزن کم، جذب آب و ثابت دی‌الکتریک پایین، فوم‌های ترکیبی کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف به ویژه صنایع هوافضا و دریایی پیدا کرده‌اند [6].

سازه‌های ساندویچی با هسته فوم ترکیبی با داشتن نسبت استحکام به وزن بالا، به‌طور گسترده‌ای در صنایع هوایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سازه‌ها غالباً در طول عمر کاری خود در معرض ضربه پرتابه‌های سرعت بالا بوده که می‌تواند آسیب جدی به عملکرد آن‌ها وارد کند. باید توجه داشت که کیفیت عملکرد این سازه‌ها در مقابل ضربه‌های سرعت بالا، تحت تأثیر رفتار رویه‌ها و هسته‌ی سازه می‌باشند. یکی از مطالعاتی که به بررسی اثر پارامترهای مختلف بر رفتار ضربه سرعت بالا^۴ در سازه ساندویچی با هسته فوم ترکیبی پرداخته است، پژوهش احسان احمدی و همکاران [7] است که رفتار نفوذ در سازه‌های ساندویچی با هسته فوم ترکیبی و لایه‌های FML^۵ را تحت ضربه سرعت بالا، به‌صورت عددی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این پژوهش، اثر پارامترهای شکل و جرم پرتابه و ترتیب چیدمان لایه‌های FML بررسی شده است. این محققان در پژوهشی دیگر تأثیر ضخامت هسته، ضخامت لایه‌های FML و سرعت اولیه ضربه بر رفتار نفوذ^۶ در سازه‌های ساندویچی

⁶ Penetration behavior

⁷ Polybenzoxazine

⁸ Milled Carbon Fibers (MCFs)

⁹ Gas gun

¹ Matzenmiller theory

² Syntactic foam

³ Microballoon

⁴ High-velocity impact

⁵ Fiber-Metal Laminates (FMLs)

جدول 2 مشخصات فنی پودر میکروبالون H38H [17]

| مقدار | عنوان پارامتر |
|--------|--|
| H38H | نام تجاری |
| 0.38 | چگالی متوسط (gr/cm ³) |
| 50 | اندازه متوسط (μm) |
| 38 | مقاومت فشاری (MPa) |
| 0.054 | هدایت حرارتی (W.m ⁻¹ .K ⁻¹) |
| 92-96% | قابلیت شناوری |

3-2-الیاف شیشه خردشده⁴

این الیاف یکی از پرکاربردترین تقویت‌کننده‌های مورد استفاده در صنعت کامپوزیت می‌باشند که انواع مختلفی از آن به صورت تجاری در دسترس هستند. الیافی که در این پژوهش برای تقویت هسته فوم ترکیبی استفاده شده از نوع خردشده با سایز متوسط 10 میلی‌متر بوده است.

4-2-الیاف شیشه بافته شده

الیافی که به منظور ساخت کامپوزیت GFRP در این پژوهش استفاده شده است، از نوع الیاف شیشه بافته شده⁵ دو جهته با راستای عمود برهم بوده که دارای مقاومت مکانیکی بالا می‌باشد. مشخصات مکانیکی و فیزیکی این الیاف با نام تجاری EWR200 در جدول 3 آورده شده است [18].

5-2-آلومینیوم

به منظور تقویت سازه در مقابل ضربه و بارهای جانبی، در خارجی‌ترین لایه دو طرف آن، از یک لایه ورق آلومینیومی مدل B3105 استفاده شده است. مشخصات فنی و فیزیکی ورق آلومینیومی استفاده شده، در جدول 4 ارائه شده است [19].

جدول 3 مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف شیشه بافته شده [18]

| مقدار | عنوان پارامتر |
|-----------|-----------------------------------|
| EWR200 | نام تجاری |
| 6 | نخ تار |
| 5 | تعداد نخ‌ها در پارچه (root/cm) |
| 200-1200 | وزن واحد سطح (gr/m ²) |
| 1300 | نخ تار |
| 1100 | مقاومت در برابر شکست (N) |
| 50-100 | عرض (mm) |
| 0.08-0.34 | ضخامت (mm) |
| 2500 | مقاومت کششی (MPa) |
| 70 | مدول کششی (MPa) |
| 2550 | جرم واحد حجم (kg/m ³) |
| دارد | مقاومت در برابر خوردگی |
| دارد | مقاومت در برابر محیط‌های اسیدی |

⁴ Chopped Glass Fibers
⁵ Woven

مطالعه اثر استفاده همزمان از ویژگی‌های فلز، کامپوزیت پلیمری و فوم ترکیبی تقویت‌شده بر خواص بالستیک سازه‌های ساندویچی می‌تواند تا حد زیادی مفید بوده؛ ولی با این حال، کمتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است که این مسأله ضرورت انجام این مطالعه را دوجندان می‌کند. به همین منظور در این پژوهش، به عنوان یک طراحی نوآورانه و جدید، رفتار ضربه سرعت بالا در سازه‌های ساندویچی با هسته فوم ترکیبی که در هر طرف با یک لایه ورق آلومینیومی و دو لایه کامپوزیت پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه¹ (GFRP) لایه‌چینی شده، مورد مطالعه قرار گرفته است. هسته فوم ترکیبی نیز به دو صورت ساده و تقویت‌شده با الیاف شیشه در نظر گرفته شده است تا با مقایسه نتایج، اثر تقویت فوم بر رفتار سازه تحت ضربه سرعت بالا مورد مطالعه قرار گیرد. علاوه بر این اثر تغییرات درصدحجمی میکروبالن (ϕ) نیز بررسی شده است. سازه‌ها با استفاده از دستگاه تفنگ گازی تک مرحله‌ای و پرتابه آلومینیومی سرمخروطی تحت آزمایش ضربه سرعت بالا قرار گرفته‌اند. از نتایج این آزمایش‌ها برای بررسی اثر درصدحجمی میکروبالن و همچنین تقویت هسته فوم ترکیبی با الیاف شیشه بر پارامترهای رفتار بالستیک سازه شامل سرعت باقی‌مانده پرتابه، سرعت حد بالستیک و انرژی نفوذ سازه استفاده شده است.

2- مواد

1-2-رزین

به منظور ساخت هسته فوم ترکیبی از رزین، هاردنر² و میکروبالن استفاده می‌شود. رزین و هاردنر استفاده شده در این پژوهش از نوع اپوکسی ERL440/LY-1515 بوده که دارای خواص مکانیکی مطلوبی از جمله چقرمگی، سختی، مقاومت بالا در مقابل سایش، مواد شیمیایی و رطوبت، قدرت چسبندگی مناسب و جمع‌شدگی³ کم بوده و به دلیل نداشتن بو و سمی نبودن، کار با آن راحت و بی‌خطر می‌باشد. مشخصات فنی این رزین در جدول 1 آورده شده است [16].

2-2-میکروبالن

به پودرهای پلیمری توخالی، بسیار ظریف و سبک گفته می‌شود که به منظور کاهش چگالی و وزن سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این پژوهش، میکروبالن شیشه‌ای با نام تجاری H38H استفاده شده است که به صورت پودر سفید رنگ است. مشخصات فنی میکروبالن مذکور در جدول 2 ارائه شده است [17].

جدول 1 مشخصات فنی رزین اپوکسی ELR440 [16]

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

¹ Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)
² Hardener
³ Shrinkage

زمان مورد نیاز در این مرحله حدود 24 ساعت بوده تا هسته به‌طور کامل شکل گرفته و خشک شود. سپس هسته از درون قالب خارج شده است. یک نمونه از هسته ساخته شده با درصدحجمی 30% میکروبالن در شکل 2-الف) نشان داده شده است.

هسته فوم ترکیبی تقویت‌شده با الیاف شیشه خردشده: برای ساخت این هسته، ابتدا 200 گرم رزین و 51 گرم پودر میکروبالن شیشه‌ای (معادل درصدحجمی 30%) با یکدیگر ترکیب شده و سپس الیاف شیشه خردشده (معادل 15%) و در آخر هاردنر به ترکیب اضافه شده و تا اختلاط کامل به آرامی هم‌زده شده است. لازم است الیاف شیشه در فاصله‌های زمانی و به‌مرور اضافه شوند تا در کل حجم به‌خوبی پخش شده و از تجمع آن‌ها در یک قسمت جلوگیری شود. پس از این مرحله، ترکیب آماده‌شده به آرامی و در چند مرحله داخل قالب سیلیکونی ریخته شده و پس از کامل شدن این فرآیند، قالب به مدت 24 ساعت در دمای محیط قرار داده شده تا هسته به‌طور کامل شکل گرفته و سفت شود. شکل 2-ب) هسته ساخته‌شده از فوم ترکیبی تقویت‌شده با الیاف شیشه خردشده را نشان می‌دهد. در شکل 3 نیز تصویر میکروسکوپی⁴ از ترکیب ایجاد شده از رزین اپوکسی و پودر میکروبالن نشان داده شده است.



(الف-ا)



(ب-ب)

Fig. 2 Syntactic foam core, a) without glass fiber, b) Reinforced with glass fiber

شکل 2 هسته فوم ترکیبی، الف) بدون تقویت کننده الیاف شیشه، ب) تقویت‌شده با الیاف شیشه

جدول 4 مشخصات فنی و فیزیکی ورق آلومینیومی [19]

Table 4 Technical & physical specifications of aluminum sheet [19]

| عنوان پارامتر | مقدار |
|-----------------------------------|-------------------|
| شرکت سازنده | آلومینیوم پارسیان |
| نام آلیاژ | B3105 |
| نام تجاری | MFG J678 |
| ابعاد ورق (m) | 1×2 |
| جرم واحد سطح (kg/m ²) | 1.62 |
| چگالی (kg/m ³) | 2700 |
| ضخامت (mm) | 0.3 |

3- مطالعه آزمایشگاهی

1-3- سازه ساندویچی

قالب سیلیکونی: برای ساخت هسته فوم ترکیبی نیاز به یک عدد قالب سیلیکونی می‌باشد که برای ساخت آن با استفاده از روش قالب‌گیری¹، یک عدد قطعه مستر² لازم است. در این پژوهش قطعه مستر از جنس پلکسی گلاس³ بوده که سطوح صاف و کاملاً صیقلی داشته است. یکی از روش‌های متداول در قالب‌گیری سیلیکونی که در این جا نیز مورد استفاده قرار گرفته، این است که سیلیکون از یک گوشه درون قالب تزریق شده تا یک لایه نازک تشکیل دهد. در این‌صورت اگر حبابی از مرحله ترکیب و فرآیند هم‌زنی باقی‌مانده باشد، فرصت خارج شدن از لایه را خواهد داشت. شکل 1 قالب سیلیکونی ساخته شده برای این پژوهش را نشان می‌دهد.



Fig. 1 Silicon die

شکل 1 قالب سیلیکونی (ساخته شده در این پژوهش)

هسته فوم ترکیبی (بدون تقویت کننده الیاف شیشه): برای ساخت هسته فوم ترکیبی باید رزین و هاردنر با پودر میکروبالن ترکیب شود. این کار با حداقل سرعت انجام شده تا احتمال شکستگی در میکروبالن‌ها به حداقل برسد. به‌منظور محاسبه وزن میکروبالن لازم برای درصدحجمی‌های موردنظر، ابتدا حجم هسته مشخص شده؛ سپس با استفاده از تناسب و درصدگیری، حجم و نهایتاً وزن میکروبالن موردنیاز تعیین شده است. در نتیجه برای ساخت هسته با درصدحجمی 20%، 30% و 60% به ترتیب نیاز به 34، 51 و 102 گرم پودر میکروبالن می‌باشد. همچنین با توجه به حجم هسته، 200 گرم رزین اپوکسی مورد نیاز است. پس از اختلاط کامل رزین و میکروبالن، هاردنر به آن‌ها اضافه شده و ترکیب حاصل، داخل قالب سیلیکونی ساخته‌شده، ریخته شده است.

³ Plexy Glass

⁴ Scanning Electron Microscope (SEM)

¹ Casting

² Master piece



Fig. 4 Aluminum lower layer

شکل 4 لایه آلومینیوم زیرین

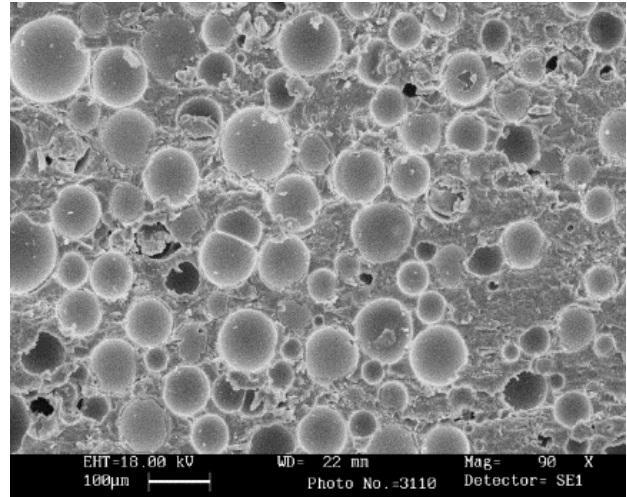


Fig. 3 SEM of epoxy resin and microballoon powder

شکل 3 تصویر میکروسکوپ الکترونی از ترکیب رزین اپوکسی و پودر میکروبالن



Fig. 5 FML lower layer

شکل 5 لایه FML زیرین



Fig. 6 FML lower layer and syntactic foam core

شکل 6 لایه FML زیرین و هسته فوم ترکیبی

ورق آلومینیومی: سطح کاملاً صاف و صیقلی ورق آلومینیومی می‌تواند موجب شود اتصال خوبی بین این لایه و لایه‌های کامپوزیت در سازه ایجاد نشود. به همین دلیل باید برای چسبندگی و اتصال بهتر آن‌ها به لایه‌های مجاور و جلوگیری از پدیده ورقه ورقه شدن¹، سطح آن‌ها زبر شوند. برای انجام این کار در این پژوهش، از روش مکانیکی با سنباده P400 استفاده شده است. با انجام این کار، شیارهای بسیار ظریفی تحت زاویه $\pm 45^\circ$ روی سطوح ورق‌های آلومینیومی ایجاد شده که موجب می‌شود رزین به عمق سطوح نفوذ کرده و اتصال خوبی بین لایه‌های مجاور ایجاد شود. پس از پایان عملیات سنباده‌زنی، سطح ورق‌ها با محلول استون² شستشو داده شده و خشک شده است.

ساخت سازه ساندویچی: به منظور استفاده همزمان از ویژگی‌های ورق فلزی و کامپوزیت الیافی برای بهبود خواص سازه ساندویچی، در هر طرف از هسته‌ها، دو لایه کامپوزیت GFRP و یک لایه ورق آلومینیومی به کار برده شده است. برای چیدمان لایه‌ها روی یکدیگر و ساخت سازه ساندویچی نیز از روش لایه‌چینی دستی³ استفاده شده است. ابتدا یکی از ورق‌های آلومینیومی آماده‌شده روی میز گذاشته شده؛ به‌صورتی که طرف سنباده‌خورده آن، به سمت بالا باشد و سطح کل آن، آغشته به رزین می‌گردد؛ سپس یک لایه از الیاف روی آن، قرار داده شده و پس از آغشته کردن کامل سطح الیاف به رزین، لایه بعدی الیاف نیز قرار داده شده و مجدداً سطح بالایی آن به رزین آغشته می‌شود. برای اطمینان از چسبیدن کامل سطح هسته و الیاف به یکدیگر و عدم وجود فضای خالی بین آن‌ها، سطح زیرین هسته نیز به رزین آغشته و هسته روی الیاف قرار داده می‌شود. همین مراحل برای نیمه بالایی سازه نیز انجام شده است. شکل‌های 4 تا 7 مراحل فرآیند ساخت نمونه‌ها را نشان می‌دهند. در شکل 8 نیز تصویر شماتیک سطح مقطع کامل سازه ساخته شده نشان داده شده است. برای ایجاد اتصال کامل بین لایه‌ها، سازه‌ها با استفاده از یک جک 2 تنی به مدت 24 ساعت تحت فشار قرار گرفته‌اند که با انجام این کار، رزین مازاد بین لایه‌های مونتاژ شده از اطراف سازه، بیرون زده و موجب می‌شود سطوح به طور کامل به یکدیگر چسبیده و حبابی بین آن‌ها باقی نماند. باید توجه داشت که در صورت وجود حباب بین سطوح، نتایج آزمایش شدیداً تحت تاثیر قرار خواهد گرفت.

¹ Delamination

² Acetone

³ Hand Lay-up

تفنگ گازی: نحوه کار دستگاه به این صورت است که با فشردن کلید استارت روی صفحه کنترل، شیر برقی فعال شده و با آزاد کردن هوای فشرده داخل مخزن، پرتابه به سمت هدف شلیک می‌شود. شکل 10، نمایی از دستگاه تفنگ گازی استفاده شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

پرتابه: در پژوهش حاضر از پرتابه سرمخروطی آلومینیومی استفاده شده است. شکل 11-الف) نمونه واقعی پرتابه و شکل 11-ب) شکل شماتیک آن را به همراه ابعاد نشان می‌دهد. سایر مشخصات پرتابه در جدول 5 آورده شده است. شکل‌های 12-الف) و 12-ب) نیز به ترتیب نمونه بسته‌شده در فیکسچر دستگاه را در دو حالت قبل و بعد از آزمون نشان می‌دهند. همچنین تصویر یکی از نمونه‌ها بعد از انجام آزمایش از دو نمای عقب و جلو در شکل‌های 13-الف) و 13-ب) نشان داده شده است.

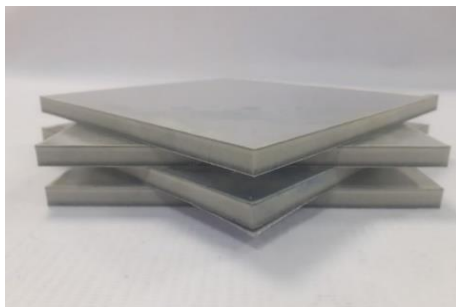


Fig. 7 Completed sandwich structure

شکل 7 سازه ساندویچی کامل شده



(الف-ا)



(ب-ب)

Fig. 9 Final samples, a) Before waterjet, b) After waterjet

شکل 9 نمونه‌های نهایی، الف) قبل از برش واترجت، ب) بعد از برش واترجت

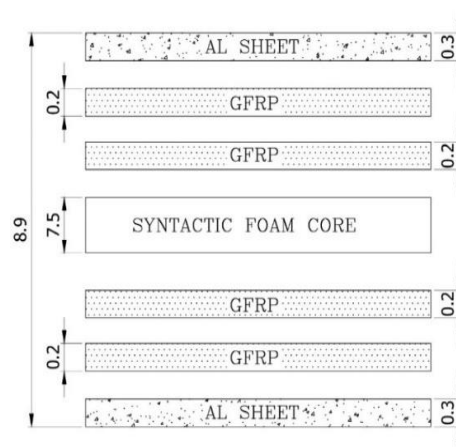


Fig. 8 Schematic of cross section sandwich structure

شکل 8 تصویر شماتیک سطح مقطع سازه ساندویچی

به منظور ایجاد خصوصیات یکنواخت در تمامی نمونه‌ها، ابتدا نمونه اولیه به صورت یکپارچه ساخته شده و سپس با استفاده از دستگاه برش واترجت¹، نمونه‌های نهایی با ابعاد مورد نظر از داخل آن بریده می‌شوند؛ به‌صورتی که در گیره دستگاه تفنگ گازی، قابل گیره‌بندی باشند. عرض برش واترجت 1 میلی‌متر و زمان لازم برای برش 10 دقیقه بوده است. به‌دلیل سختی سازه ساندویچی ساخته‌شده، همراه آب، ماسه سیلیس نیز اضافه شده است. پس از کامل شدن عملیات برشکاری، چهار دسته چهار تایی سازه ساندویچی با ابعاد 135×135 میلی‌متر ساخته شده که سه دسته با درصدحجمی 20%، 30% و 60% میکروبالن بوده و یک دسته هم با درصدحجمی 30% میکروبالن است که با 15% الیاف شیشه خردشده، تقویت شده است. در شکل‌های 9-الف) و 9-ب)، به ترتیب نمایی از سطح مقطع نمونه‌های نهایی ساخته‌شده پیش از برش واترجت و بعد از آن، نشان داده شده است.

2-3- آزمون ضربه سرعت بالا

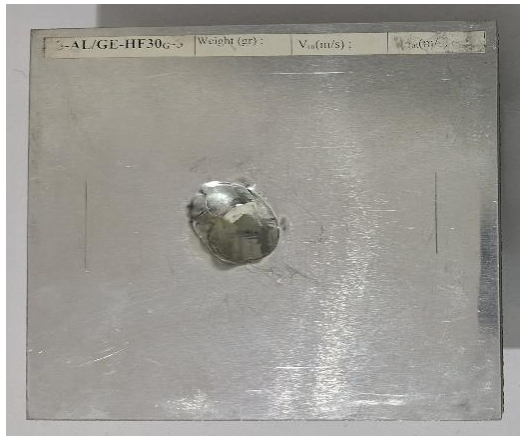
آزمون با استفاده از یک دستگاه تفنگ گازی تک‌مرحله‌ای و پرتابه سرمخروطی آلومینیومی، تحت زاویه 90 درجه (عمود بر سازه) انجام شده است. به‌منظور اطمینان از نفوذ کامل پرتابه در نمونه‌ها، سرعت اولیه پرتابه با آزمون و خطا بر روی فشار کمپرسور، در سرعت 135 متربرثانه تنظیم شده است.



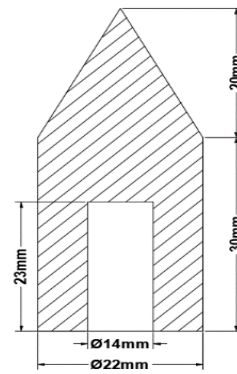
Fig. 10 Gas gun

شکل 10 دستگاه تفنگ گازی (استفاده شده در این پژوهش)

¹ Waterjet cutting machine



(الف-ا)



(ب-ب)



(الف-ا)

Fig. 11 The projectile used in this research, a) Real sample, b) Schematic of the projectile

شکل 11 پرتابه استفاده شده در این پژوهش، الف) نمونه واقعی، ب) شکل شماتیک

جدول 5 مشخصات پرتابه (استفاده شده در این پژوهش)

Table 5 Projectile specifications

| مقدار | عنوان پارامتر |
|-------|------------------------|
| 21.5 | زاویه سر پرتابه (درجه) |
| 30 | جرم (gr) |



(ب-ب)

Fig. 13 Specimen after testing, a) Front view, b) Back view

شکل 13 تصویر نمونه بعد از انجام آزمایش، الف) نمای روبرو، ب) نمای پشت

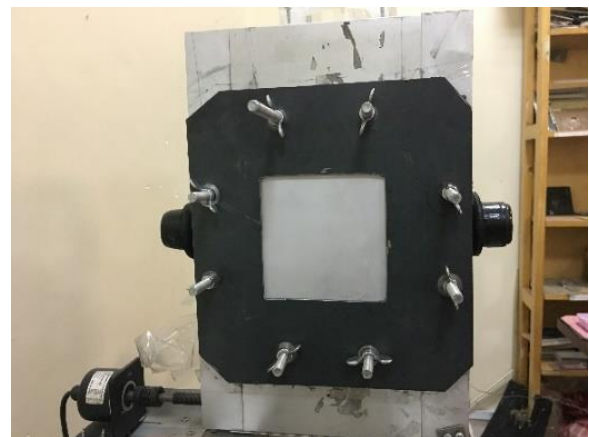
4-نتایج و بحث

از نتایج آزمون‌های انجام شده روی سازه‌های ساندویچی، برای بررسی اثر پارامترهای درصدحجمی میکروبالن و تقویت هسته فوم ترکیبی با الیاف شیشه بر خواص بالستیک این سازه‌ها استفاده شده است. پارامتر سرعت باقی‌مانده پرتابه توسط سنسورهای مخصوص دستگاه، اندازه‌گیری شده و با استفاده از مقدار به‌دست آمده و همچنین سرعت ورودی و جرم پرتابه، دو پارامتر سرعت حد بالستیک و انرژی نفوذ سازه به ترتیب از روابط 1 و 2 به‌دست آمده‌اند.

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

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

در این روابط V_{in} ، m و V_{out} به ترتیب جرم، سرعت ورودی و سرعت باقی‌مانده پرتابه می‌باشند. برای مقایسه و بررسی نمونه‌ها از لحاظ شکل ظاهری و سایر پارامترهای موردنیاز، از هر نوع سازه، یک نمونه سالم نگه داشته شده و آزمایش بر روی سه نمونه دیگر انجام شده است. مقادیر عددی به‌دست آمده برای سرعت باقی‌مانده پرتابه، سرعت حد بالستیک و انرژی نفوذ سازه برای حالت‌های مختلف در جدول‌های 6 تا 9 آورده شده است. همان‌طور که پیش از این نیز گفته شد، سرعت اولیه پرتابه 135 متربرثانی تنظیم شده که در نتیجه، پرتابه به طور کامل از سازه‌ها عبور کرده است. برای مقایسه بهتر اثر



(الف-ا)



(ب-ب)

Fig. 12 Clamped specimen in the fixture, a) before testing, b) after testing

شکل 12 نمونه بسته شده در فیکسچر دستگاه، الف) قبل از انجام آزمایش، ب) بعد از

انجام آزمایش

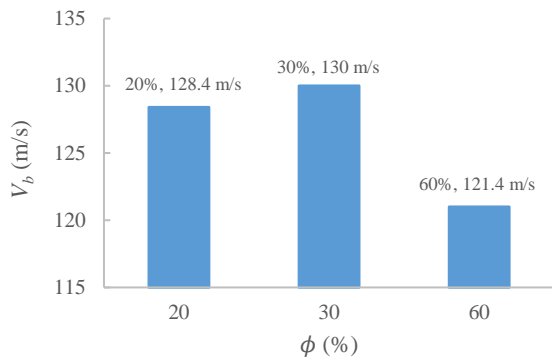


Fig. 15 Ballistic limit velocity of the structure as volume fractions of 20%, 30% and 60% microballoon

شکل 15 سرعت حد بالستیک پرتابه برای درصدحجمی‌های 20%، 30% و 60% میکروبالن

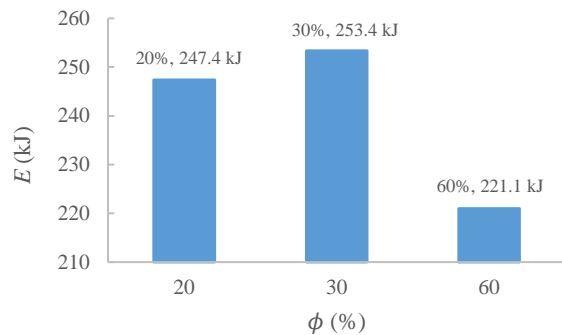


Fig. 16 Penetration energy of the structure as volume fractions of 20%, 30% and 60% microballoon

شکل 16 انرژی نفوذ سازه برای درصدحجمی‌های 20%، 30% و 60% میکروبالن

نتایج مربوط به سرعت باقی‌مانده پرتابه در شکل 14 نشان می‌دهند که با افزایش درصدحجمی میکروبالن از 20% تا 30%، سرعت باقی‌مانده پرتابه از 41.3 متربرثانیه تا 35.7 متربرثانیه کاهش یافته (حدود 1.2%); درحالی‌که در ادامه با افزایش درصدحجمی میکروبالن از 30% تا 60%، سرعت باقی‌مانده پرتابه افزایش قابل توجهی داشته و از 35.7 متربرثانیه به 57.3 متربرثانیه رسیده است (حدود 37.7%).

اعداد مربوط به سرعت حد بالستیک در شکل 15 نشان می‌دهند با افزایش درصدحجمی میکروبالن از 20% تا 30%، سرعت حد بالستیک پرتابه از 128.4 متربرثانیه به 130 متربرثانیه افزایش یافته (حدود 1.3%); ولی با افزایش درصدحجمی میکروبالن از 30% تا 60%، سرعت حد بالستیک سازه از 130 متربرثانیه تا 121.5 متربرثانیه کاهش یافته است (حدود 7%).

مقادیر مربوط به انرژی نفوذ سازه ساندویچی نشان می‌دهند با افزایش درصدحجمی میکروبالن از 20% تا 30%، انرژی نفوذ از 247.4 کیلوژول تا 253.4 کیلوژول افزایش یافته (حدود 2.5%) و با افزایش درصدحجمی میکروبالن از 30% تا 60%، مقدار انرژی نفوذ از 253.4 کیلوژول تا 221.1 کیلوژول کاهش یافته است (حدود 12.7%).

با توجه به نتایج به‌دست آمده، می‌توان گفت که به‌طور کلی با افزایش درصدحجمی میکروبالن وزن سازه ساندویچی کاهش یافته؛ ولی روند بهبود و تقویت خواص بالستیک سازه‌ها، دو رفتار متفاوت از خود نشان داده است. مشاهده شده است که با افزایش درصدحجمی میکروبالن از 20% تا 30%، مقاومت سازه به ضربه سرعت بالا افزایش یافته؛ در حالی که با افزایش درصدحجمی میکروبالن از 30% تا 60%، روند تغییرات رفتار بالستیک سازه

پارامتر درصدحجمی میکروبالن بر رفتار ضربه سرعت بالای سازه‌های ساخته‌شده، نتایج ارائه شده در جدول‌های 6 تا 9، به‌صورت نمودار نیز بیان شده‌اند. لازم به‌ذکر است در ترسیم نمودارها از مقادیر میانگین هر پارامتر استفاده شده است. شکل‌های 14، 15 و 16 به‌ترتیب نشان دهنده تغییرات سرعت باقی‌مانده پرتابه، سرعت حد بالستیک و انرژی نفوذ سازه‌های ساندویچی به ازای درصدحجمی‌های مختلف میکروبالن می‌باشند.

جدول 6 نتایج حاصل از آزمایش نمونه‌های با درصدحجمی 20% میکروبالن

Table 6 The test results of the samples with 20% microballoon

| عنوان نمونه | V_{in} (m/s) | V_{out} (m/s) | V_b (m/s) | E (kJ) |
|----------------|----------------|-----------------|-------------|----------|
| SF20-1 | 135 | 37 | 129.8 | 252.7 |
| SF20-2 | 135 | 41 | 128.6 | 248 |
| SF20-3 | 135 | 46 | 126.9 | 241.5 |
| مقادیر میانگین | 135 | 41.3 | 128.4 | 247.4 |
| انحراف معیار | 0 | 3.7 | 1.2 | 4.6 |

جدول 7 نتایج حاصل از آزمایش نمونه‌های با درصدحجمی 30% میکروبالن

Table 7 The test results of the samples with 30% microballoon

| عنوان نمونه | V_{in} (m/s) | V_{out} (m/s) | V_b (m/s) | E (kJ) |
|----------------|----------------|-----------------|-------------|----------|
| SF30-1 | 135 | 30 | 131.6 | 259.7 |
| SF30-2 | 135 | 35 | 130 | 253.5 |
| SF30-3 | 135 | 42 | 128.3 | 247 |
| مقادیر میانگین | 135 | 35.7 | 130 | 253.4 |
| انحراف معیار | 0 | 4.9 | 1.3 | 5.2 |

جدول 8 نتایج حاصل از آزمایش نمونه‌های با درصدحجمی 60% میکروبالن

Table 8 The test results of the samples with 60% microballoon

| عنوان نمونه | V_{in} (m/s) | V_{out} (m/s) | V_b (m/s) | E (kJ) |
|----------------|----------------|-----------------|-------------|----------|
| SF60-1 | 135 | 47 | 126.5 | 238.1 |
| SF60-2 | 135 | 55 | 123 | 227 |
| SF60-3 | 135 | 70 | 115 | 198.3 |
| مقادیر میانگین | 135 | 57.3 | 121.5 | 221.1 |
| انحراف معیار | 0 | 9.5 | 4.8 | 16.8 |

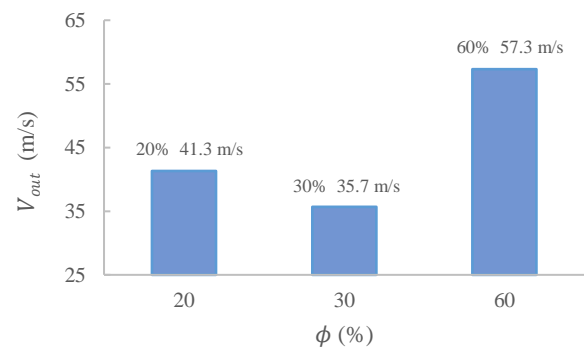


Fig. 14 Residual velocity of the projectile as volume fractions of 20%, 30% and 60% microballoon

شکل 14 سرعت باقی‌مانده پرتابه برای درصدحجمی‌های 20%، 30% و 60% میکروبالن

جدول 9 نتایج حاصل از آزمایش نمونه‌های با درصدحجمی 30% میکروبالن و هسته تقویت‌شده با 15% الیاف شیشه

Table 9 The test results of the samples with 30% volume fraction of microballoon and core reinforced with 15% glass fiber

| عنوان نمونه | V_{in} (m/s) | V_{out} (m/s) | V_b (m/s) | E (kJ) |
|----------------|----------------|-----------------|-------------|----------|
| SF30+GF-1 | 135 | 24 | 133 | 265.3 |
| SF30+GF-2 | 135 | 27 | 132 | 261.3 |
| SF30+GF-3 | 135 | 31 | 131 | 257.4 |
| مقادیر میانگین | 135 | 27.3 | 132 | 261.3 |
| انحراف معیار | 0 | 2.7 | 0.8 | 3.2 |

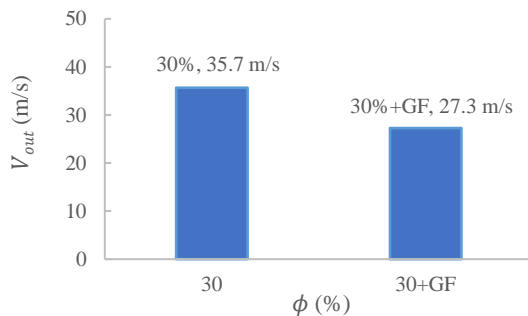


Fig. 17 Residual velocity of the projectile in two cases of volume fraction 30% and 30%+GF

شکل 17 سرعت باقی‌مانده پرتابه در دو حالت درصدحجمی 30% و 30%+GF

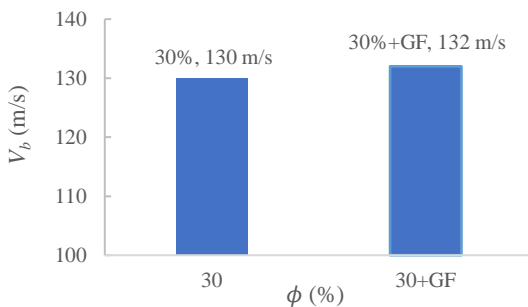


Fig. 18 Ballistic limit velocity of the structure in two cases of volume fraction of 30% and 30%+GF

شکل 18 سرعت حد بالستیک سازه در دو حالت درصدحجمی 30% و 30%+GF

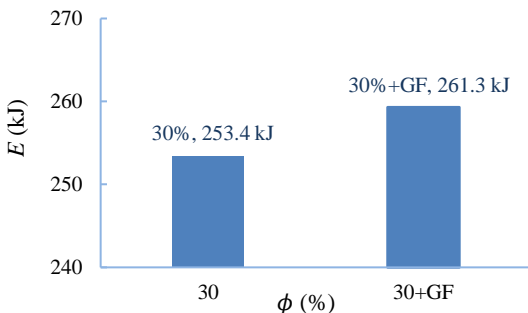


Fig. 19 Penetration energy of the structure in two cases of volume fraction 30% and 30%+GF

شکل 19 انرژی نفوذ سازه در دو حالت درصدحجمی 30% و 30%+GF

معکوس شده و مقاومت به‌ضربه کاهش یافته است. بنابراین می‌توان گفت از بین درصدحجمی‌های بررسی شده در این پژوهش، درصدحجمی بهینه میکروبالن‌ها برای ساخت سازه‌هایی که در برابر ضربه سرعت بالا بهترین مقاومت را داشته باشند، درصدحجمی 30% می‌باشد.

برای تفسیر این نتایج و بحث بر روی آنها، مطالب مختلفی می‌توان بیان کرد. اولین مسأله‌ای که باید به آن اشاره کرد، این است که بررسی‌ها نشان داده با افزایش درصدحجمی میکروبالن از 20% تا 30%، ناحیه تنش ثابت یا پلاتو¹ در نمودار تنش-کرنش فوم ترکیبی بزرگ‌تر شده یا به عبارت دیگر متراکم‌شدن فوم و افزایش تنش دیرتر شروع خواهد شد. این رفتار یکی از دلایلی است که موجب می‌شود از فوم‌های ترکیبی در سازه‌های محافظ استفاده شود. با وجود اینکه رزین خالص تحمل بار و تنش بیشتری دارد؛ ولی در صورت استفاده به عنوان هسته در سازه‌های ساندویچی، بار را به لایه‌های بعد از خود منتقل خواهد کرد؛ درحالی که فوم ترکیبی به دلیل تخریب ساختار آن، جابه‌جایی کمتری داشته و بار کمتری را به لایه‌های بعد از خود منتقل می‌کند. مسأله دیگری که می‌توان گفت این است که به طور کلی، با توجه به شکل و ساختار میکروبالن‌ها (کره توخالی)، با افزایش درصدحجمی آن‌ها، مقدار گاز موجود در فوم (هوا) نیز افزایش می‌یابد؛ ولی مقدار این افزایش در حالتی که درصدحجمی میکروبالن‌ها از 20% به 30% می‌رسد، در مقایسه با حالتی که از 30% به 60% رسیده است، چندان زیاد نبوده؛ به طوری که در حالت کسرحجمی 60%، در هنگام اختلاط رزین و میکروبالن، حباب بسیار بیشتری در ماتریس ایجاد شده است. از طرف دیگر به دلیل تراکم و غلظت بالای ترکیب در حالت کسرحجمی 60%، در هنگام اختلاط رزین و میکروبالن، برخورد میکروبالن‌ها به یکدیگر افزایش یافته و در نتیجه تعداد بیشتری از آن‌ها آسیب می‌بینند که این پدیده منجر به ضعیف شدن فوم در مقابل ضربه و کاهش انرژی جذب‌شده توسط فوم تحت ضربه می‌گردد. در صورتی که این اتفاق تا کسرحجمی 30% چندان دیده نمی‌شود [20]. همچنین نتایج پژوهش‌های پیشین نشان داده است که در طی فرآیند نفوذ، مکانیزم تخریب پلاگینگ² هسته، مهم‌ترین مکانیزم جذب انرژی پرتابه می‌باشد. فرآیند این مکانیزم تخریب و جذب انرژی که توسط آن انجام می‌شود، به طور مستقیم با استحکام کششی و فشاری فوم در ارتباط است. با افزایش درصدحجمی میکروبالن از 20% تا 30%، استحکام‌های کششی و فشاری فوم افزایش می‌یابد. علاوه بر این، مدول الاستیک سازه نیز افزایش یافته و موجب افزایش جذب انرژی الاستیک می‌شود. درحالی که با افزایش درصدحجمی میکروبالن از 30% به 60%، به دلیل آسیب بیشتر میکروبالن‌ها، خواص مکانیکی کششی و فشاری فوم کاهش یافته و در نتیجه جذب انرژی نیز کاهش می‌یابد [20].

با توجه به این نکته یکی دیگر از اهداف پژوهش حاضر بررسی اثر تقویت هسته فوم ترکیبی با الیاف شیشه بر رفتار ضربه سرعت بالای سازه بوده است، آزمایش ضربه سرعت بالا بر روی سازه‌هایی با هسته فوم ترکیبی با 30% میکروبالن و تقویت‌شده با 15% الیاف شیشه نیز انجام شده است. نتایج به‌دست آمده، در جدول 9 ارائه شده است.

مقایسه سرعت باقی‌مانده پرتابه، سرعت حد بالستیک و انرژی نفوذ سازه با هسته فوم ترکیبی 30% میکروبالن برای دو حالت هسته بدون الیاف شیشه و هسته تقویت‌شده با الیاف شیشه، به ترتیب در شکل‌های 17، 18 و 19 نشان داده شده‌اند.

¹ Plateau

² Plugging

کوچک‌تر باشد، انرژی جذب شده بالاتر خواهد بود. ارتباط مشاهده شده بین درصدحجمی میکروبالن‌ها و اندازه پلاگ مخروطی به این صورت بوده است که در فوم ترکیبی با درصدحجمی 20%، پلاگ مخروطی بزرگتری ایجاد شده؛ ولی مقدار خرد شدن آن کمتر است و به همین صورت با افزایش درصدحجمی میکروبالن، اندازه پلاگ مخروطی کاهش و مقدار خرد شدن آن افزایش یافته است.

اگر پلاگ جدا شده از هسته به شکل یک مخروط ناقص در نظر گرفته شود، با بررسی دقیق آن‌ها مشاهده شده است که در تمامی موارد، سطح کوچک‌تر پلاگ به‌اندازه پیشانی پرتابه بوده؛ ولی ارتفاع مخروط و اندازه سطح پشتی آن در فوم‌های با درصدحجمی مختلف، متفاوت هستند.

مشاهدات نشان داده است که ترک تشکیل دهنده پلاگ مخروطی از سطح بالایی هسته شروع نشده است. این پدیده بیانگر این است که قبل از ایجاد پلاگ، پرتابه تا اندازه‌ای در هدف فرو رفته و شروع شکست هسته کمی به تأخیر می‌افتد. از آن جا که با افزایش درصدحجمی میکروبالن‌ها، استحکام فشاری فوم ترکیبی کاهش می‌یابد، انتظار می‌رود پرتابه در فوم با درصدحجمی 20% بیشتر فرو رود که نتایج آزمایش این مسأله را تایید کرده است. ولی مقدار نفوذ در فوم 60% تغییر چندانی نداشته؛ زیرا علاوه بر کاهش استحکام کششی فوم، نیروی لازم برای تشکیل پلاگ نیز کمتر شده است. بنابراین قبل از این که پرتابه نفوذ موضعی بیشتری را تجربه کند، پدیده شکست مخروطی آغاز می‌شود. با توجه به مجموع مشاهدات صورت گرفته از نمونه‌های آزمایش شده، فرآیند نفوذ پرتابه در هدف را می‌توان به این صورت بیان کرد. هنگامی که پرتابه با سرعت بالا به رویه جلویی هدف برخورد می‌کند، پرتابه به صورت پانچ عمل کرده و پلاگ رویه جلویی را جدا می‌کند. با پیشروی تدریجی پرتابه، تغییر شکل‌های خمشی و برشی در هدف رخ می‌دهد و کرنش‌های ایجاد شده مقداری از انرژی هدف را جذب می‌کند. با افزایش نیروی تماسی بین سر پرتابه و هدف، تنش‌های برشی بین لایه‌ای و همچنین بین رویه‌ها و هسته افزایش یافته که در صورت رسیدن به مقدار ماکزیمم خود، می‌تواند منجر به وقوع پدیده لایه‌لایه‌شدگی شود. با افزایش بیشتر نیروی پرتابه، هسته فوم زیر پیشانی پرتابه لهیده شده و خردشدگی موضعی فوم زیر نوک پرتابه اتفاق می‌افتد. با شروع نفوذ پرتابه در هدف، نیروی اصطکاک بین سطح جانبی پرتابه و هدف موجب کاهش سرعت پرتابه می‌شود. با افزایش بیشتر نفوذ، تغییر شکل هدف و نیروی وارد به آن بیشتر شده و در نتیجه انرژی بیشتری از پرتابه خواهد گرفت. علاوه بر این، مکانیزم‌های تخریب به تدریج موجب کاهش سرعت و انرژی پرتابه می‌شوند. زمانی که نیروی واردشده به سازه به اندازه نیروی لازم برای جدا کردن پلاگ مخروطی برسد، پلاگ جدا شده و خرد می‌شود. این مکانیزم تخریب به عنوان شکست هسته شناخته می‌شود و یکی از مهم‌ترین مکانیزم‌های جذب انرژی پرتابه می‌باشد. پس از شکست هسته، پرتابه به همراه پلاگ رویه جلویی و پلاگ ناشی از هسته خرد شده، به رویه پشتی، نیرو وارد کرده و موجب افزایش کرنش آن خواهد شد. زمانی که کرنش رویه پشتی به حد بحرانی خود برسد، این رویه نیز از محل لبه پرتابه گسیخته شده و پرتابه همراه با پلاگ‌های رویه جلویی و هسته خرد شده، خارج می‌شوند.

با توجه به فرآیند نفوذ پرتابه در هدف، مکانیزم‌های تخریب را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- ✓ برش رویه جلویی سازه و تشکیل پلاگ
- ✓ لهیدگی هسته زیر پیشانی پرتابه و نفوذ موضعی
- ✓ برش رویه پشتی سازه
- ✓ اصطکاک بین پرتابه و هدف

اطلاعات جدول‌های 7 و 9 و همچنین شکل 17، نشان می‌دهند که در صورت تقویت هسته فوم ترکیبی با 15% الیاف شیشه خرد شده، سرعت باقی‌مانده پرتابه از 35.7 متربرثانی به 27.3 متربرثانی کاهش می‌یابد (حدود 23.5%).

علاوه بر این، براساس مقادیر ارائه شده در جدول‌های 7 و 9 و همچنین شکل 18، اضافه کردن الیاف شیشه به فوم ترکیبی با درصدحجمی 30% میکروبالن، موجب افزایش سرعت حد بالستیک سازه از 130 متربرثانی به 132 متربرثانی شده است (حدود 1.6%).

مطابق با مقادیر ارائه شده در جدول‌های 7 و 9 و همچنین شکل 19، مشاهده می‌شود که با اضافه کردن الیاف شیشه به هسته فوم ترکیبی با درصدحجمی 30% میکروبالن، انرژی نفوذ سازه از 253.4 کیلوژول به 261.3 کیلوژول افزایش یافته است (حدود 3.1%).

به طور کلی نتایج به‌دست آمده در این مطالعه نشان می‌دهند که تقویت هسته فوم ترکیبی با الیاف شیشه بیشترین اثر را بر کاهش سرعت باقی‌مانده پرتابه داشته؛ ولی اثر کمتری بر افزایش سرعت حد بالستیک و انرژی نفوذ سازه گذاشته است. روند کلی این نتایج نشان داده‌اند که تقویت هسته فوم ترکیبی با الیاف شیشه موجب افزایش استحکام و مقاومت سازه شده و در نتیجه، رفتار ضربه سرعت بالای سازه بهبود می‌یابد. برای توضیح این پدیده، دلایل مختلفی می‌توان بیان کرد. اولین مسأله‌ای که باید به آن اشاره کرد، این است که بررسی‌ها نشان داده در صورت تقویت هسته با الیاف، چسبندگی و تعامل الیاف و ماتریس اپوکسی تقویت می‌شود. با بهبود چسبندگی بین اجزاء، به دلیل مکانیزم پل‌زنی، انتقال تنش بین الیاف و ماتریس بهتر انجام شده و در نتیجه چقرمگی شکست سازه افزایش می‌یابد [21].

مسأله دیگری که می‌توان بیان کرد این است که با افزودن تقویت‌کننده‌ها به هسته فوم، ویسکوزیته فوم افزایش یافته که این اتفاق موجب غیرفعال شدن گاززدایی و در نتیجه افزایش شکنندگی فوم ترکیبی شده است [21].

مقایسه روند نتایج این پژوهش برای بررسی تأثیر تغییرات درصدحجمی میکروبالن و همچنین تقویت هسته فوم ترکیبی با الیاف شیشه بر رفتار ضربه سرعت بالا در سازه‌هایی با هسته فوم، با نتایج ارائه شده در مراجع دیگر همخوانی خوبی را نشان می‌دهند که در واقع تاییدکننده روند نتایج به‌دست آمده در تحقیق حاضر می‌باشند [15,11,10].

5- تحلیل مکانیزم‌های تخریب سازه

با بررسی نمونه‌ها پس از انجام آزمایش، دیده می‌شود که پلاگ تشکیل شده در رویه جلویی، هم‌اندازه با پیشانی پرتابه بوده و شکست لایه پشتی به شکل برش و به همان اندازه پیشانی پرتابه می‌باشد؛ ولی جدایش بین رویه‌ها و هسته مشاهده نشده است. یکسان بودن ناحیه شکست در رویه‌های جلویی و پشتی نمونه با اندازه نوک پرتابه، نشانه عدم چرخش پرتابه در طی فرآیند نفوذ و همچنین عمود بودن پرتابه نسبت به هدف است. نوع شکست رویه‌های جلویی و پشتی برای تمامی نمونه‌ها یکسان بوده و تفاوتی مشاهده نشده است. در همه نمونه‌ها، پلاگ مخروطی شکلی از هسته جدا شده و شکست یا ترکی در خارج از محدوده پلاگ مخروطی دیده نشده است. پلاگ مخروطی ایجاد شده به تکه‌های کوچکتری شکسته شده که با افزایش درصدحجمی میکروبالن، اندازه این تکه‌ها کوچکتر شده است.

به نظر می‌رسد جدا شدن پلاگ مخروطی سهم بزرگی از انرژی پرتابه را جذب می‌کند و با افزایش اندازه این پلاگ، انرژی جذب شده توسط هدف نیز بیشتر خواهد شد. همچنین هرچه تعداد تکه‌های پلاگ مخروطی بیشتر و اندازه آن‌ها

Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. 45, Article No. 244, 2023.

[6] Bibin, J., Reghunadhan Nair, C.P., "Handbook of Thermoset Plastics," Third ed., William Andrew Publishing, pp. 511-554, 2014.

[7] 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.

[8] 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.

[9] Şerban, D.A., Weissenborn, O., Geller, S., Marşavina, L., Gude, M., "Evaluation of the Mechanical and Morphological Properties of Long Fibre Reinforced Polyurethane Rigid Foams", *Polymer Testing*, Vol. 49, pp. 121-127, 2016.

[10] Okhawilal, M., Hizirolu, S., Rimdusit, S., "Measurement of Ballistic Impact Performance of Fiber Reinforced Polybenzoxazine/Polyurethane Composites", *Measurement*, Vol. 130, pp. 198-210, 2018.

[11] Mei, J., Liu, J., Zhang, M., Huang, W., "Experimental and Numerical Study on the Ballistic Impact Resistance of the CFRP Sandwich Panel with the X-frame Cores", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 232, 107649, 2022.

[12] Sharei, A., Safarabadi, M., Mashhadi, M. M., Solut, R. S., & Haghighi-Yazdi, M., "Experimental and Numerical Investigation of Low Velocity Impact on Hybrid Short-Fiber Reinforced Foam Core Sandwich Panel", *Journal of Composite Materials*, Vol. 55, No. 29, 2021.

[13] He, S., Carolan, D., Fergusson, A., Taylor, A.C., "Toughening epoxy syntactic foams with milled carbon fibres: Mechanical properties and toughening mechanisms", *Materials & Design*, Vol. 169, 107654, 2019.

[14] Zhi, C., Long, H., & Sun, F., "Low-velocity impact properties and finite element analysis of syntactic foam reinforced by warp-knitted spacer fabric", *Textile research journal*, Vol. 87, No. 16, pp. 1938-1952, 2017.

[15] 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.

[16] PMP Corporation, "Technical Data Sheet of Epoxy Resin ELR440," <https://www.pmpcompany.com>, 2019.

[17] PMP Corporation, "Technical Data Sheet of Microballoon," <https://www.pmpcompany.com>, 2019.

[18] Polyme Corporation "Physical and Mechanical Specification of Glass Fiber," <https://polyme.ir/product/fiberglass-woven-roving>, 2022.

[19] parsianaluminum Corporation "Technical and Physical Specification of Aluminum sheet," <http://www.parsianaluminum.com>, 2022.

[20] 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, 1255-1266, 2015

[21] 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

✓ تغییر شکل عمومی اجزای سازه و جذب انرژی پرتابه به صورت انرژی الاستیک

✓ حرکت اجزای سازه و جذب انرژی پرتابه به صورت انرژی جنبشی

6- نتیجه‌گیری

هدف از انجام این پژوهش تحلیل و بررسی اثر درصد حجمی میکروبالن و تقویت هسته فوم ترکیبی با الیاف شیشه خرد شده بر رفتار ضربه سرعت بالا در سازه‌های ساندویچی با ساختار جدید پیشنهادی بوده است. بر همین اساس، می‌توان نتایج به دست آمده را به صورت ذیل جمع‌بندی نمود:

✓ با افزایش درصد حجمی میکروبالن از 20% به 30%، سرعت باقی‌مانده پرتابه 1.2% کاهش یافته و سرعت حد بالستیک و انرژی نفوذ سازه به ترتیب 1.3% و 2.5% افزایش یافته‌اند که این تغییرات به معنای افزایش مقاومت به ضربه و بهبود رفتار ضربه سرعت بالا در سازه مورد نظر می‌باشد.

✓ با افزایش درصد حجمی میکروبالن از 30% به 60%، روند تغییرات معکوس شده و سرعت باقی‌مانده پرتابه 37.7% افزایش یافته؛ ولی مقادیر سرعت حد بالستیک و انرژی نفوذ سازه به ترتیب 7% و 12.7% کاهش یافته‌اند که این روند به معنای کاهش مقاومت به ضربه و تضعیف رفتار ضربه سرعت بالا در سازه مورد نظر می‌باشد.

✓ حد بهینه درصد حجمی میکروبالن در هسته‌های فوم ترکیبی آزمایش شده در این پژوهش، 30% می‌باشد.

✓ افزودن الیاف شیشه خرد شده به هسته فوم ترکیبی باعث 23.5% کاهش در سرعت باقی‌مانده پرتابه شده در حالی که سرعت حد بالستیک و انرژی نفوذ سازه را به ترتیب 1.6% و 3.1% افزایش داده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت تقویت هسته فوم ترکیبی با الیاف شیشه خرد شده موجب افزایش استحکام و سختی سازه و بهبود رفتار ضربه سرعت بالا در سازه مورد نظر شده است.

7- مراجع

[1] Safarabadi, M., Ashkani, P., & Ganjiani, S. M., "Finite Element Simulation of High Velocity Impact on Polymer Composite Plates", *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 2, pp. 157-168, 2018.

[2] Hoseinlghab, S., Farahani, M., & Safarabadi, M., "Improving the Impact Resistance of the Multilayer Composites using Nanoparticles", *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, Vol. 51, No. 6, pp. 3083-3099, 2021.

[3] Hoseinlghab, S., Farahani, M., Safarabadi, M., & Jalali, S. S., "Comparison and Identification of Efficient Nanoparticles to Improve the Impact Resistance of Glass/Epoxy Laminates: Experimental and Numerical Approaches", *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Vol. 30, No. 4, pp. 694-709, 2022.

[4] Hosseinkhani, M., Ghavami, H., Haghighi-Yazdi, M., Mosavi Mashhadi, M., & Safarabadi, M., "Investigation of Viscoelastic Properties in Composite Sandwich Panels Subjected to Low-Velocity Impact: Experimental and Numerical Approaches", *Journal of Sandwich Structures & Materials*, Vol. 25, No. 4, 2023.

[5] Khodaei, M., Safarabadi, M., Haghighi-Yazdi, M., & Farzannia, M. A., "On the Ballistic Impact Behavior of Foam-Filled Honeycomb Core/Composite Skin Sandwich Panels", *Journal of Brazilian*