



## بررسی تجربی اثر شکل ضربه‌زننده و لایه‌چینی رویه بر رفتار صفحات ساندویچی کامپوزیتی با هسته فوم آلومینیومی در ضربه با سرعت کم

محمد امین ترابی زاده

استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه ای خراسان رضوی، مشهد  
\* مشهد، صندوق پستی 91735-613، torabizadeh@yahoo.com

### چکیده

### اطلاعات مقاله

در این مقاله به بررسی اثر شکل ضربه‌زننده و نوع لایه‌چینی رویه صفحات ساندویچی کامپوزیتی تحت اثر ضربه وزنه‌افشان پرداخته شده است. هسته صفحه ساندویچی از نوع فوم آلومینیومی A356 تقویت‌شده با ذرات SiC تولیدشده با استفاده از روش ذوبی به کمک عامل فوم‌ساز CaCO<sub>3</sub> است. رویه صفحات از جنس شیشه‌اپوکسی با لایه‌چینی شبه‌همسانگرد، متعامد و نیز از لایه آلومینیومی خالص استفاده شده است. برای انجام آزمایش ضربه از دستگاه ضربه وزنه‌افشان و جهت بررسی اثر شکل ضربه‌زننده از سه نوع ضربه‌زننده کروی، سهموی و مخروطی استفاده شده است. برخی از پارامترهای موثر در ارزیابی رفتار مواد در بار ضربه شامل بیشینه نیروی برخورد، بیشینه جابجایی و مقدار انرژی ویژه جذب شده صفحه برای حالات مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج بیانگر آن است که هر چه شعاع انحنا ضربه‌زننده بیشتر باشد بیشینه نیروی برخورد بیشتر خواهد بود. همچنین صفحات با رویه کامپوزیتی شبه‌همسانگرد دارای بیشترین انرژی ویژه جذب شده و صفحه با رویه آلومینیومی کمترین میزان انرژی ویژه جذب شده را به خود اختصاص داده است. در خصوص بیشینه نیروی برخورد و بیشینه جابجایی میانی صفحه، رویه متعامد عملکرد بهتری دارد. لذا بسته به کاربرد صفحات ساندویچی استفاده از رویه های کامپوزیتی (شبه‌همسانگرد یا متعامد) بجای رویه آلومینیومی در طراحی سازه‌های جاذب انرژی توصیه می‌گردد.

دریافت: 1398/11/06

پذیرش: 1399/11/27

### کلیدواژگان:

ضربه سرعت پایین،  
ورق ساندویچی کامپوزیت،  
فوم آلومینیوم،  
شکل ضربه‌زننده،  
لایه‌چینی

## Experimental study of the effect of impact shape and skin layout on the behavior of aluminum foam core sandwich panels at low velocity impact load

Mohammad Amin Torabizadeh

Assistant professor, Faculty of Montazeri, Technical and Vocational University (TVU), Khorasan Razavi Branch, Mashhad, Iran.  
\* P.O.B. 91735-613, Mashhad, Iran, torabizadeh@yahoo.com

### Keywords

Low Velocity Impact,  
Composite Sandwich Sheet,  
Aluminum Foam,  
Impactor Shape,  
Layout

### Abstract

In this paper, we investigated the effect of impactor shape and surface layer on composite sandwich plates under the impact of drop weight. The core material of the sandwich plate was A356 aluminum foam reinforced with SiC particles produced by the fusion method using the CaCO<sub>3</sub> foam-forming agent. The plates were made of E-glass / epoxy with the quasi-isotropic and orthogonal layout as well as a pure aluminum layer. For the impact test, the drop weight impact device was used and to investigate the effect of the impactor shape spherical, parabolic and cone impactor manufactured. Some of the effective parameters for evaluating the material behavior under impact loads including maximum impact force, maximum displacement, and the amount of specific absorbed energy of the plate for different states, were investigated. The results showed that the higher the radius of impactor curvature, the greater the impact force would be. Also, the plates with a quasi-isotropic composite had the highest specific energy absorbed and the aluminum plate have the lowest amount of particular energy absorbed. In terms of maximum impact force and maximum mid-plate displacement, the cross-ply layout skin layer worked better. Therefore, depending on the application of sandwich plates, the use of composite skin (quasi-isotropic or cross-ply) surfaces instead of aluminum in the design of energy-absorbing structures was recommended.

### 1- مقدمه

مهندسی عمران با توجه به خواص مکانیکی منحصر بفرود خود گسترش یافته است. رفتار این مواد در مقابل بارهای ضربه‌ای یکی از بزرگترین نگرانی‌ها در این خصوص می‌باشد. بارهای ضربه می‌تواند بر اثر سقوط اجسام بوجود آید و

در دهه‌های اخیر، کاربرد صفحات ساندویچی کامپوزیتی<sup>1</sup> با هسته فوم آلومینیومی<sup>2</sup> در صنایع هوافضا، خودرو، انرژی‌های تجدید پذیر و حوزه

<sup>1</sup> Sandwich Panels

<sup>2</sup> Aluminum Foam

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Torabizadeh, M.A., "Experimental study of the effect of impact shape and skin layout on the behavior of aluminum foam core sandwich panels at low velocity impact load", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1153-1162, 2021.

اثر بار ضربه پرداخته‌اند. آنها نتایج تجربی خود را با استفاده از مدل تحلیلی مقایسه نمودند. آنها در نتایج خود جدایش رویه آلومینیومی از هسته را عامل اصلی تخریب نمونه‌ها اشاره نمودند. همچنین میزان جذب انرژی توسط نمونه‌ها را وابسته به خواص مکانیکی فوم هسته صفحات ساندویچی دانستند. لونگ<sup>9</sup> و همکاران [6] به مشخصه‌سازی فرآیند تخریب صفحات کامپوزیتی ساندویچی با هسته فومی تحت بار ضربه کم‌سرعت با استفاده از مدل المان-محدود پرداخته‌اند. آنها اثرات انرژی برخورد، چگالی فوم و لایه‌چینی را مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها دریافتند که نوع تخریب نمونه متأثر از میزان نفوذ ضربه‌زننده است. طوری که قبل از نفوذ جدایش صفحات رویه بر اساس قوانین مواد مرکب اتفاق افتاده و پس از نفوذ ناحیه تخریب به صورت حلقوی مشاهده می‌گردد. لیو<sup>10</sup> و همکاران [7] رفتار صفحات کامپوزیتی ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی و رویه کامپوزیتی فلزی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. با افزایش ضخامت فوم میزان جذب انرژی نیز افزایش یافت. همچنین با افزایش ضخامت لایه‌روی کامپوزیتی در میزان جذب انرژی به طور معناداری افزایش مشاهده گردید. همچنین انطباق خوبی میان نتایج تجربی و مدل المان محدود با استفاده از نرم‌افزار مشاهده نمودند. لیو و ژانگ<sup>11</sup> [8] نیز به بررسی رفتار صفحات کامپوزیتی با هسته فوم آلومینیومی تحت اثر ضربه با سرعت بالا پرداخته‌اند. آنها صحت نتایج تجربی خود را با استفاده از مدل المان محدود ارزیابی و اثر شکل ضربه‌زننده و نیز زاویه اصابت ضربه را مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج آنها بیانگر افزایش میزان انرژی جذب‌شده در اثر افزایش ضخامت لایه رویی بوده‌است. در این حالت جدایش لایه‌روی در سطح بالایی نمونه و علی‌الخصوص در اطراف محل برخورد ضربه‌زننده مشاهده گردیده- است. آنها همچنین با افزایش ضخامت هسته فوم آلومینیومی عدم جدایش لایه‌روی سطح بالایی صفحه از هسته فومی را گزارش نمودند. کارا<sup>12</sup> و همکاران [9] رفتار خمشی سازه‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی با ضخامت‌های متفاوت را مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها دریافتند که صفحات کامپوزیتی ساندویچی انتخاب مناسبی به منظور طراحی جاذب انرژی بوده و کارایی آنها با افزایش ضخامت فوم و تغییر نوع الیاف بکار گرفته شده در رویه نمونه‌ها متناسب می‌باشد. وانگ<sup>13</sup> و همکاران [10] با استفاده از روش تجربی رفتار صفحات ساندویچی تحت بار ضربه با سرعت متوسط را مورد مطالعه قرار دادند. آنها مشاهده کردند که ماده بکاررفته در هسته، نقش مهمی در تغییر شکل، مقدار انرژی جذب‌شده، مکانیزم تخریب و میزان نفوذ ضربه‌زننده در صفحه ایفا می‌کند. آنها هسته لانه‌زنبوی پلی‌پروپیلن<sup>14</sup> را انتخاب بهینه برای میزان تغییرشکل پس از ضربه معرفی نمودند. هان<sup>15</sup> و چو [11] با مقایسه مدل المان محدود با نتایج تجربی آزمون ضربه وزنه‌افتان به بررسی رفتار صفحات کامپوزیتی ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی و رویه فلزی پرداختند. نتایج آنها نشان‌دهنده آن بود که با انرژی برخورد 50 ژول، صرفاً رویه بالایی صفحه تخریب شد، با انرژی 70 ژول علاوه بر تخریب رویه بالایی نفوذ ضربه‌زننده مشاهده گردید و نهایتاً با انرژی 100 ژول نفوذ ضربه-زننده باعث تخریب رویه پایینی نیز شد. همچنین انطباق بسیار خوبی بین نتایج تجربی و عددی گزارش گردید. راجانیش<sup>16</sup> و همکاران [12] صفحات کامپوزیتی ساندویچی با هسته فومی و رویه فلزی ترد و نرم را مورد بررسی و

آسیب‌های داخلی قابل توجهی را ایجاد و موجب کاهش مقاومت باقی‌مانده<sup>1</sup> صفحات کامپوزیتی گردند. از طرفی به منظور کاهش وزن سازه، ایجاد حفره‌های پر شده از هوا یا گازهای خنثی در داخل ماده زمینه و تولید یک ماده متخلخل<sup>2</sup> تحت عنوان "فوم" مدنظر بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. بسیاری از فلزات و آلیاژها مانند آلومینیوم، فولاد، مس، نیکل، سرب، روی، منیزیم و تیتانیوم قابلیت فومی شدن را با استفاده از فرآیندهای تولیدی مختلف دارند. در این میان استفاده از فلز آلومینیوم به عنوان ماده زمینه فوم، دلیل داشتن وزن سبک و نقطه ذوب پایین و نیز بدلیل داشتن سختی ویژه<sup>3</sup> بالا، مقاومت خوب در برابر خوردگی، نسبت استحکام به وزن بالا، ظرفیت جذب انرژی عالی، قابلیت بازیافت و همچنین قابلیت تولید ساختارهای سلولی نسبتاً همگن و همسانگرد، توجه زیادی را در سالهای اخیر به خود جلب نموده است [1-2]. وجود زیرساختار سلولی در فوم‌های فلزی و به ویژه فوم-های آلومینیومی این امکان را برای آن‌ها فراهم می‌کند که مقدار زیادی از انرژی جنبشی ناشی از برخورد را قبل از این که موجب تخریب سازه گردد، جذب نماید و لذا در مواردی که مقاومت در برابر ضربه یا نفوذ نیاز است، این دسته از مواد به عنوان جاذب انرژی عمل می‌کنند. دارا بودن ویژگی‌های مذکور سبب شده تا فوم-های آلومینیومی در کاربردهای اشاره شده مورد استفاده قرار گیرد. همچنین از فوم آلومینیوم به عنوان ماده هسته در ساختارهای ساندویچی با رویه‌های متفاوت تحت بارگذاری مختلف از قبیل ضربه استفاده می‌شود.

فراحت و احمدی [1] ضمن ساخت دستگاه ضربه سقوط ثقلی کم سرعت به تحلیل رفتار فوم آلومینیومی تحت اثر بار ضربه به روش تجربی پرداخته‌اند. آنها در نتایج خود رفتار فوم آلومینیومی را شامل سه مرحله خطی، پلاتو و شکست مشاهده و افزایش انرژی جذب شده در این سه مرحله را بترتیب گزارش و همچنین انتخاب ماده سلولی فوم A356/SiC را به منظور طراحی جاذب‌های انرژی مناسب ذکر کردند. قاجار و رصاف [2] به بررسی اثر شکل ضربه‌زننده و نیز دمای محیط روی رفتار صفحات کامپوزیتی شیشه‌اپوکسی تحت اثر ضربه وزنه افتان<sup>4</sup> پرداخته‌اند. یافته‌های آنها بیانگر کاهش بیشینه نیروی برخورد و افزایش جابجایی بازی افزایش دمای محیط آزمایش بوده و همچنین اینکه با کاهش انحنای سر ضربه‌زننده، زمان برخورد کاهش، بیشینه نیروی برخورد افزایش و میزان آسیب سطحی نیز کاهش یافته‌است. کامینرو<sup>5</sup> و همکاران [3] اثر ضخامت و لایه‌چینی روی میزان مقاومت فشاری پس از ضربه به صفحات کامپوزیتی را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج حاکی از کاهش سطح تخریب بازی افزایش میزان جذب انرژی بوده‌است. همچنین صفحات با ضخامت بیشتر دارای مقاومت فشاری پس از ضربه بالاتری بودند که بدلیل افزایش سختی خمشی آنها گزارش شده‌است. آنها دریافتند که صفحات با لایه چینی غیر متعام دارای عملکرد بهتری در بارگذاری ضربه می‌باشند. چنگ<sup>6</sup> و همکاران [4] رفتار صفحات کامپوزیتی ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی را تحت نفوذ شبه‌استاتیکی<sup>7</sup> بررسی و رفتار نمونه‌ها را در سه مرحله الاستیک، تسلیم و شکست مشاهده نمودند. با افزایش لایه رزین اپوکسی میزان قابلیت جذب انرژی افزایش یافت. کروی<sup>8</sup> و همکاران [5] به پیش‌بینی رفتار صفحات کامپوزیتی ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی تحت

9 Long

10 Liu

11 Zhang

12 Kara

13 Wang

14 Polypropylene Honeycomb

15 Han

16 Rajaneesh

1 Residual Resistant

2 Porous Material

3 Specific Stiffness

4 Drop Weight

5 Caminero

6 Cheng

7 Quasi-static

8 Crupi

میانگین اندازه ذرات برابر با 11 میکرومتر به عنوان فاز تقویت‌کننده که نقش پایدارساز یا عامل ویسکوزکننده در فرآیند تولید فوم را نیز دارد تهیه شد. حرارت دهی ذرات SiC به مدت یک ساعت در دمای 951 درجه سانتیگراد و سپس به مدت 2 ساعت در دمای 651 درجه سانتیگراد به منظور حذف آلودگی‌ها و گازهای جذب شده سطحی و در نتیجه بهبود ترشوندگی ذرات SiC بوسیله مذاب آلومینیوم انجام گردید. پودر کربنات کلسیم با خلوص 99,5 درصد وزنی و اندازه متوسط 5 میکرومتر به عنوان عامل فوم‌ساز استفاده شد. این پودر نیز به منظور حذف رطوبت و آلودگی سطحی و افزایش ویژگی‌های ترشوندگی و به تبع آن توزیع بهتر این ذرات در مذاب آلومینیوم به مدت 2 ساعت در دمای 211 درجه سانتیگراد حرارت داده شد.

برای تولید محصول فومی ابتدا شمش کامپوزیتی از زمینه آلومینیومی به همراه مقادیر مشخصی از ذرات SiC با استفاده از روش ریخته‌گری گردابی<sup>۳</sup> در دمای بین 711-651 درجه سانتیگراد تولید و ریخته‌گری شد. این شمش در مرحله بعد و پس از ذوب مجدد در دمای 651 درجه سانتیگراد و با سرعت 1411 دور بر دقیقه هم زده شد. در این مرحله مقدار 1 درصد وزنی منیزیم به مذاب افزوده و سپس با افزودن پودر کربنات کلسیم مخلوط برای مدت یک دقیقه هم زده شد. پس از چند دقیقه و بعد از تولید گاز دی‌اکسید کربن، فوم تولید شده از کوره خارج و در هوای محیط سرد می‌شود. مقدار 3 درصد وزنی از پودر کربنات کلسیم و 11 درصد حجمی ذرات SiC در این مرحله برای تولید محصولات استفاده شده است [1]. شکل 1 نمونه فوم آلومینیومی ساخته شده به روش فوق را نشان می‌دهد.

سایر خواص مکانیکی رویه آلومینیومی و فوم هسته بکار رفته در مرجع [1] قابل مشاهده است.

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ریختگی A356 [1]

Table 1 Chemical composition of cast aluminum alloy A356 [1]						
Mn	Zn	Ti	Cu	Fe	Mg	Si
0.01	0.02	0.07	0.09	0.19	0.35	6.81
						ترکیب درصد وزنی



Fig.1 Aluminum foam sample produced

شکل 1 نمونه فوم آلومینیومی تولید شده

برای ساخت رویه کامپوزیتی نمونه‌ها از الیاف شیشه به صورت پارچه تک-چپته استفاده شده است. هر کدام از لایه‌ها دارای ضخامت 0.2 میلی‌متر و

تحلیل قرار داده‌اند. آنها نتایج نیروی برخورد، انرژی جذب‌شده و شکل تخریب را به دو روش با یکدیگر مقایسه نمودند که انطباق خوبی مشاهده گردید. بابایی و همکاران [13-14] صفحات دایره‌ای و مستطیلی فولادی و آلیاژ آلومینیومی تحت بار ضربه با سرعت کم با استفاده از دستگاه وزنه‌افشان را مورد ارزیابی قرار دادند. همخوانی نتایج آزمایشگاهی و مدلسازی آنها بیانگر روشی مناسب برای بررسی رفتار پلاستیک این صفحات تحت بارگذاری ضربه می‌باشد. جعفری و رهنما [15] به حل عددی میزان جذب انرژی در سازه‌های ساندویچی تحت بار ضربه با سرعت کم با استفاده از نرم افزار پرداخته و ضمن مقایسه نتایج با داده‌های آزمایشگاهی دیگران به ارزیابی برخی پارامترهای ضربه پرداخته‌اند. فراهت [16] رفتار فوم آلومینیومی را تحت بار ضربه با سرعت پایین را با استفاده از روشهای عددی تحلیل و با نتایج آزمایشگاهی خود مقایسه نمودند. پاک‌نژاد و همکاران [17] به بررسی اثر شرایط مرزی دلخواه بر پاسخ ورق چندلایه کامپوزیتی تحت بار ضربه با سرعت پایین و جرم بزرگ پرداخته‌اند. آنها با استخراج معادلات حاکم بر صفحه با استفاده از تئوری مرتبه اول و استفاده از روشهای تحلیلی، به تحلیل نتایج خود پرداخته‌اند.

بر اساس مطالعات صورت گرفته در گذشته و با توجه به نوع کاربرد صفحات ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی در صنایع مختلف، تا کنون به بررسی امکان جایگزینی صفحات کامپوزیتی شیشه‌اپوکسی به جای رویه معمول فلزی آلومینیومی و نیز ارزیابی اثر شکل هندسی ضربه‌زننده و لایه‌چینی رویه‌های کامپوزیتی صفحات پرداخته نشده است. از آنجایی که بسته به نوع کاربرد صفحات در صنایع، شکل هندسی ضربه‌زننده (شعاع انحناء ضربه‌زننده) متغیر است، برای شناخت کامل رفتار کامپوزیت‌ها در برابر بارهای ضربه‌ای لازم است پاسخ آنها در مقابل اشکال هندسی متداول نیز مورد مطالعه قرار گیرد. همانطور که در مطالعات پیشین نیز بدان اشاره گردیده است، نوع رویه صفحه ساندویچی و شکل ضربه‌زننده نقش مهم و اساسی در رفتار صفحه در این نوع بارگذاری ایفا می‌کند [17, 6, 2]. لذا بررسی اثر نوع رویه صفحه ساندویچی کامپوزیتی نیز می‌بایستی بیشتر مدنظر قرار گیرد. بر همین اساس نوآوری‌ها و اهداف اصلی این پژوهش که تا کنون بدان پرداخته نشده، عبارتند از: 1- بررسی امکان جایگزینی صفحات کامپوزیتی شیشه‌اپوکسی به جای رویه معمول فلزی آلومینیومی 2- ارزیابی اثر شکل هندسی (شعاع انحناء) ضربه‌زننده 3- بررسی اثر نوع لایه‌چینی رویه‌های کامپوزیتی. بدین منظور سه نوع ضربه‌زننده مخروطی، سهموی و کروی و نیز سه نوع لایه‌چینی رویه آلومینیومی، کامپوزیتی متعامد<sup>۱</sup> و کامپوزیتی شبه‌همسانگرد<sup>۲</sup> مورد استفاده قرار می‌گیرند. بیشینه نیروی برخورد، انرژی ویژه جذب شده و جابجایی نمونه برای حالات مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. هسته صفحات از جنس فوم آلومینیومی، رویه کامپوزیتی از نوع شیشه‌اپوکسی و برای انجام آزمایشات از دستگاه ضربه وزنه‌افشان استفاده می‌شود.

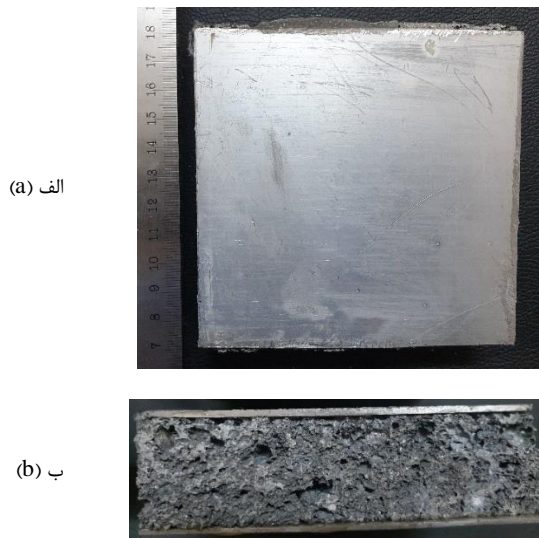
## 2- مواد، روش تولید و ساخت نمونه‌ها

در این پژوهش آلیاژ آلومینیوم ریختگی A356 با ترکیب شیمیایی مندرج در جدول 1، به عنوان فلز پایه انتخاب گردید. از آنجاییکه ساخت نمونه‌های فومی این پژوهش از همان دسته تولیدی مرجع [1] بوده است، لذا می‌توان از همین مشخصات شیمیایی بهره برد. ذرات SiC با خلوص 98 درصدوزنی و

<sup>1</sup> Cross-Ply Laminates

<sup>2</sup> Quasi-isotropic Laminates

<sup>3</sup> Stir Casting



**Fig. 2** Sample Sandwich Composite Plate with Aluminum Case (a) Front View (b) Side View

شکل 2 نمونه صفحه کامپوزیتی ساندویچی با رویه آلومینیومی (الف) نمای روبرو (ب) نمای جانبی

### 3- دستگاه آزمایش ضربه‌زننده

یکی از عوامل مهم و موثر در بررسی پدیده ضربه، انرژی اولیه پرتابه می‌باشد. در این مطالعه ضربه با سرعت پایین توسط دستگاه وزنه‌افتان انجام شده‌است؛ که ممکن است بر اثر سقوط ناگهانی ابزار کار در هنگام تعمیر و نگهداری روی سازه کامپوزیتی و یا برخورد گوله در طراحی جلیقه‌های ضدگلوله اتفاق افتد. بدین منظور از دستگاه وزنه‌افتان ساخت شرکت سایش ایران موجود در آزمایشگاه مکانیک شکست دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی استفاده شده‌است. در این دستگاه پرتابه روی یک ریل با اصطکاک بسیار کم قرار دارد که می‌تواند آزادانه سقوط نماید. در این تحقیق از میزان کم اصطکاک در ریل و تجهیزات دستگاه بنا به توصیه شرکت سازنده صرف‌نظر شده‌است. جرم کلی ضربه‌زننده و متعلقات متصل به آن (حسگر نیرو، یاتاقان‌ها و ...) 7 کیلوگرم است که می‌تواند حداکثر از ارتفاع 1 متر بر روی هدف سقوط کند. ظرفیت حسگر نیرو 10 کیلو نیوتن و با فرکانس داده‌برداری 25 کیلوهرتز است. جرم و ارتفاع پرتابه قابل تغییر بوده و لذا می‌توان انرژی‌های جنبشی متفاوتی را اعمال کرد. در این آزمایش جهت کلیه نمونه‌ها، جرم ضربه‌زننده و متعلقات با افزایش وزنه 10 کیلوگرمی، به 17 کیلوگرم تغییر کرده و از ارتفاع 70 سانتی‌متری روی نمونه هدف سقوط می‌کند. بدین ترتیب انرژی پتانسیل اولیه ضربه برای کلیه نمونه‌ها 116.7 ژول خواهد بود. شکل الف-3 نمای کلی دستگاه مورد استفاده را نشان می‌دهد. مطابق شکل نمونه‌های مربعی ساخته شده روی تکیه‌گاه مخصوص قرار گرفته و سپس توسط گیره مربعی تو خالی و به‌وسیله چهار پیچ محکم می‌شود. بدین‌صورت هر چهار لبه نمونه به پهنای 10 میلی‌متر گیردار و به ابعاد 100\*100 میلی‌متر آزاد است. ضربه‌زننده دقیقاً روی نقطه‌میانی فضای آزاد نمونه سقوط می‌کند. (شکل ب-3) کلیه آزمایش‌ها بر اساس استاندارد ASTM D7136 [19] انجام می‌شود.

جرم 200 گرم در مترمربع می‌باشد. این نوع الیاف در حال حاضر به‌علت کاربردهای مختلف در صنایع مورد توجه قرار گرفته‌است. همچنین از رزین اپوکسی ML503 و هاردنر HA11 که کاربرد آن در صنایع داخلی رایج می‌باشد، استفاده شده‌است. خواص مکانیکی صفحات کامپوزیتی به همراه رزین استفاده شده در جدول 2 آورده شده‌است. ساخت این نمونه‌ها از همان دسته تولیدی مرجع [18] انجام پذیرفته‌است. رزین و الیاف شیشه تولیدی کشور چین از شرکت تامین کننده مواد اولیه (راستین رزین باهر) تهیه شده‌است. در این تحقیق از روش لایه‌چینی دستی برای ساخت لایه کامپوزیتی رویه صفحات استفاده و ضخامت رویه کلیه نمونه‌ها بدون احتساب لایه چسبی اتصال دهنده، 2 میلی‌متر (مشابه ضخامت رویه آلومینیومی) در نظر گرفته شده‌است. اتصال رویه‌ها به هسته فوم آلومینیومی به منظور همخوانی شیمیایی آنها، توسط همان رزین اپوکسی دو جزئی که در تولید رویه‌های کامپوزیتی بکار گرفته شد، با ضخامت بسیار ناچیزی انجام شده است.

جدول 2 خواص مکانیکی رویه کامپوزیتی استفاده شده [18]

**Table 2** Mechanical Properties of Composite Procedures Used [18]

مقدار	خاصیت مکانیکی
19.94	مدول کششی طولی (GPa)
5.83	مدول کششی عرضی (GPa)
2.11	مدول برشی (GPa)
700.11	استحکام کششی طولی (MPa)
570.37	استحکام فشاری طولی (MPa)
69.85	استحکام کششی عرضی (MPa)
122.12	استحکام فشاری عرضی (MPa)
68.89	استحکام برشی (MPa)

ابعاد نمونه‌ها بر اساس فیکسچر دستگاه مورد استفاده 120\*120 میلی‌متر با ضخامت 20 میلی‌متر است (جدول 3). شکل 2 نمونه صفحه کامپوزیتی ساندویچی با رویه آلومینیومی را نشان می‌دهد. کلیه مراحل ساخت نمونه‌ها توسط گروه پژوهشی مواد سازمان جهاد دانشگاهی خراسان رضوی انجام شده‌است.

جدول 3 مشخصات هندسی و وزنی نمونه‌های تولیدی

**Table 3** Geometric and weight characteristics of the specimens produced

نوع رویه نمونه	ضخامت هسته فومی (میلی‌متر)	ضخامت رویه (میلی‌متر)	وزن نمونه (گرم)
آلومینیوم	20	2	388
شبه‌همسانگرد	20	2	301
متعامد	20	2	287

هر سه ضربه‌زننده با قطر 13 میلی‌متر و ارتفاع نفوذ 60 میلی‌متر از جنس فولاد CK45 سخت‌کاری شده ساخته شده‌است. شکل 4 این سه نوع ضربه‌زننده را به همراه وزن هریک از آنها نشان می‌دهد. از آنجاییکه وزن ضربه‌زننده‌های سهموی و کروی دقیقاً با هم یکسان و اختلاف قابل توجهی با نوع مخروطی ندارند (در حدود 3 درصد)، لذا اثر تفاوت وزن ضربه‌زننده در نتایج قابل صرفنظر کردن می‌باشد. لذا در تحقیق پیشرو، صرفاً شکل هندسی ضربه‌زننده به عنوان پارامتر موثر بر رفتار صفحه مورد ارزیابی قرار گرفته و از اثر وزن آن بدون ایجاد خطای معناداری در نتایج صرفنظر شده است. این فرضیه در کارهای مشابه نیز در نظر گرفته شده است. [2]

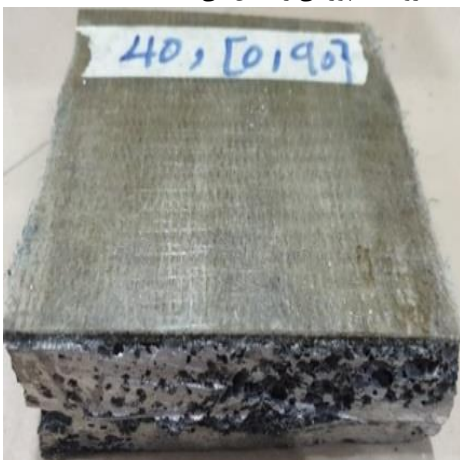


(a) الف	(b) ب	(c) ج	وزن (gr)
136	141	141	

**Fig. 4** Three types of impactor shapes (a) cone (b) parabolic (c) spherical with their weight

شکل 4 سه نمونه ضربه‌زننده استفاده شده (الف) مخروطی (ب) سهموی (ج) کروی به همراه وزن آنها

علاوه بر این در مطالعه پیش‌رو، اثر نوع رویه‌های ساندویچی صفحه نیز مورد بررسی قرار گرفته‌است. در ارزیابی سایر مطالعات گذشته اکثراً صفحات ساندویچی را با رویه‌های فلزی و یا کامپوزیت ساده مورد مطالعه قرار داده‌اند و کمتر به بررسی اثر نوع لایه‌چینی رویه کامپوزیتی پرداخته شده‌است. لذا در این مطالعه علاوه بر ساخت نمونه‌ها با رویه آلومینیومی، رویه‌های کامپوزیتی متعامد و شبه‌همسانگرد نیز ساخته و نتایج آن مقایسه شده‌است. شکل 5 نمونه صفحه با رویه کامپوزیتی را نشان می‌دهد.



**Fig. 5** sandwich composite plate with cross-ply surface

شکل 5 نمونه صفحه کامپوزیتی ساندویچی با رویه متعامد



(a) الف



(b) ب



(c) ج

**Fig. 3** Drop weight device (a) General scheme (b) Moment of impact on the specimen (c) pneumatic jack equipment for secondary impact prevention

شکل 3 دستگاه ضربه وزنه‌افشان مورد استفاده (الف) شمای کلی دستگاه (ب) لحظه برخورد ضربه‌زننده روی نمونه (ج) تجهیزات جک نیوماتیک به منظور پیشگیری از ضربه ثانویه

به منظور پیشگیری از برخوردهای مجدد ضربه‌زننده روی نمونه، از یک جک نیوماتیکی استفاده شده که پس از برخورد اول به سرعت عمل کرده و ضربه‌زننده را متوقف می‌کند تا از برخوردهای ثانویه جلوگیری شود. (شکل ج-3)

#### 4- اثر شکل ضربه‌زننده و لایه‌چینی رویه‌ها

در این پژوهش به بررسی اثر شکل ضربه‌زننده و نیز نوع رویه صفحه ساندویچی پرداخته می‌شود. از آنجایی که معمول‌ترین نوع ضربه‌زننده نیم-کروی است، در اکثر مطالعات از این نوع ضربه‌زننده استفاده شده‌است. همان‌گونه که قبلاً نیز توضیح داده شد، شکل هندسی ضربه‌زننده با توجه به کاربرد صفحات ساندویچی در صنایع مختلف، متفاوت بوده و لذا می‌تواند در پارامترهای ارزیابی بار ضربه بسیار موثر باشد. بنابراین در این تحقیق سه نوع شکل ضربه‌زننده مخروطی، سهموی و کروی مورد استفاده قرار گرفته‌است.

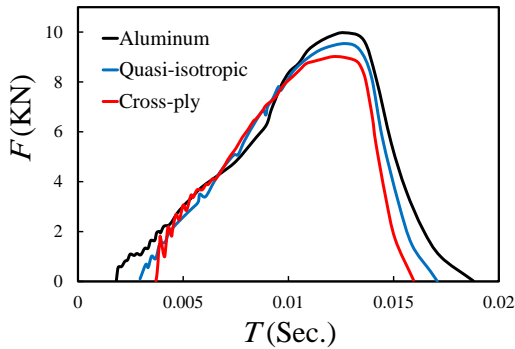


Fig. 7 Comparison of force-time diagrams for three types of skin layer with spherical impactor

شکل 7 مقایسه نمودار نیرو-زمان برای سه نوع رویه صفحه ساندویچی با ضربه‌زننده کروی

در این نمودار مشاهده می‌شود که رویه آلومینیومی صفحه ساندویچی بیشترین مقدار نیروی برخورد و رویه کامپوزیتی متعامد کمترین نیروی برخورد را به خود اختصاص داده‌است. به علت خواص مکانیکی لایه آلومینیومی و شکل هندسه ضربه‌زننده کروی، کمترین مقدار نفوذ پرتابه در نمونه رخ داده که نتیجه آن بیشترین نیروی برخورد و زمان اصابت می‌باشد. پس از آن رویه کامپوزیتی شبه‌همسانگرد و متعامد با بیشینه نیروی برخورد و زمان اصابت کمتر قرار دارند. لازم به ذکر است به منظور ارزیابی عملکرد رویه‌های مختلف در بار ضربه، پارامترهای مختلفی می‌بایستی مدنظر قرار گیرد که در ادامه مقاله بدان اشاره خواهد شد. لکن به دلیل کاهش تقریبی 30 درصدی وزن رویه، کاهش هزینه‌های تولید و توجیه اقتصادی و سایر خصوصیات منحصربفرد مواد کامپوزیت، می‌توان از رویه‌های کامپوزیتی بهره برد.

در نمودارهای نیرو-زمان در اشکال 6 و 7 نوسانات متعددی در بخش ابتدایی نمودار ملاحظه می‌شود. با توجه به اینکه در اندازه‌گیری نیروی ضربه‌زننده از لودسل متصل به دستگاه داده برداری می‌شود، با شروع فرآیند برخورد و نفوذ ضربه‌زننده درون رویه صفحه و هسته فوم آلومینیومی و با عنایت به ساختار متخلخل هسته و همچنین رویه کامپوزیتی، آسیب‌های تدریجی ایجاد می‌گردد. این آسیب‌های تدریجی عامل کاهش مقاومت صفحه بوده که منجر به افت ناگهانی نمودار نیرو است. با ادامه نفوذ ضربه‌زننده و افزایش نیرو، اثر آسیب محلی از بین رفته و نمودار نیرو-زمان تا آسیب کلی صفحه و یا صفر شدن نیروی برخورد ادامه پیدا می‌کند.

از نمودار نیرو-زمان و با استفاده از رابطه (1)، شتاب ضربه‌زننده بدست می‌آید

$$F(t) = ma(t) \quad (1)$$

که در آن  $m$  جرم ضربه‌زننده است. برای بدست آوردن رابطه سرعت-زمان از رابطه زیر استفاده می‌شود

$$V(t) = V_0 - \int a(t)dt \quad (2)$$

که در آن  $V_0$  سرعت پرتابه در لحظه برخورد با صفحه است. با انتگرال‌گیری مجدد از رابطه (2) می‌توان رابطه جابجایی بر حسب زمان برخورد ضربه‌زننده را مطابق رابطه (3) بدست آورد:

$$\delta(t) = \int V(t)dt \quad (3)$$

از طرفی میزان انرژی جذب‌شده توسط صفحه از سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی بدست می‌آید. به منظور بررسی دقیق‌تر عملکرد نمونه‌ها در بار

## 5- نتایج

همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، کلیه آزمایش‌ها بر حسب استاندارد ASTM D 7136 در دمای محیط انجام شده‌است. برای پیشگیری از خطای آزمایشگاهی، هر آزمایش روی سه نمونه مشابه انجام گرفته و با مقایسه پارامترهای آماری (مقدار میانگین و انحراف از معیار) از صحت و قابلیت اطمینان نتایج آزمایشگاهی اطمینان حاصل گردیده‌است. پیش از شروع آزمایش بوسیله دستگاه، فرآیند کالیبراسیون آن مطابق دستورالعمل پیشنهادی شرکت سازنده طی شده که شامل مراحل صفر کردن وزن کفی، کالیبراسیون حسگر نیرو، کالیبراسیون دما و تنظیمات اولیه دستگاه می‌باشد. شکل 6 مقایسه نمودارهای نیرو-زمان برای سه ضربه‌زننده مختلف روی صفحه کامپوزیتی ساندویچی با رویه آلومینیومی را نشان می‌دهد که توسط حسگر نیروی دستگاه داده برداری شده‌است. این نمودارها بیانگر افزایش بیشینه نیروی برخورد در مقابل افزایش شعاع انحنا ضربه‌زننده است. کمترین نیروی برخورد مربوط به ضربه‌زننده مخروطی بوده که به علت نفوذ ضربه‌زننده در داخل نمونه است. بیشترین آن متعلق به نوع کروی ضربه‌زننده است. ضربه‌زننده کروی به علت هندسه‌ای که دارد، توان نفوذ در نمونه را نداشته لذا در همان لحظه‌ی اول نیروی شدیدی را به نمونه وارد می‌کند. از آنجایی که انرژی اولیه برخورد در هر سه نوع ضربه‌زننده یکسان است، این پدیده به علت کاهش سطح برخورد با کاهش انحنا می‌باشد. نتایج مشابه آنچه در این بخش مشاهده گردید، در مطالعات پیشین نیز گزارش شده‌است. [2] از آنجاییکه با بررسی نتایج آزمایشگاهی، رفتار ضربه‌زننده‌های مختلف، به نوع لایه رویی صفحه ساندویچی وابستگی معناداری مشاهده نگردید، لذا در این بخش، صرفاً نتایج با رویه آلومینیومی ارائه گردیده است.

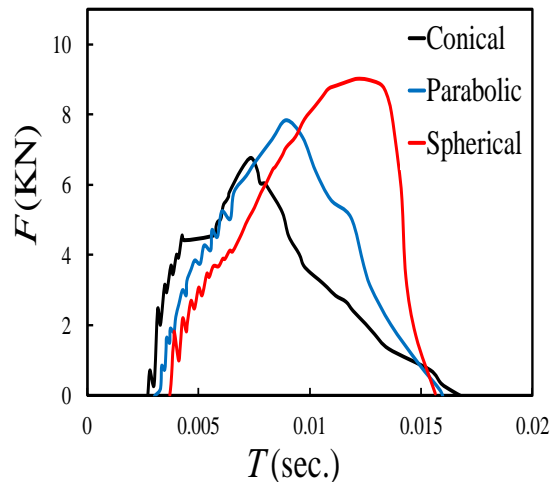


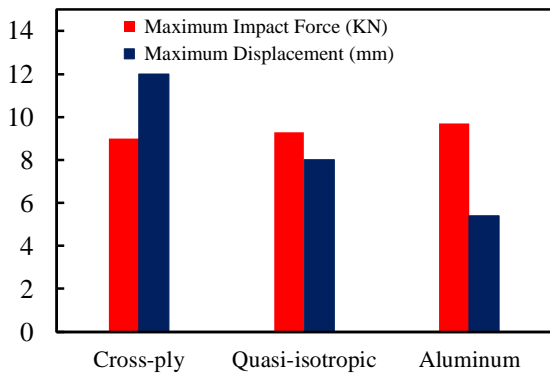
Fig. 6 Comparison of force-time diagram for three different impactor with aluminum skin layer

شکل 6 مقایسه نمودار نیرو-زمان برای سه نوع ضربه‌زننده مختلف با رویه آلومینیومی صفحه ساندویچی

به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که هر چه شعاع انحنا ضربه‌زننده بیشتر باشد، بیشینه نیروی برخورد با نمونه نیز افزایش یافته و در مقابل زمان برخورد آن کاهش می‌یابد. برای ارزیابی اثر نوع رویه صفحات ساندویچی، همان‌طور که در قسمت قبل تشریح شد، آزمایش ضربه روی سه نوع رویه آلومینیومی، کامپوزیت متعامد و کامپوزیت شبه‌همسانگرد انجام شد. نتایج نمودارهای نیرو-زمان با ضربه‌زننده کروی در شکل 7 نشان داده شده‌است.

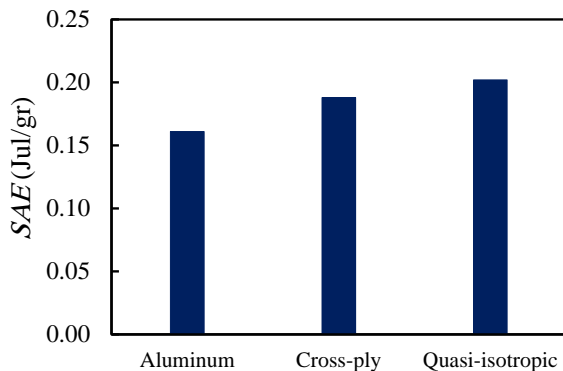
می‌کند. این نتایج با نتایج گزارش شده در مطالعات پیشین [2] همخوانی دارد.

همانطور که قبلاً نیز بدان اشاره شد، در این پژوهش همچنین به بررسی اثر رویه صفحه ساندویچی در رفتار مقابل بار ضربه پرداخته شده‌است. شکل 10 و 11 به ترتیب بیشینه جابجایی ضربه‌زننده، بیشینه نیروی برخورد ضربه‌زننده و میزان انرژی ویژه جذب‌شده توسط صفحه ساندویچی با سه نوع رویه متفاوت آلومینیومی، متعامد و شبه‌همسانگرد و استفاده از ضربه‌زننده کروی را نشان می‌دهد.



**Fig. 10** Maximum Impact Force and Displacement of sandwich plate with different types of skin layer using spherical impactor

شکل 10 بیشینه نیروی برخورد و جابجایی صفحه ساندویچی با سه نوع رویه مختلف و استفاده از ضربه‌زننده کروی



**Fig. 11** specific energy absorbed of a sandwich plate with different types of skin layer using spherical impactor

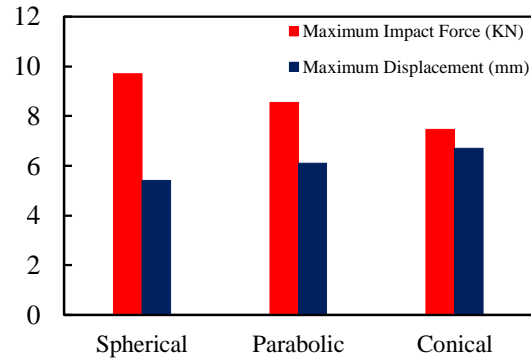
شکل 11 میزان انرژی جذب ویژه صفحه ساندویچی با سه نوع رویه مختلف و استفاده از ضربه‌زننده کروی

نمودارهای فوق حاکی از آنست که بیشترین میزان جابجایی صفحه ساندویچی به رویه کامپوزیتی متعامد و کمترین آن به رویه آلومینیومی تعلق دارد. همچنین رویه آلومینیومی بیشترین نیروی برخورد ضربه‌زننده را در این حالت به خود اختصاص داده‌است. با توجه به وزن متفاوت نمونه‌های تولید شده، (مندرجات جدول 3)، بیشترین میزان جذب انرژی ویژه برخورد پرتابه به ترتیب در صفحه ساندویچی با رویه شبه‌همسانگرد، متعامد و آلومینیومی اتفاق افتاده‌است. شکل 12 نمودار نیرو-جابجایی با استفاده از ضربه زننده کروی و برای دو رویه کامپوزیتی شبه همسانگرد و آلومینیومی را نشان می دهد. این نمودار با استفاده از اطلاعات نمودار نیرو-زمان و اعمال روابط (1) تا (3) بدست آمده است. همانطور که قبلاً نیز بدان اشاره شد، این نمودار مربوط

ضربه و همچنین به علت عدم تاثیر ضخامت و وزن آنها در میزان انرژی جذب‌شده، در این تحقیق از انرژی جذب‌شده ویژه<sup>1</sup> (مطابق رابطه 4) بر حسب ژول بر گرم استفاده شده‌است.

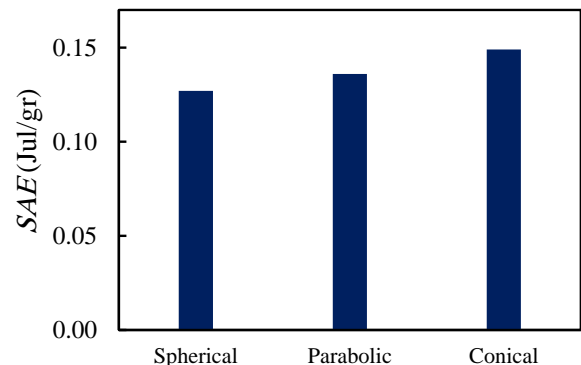
$$(SEA) = \frac{E}{W} \quad (4)$$

که در آن  $E$  انرژی جذب‌شده بر حسب ژول و  $W$  وزن نمونه بر حسب گرم می‌باشد. شکل 8 و 9 به ترتیب به مقایسه بیشینه جابجایی ضربه‌زننده، بیشینه نیروی برخورد ضربه‌زننده و میزان انرژی ویژه جذب‌شده توسط صفحه ساندویچی با رویه آلومینیومی و برای سه نوع ضربه‌زننده کروی، سهموی و مخروطی می‌پردازد.



**Fig.8** Maximum impact force and displacement of sandwich plate with aluminum skin layer caused by different impactor

شکل 8 بیشینه نیروی برخورد و بیشینه جابجایی صفحه ساندویچی با رویه آلومینیومی ناشی از ضربه‌زننده های مختلف



**Fig. 9** specific energy absorbed of the sandwich plate with aluminum skin layer caused by different impactor

شکل 9 میزان انرژی جذب ویژه صفحه ساندویچی با رویه آلومینیومی ناشی از ضربه‌زننده های مختلف

همانگونه که مشاهده می‌شود هر چه شعاع انحنای ضربه‌زننده بیشتر باشد (سر ضربه‌زننده پهن تر باشد)، میزان جابجایی آن کمتر و در مقابل بیشینه نیروی برخورد بیشتر است. از طرفی با افزایش شعاع انحنای ضربه‌زننده، میزان جذب انرژی توسط صفحه نیز کاهش می‌یابد. این رفتار صفحه ساندویچی در برابر ضربه زننده‌های مختلف به دلیل افزایش میزان نفوذ ضربه‌زننده بازای کاهش انحنای آن می‌باشد. بدین ترتیب تمام انرژی جنبشی ناشی از سرعت برخورد ضربه‌زننده به صفحه صرف نفوذ پرتابه به داخل هسته فومی آن گردیده و لذا رویه صفحه ساندویچی کمترین میزان مقاومت را ایفا

<sup>1</sup> Specific Energy Absorbed (SEA)

## 6- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی اثر شکل هندسی ضربه‌زننده و لایه‌چینی رویه در رفتار صفحه کامپوزیتی ساندویچی پرداخته شد. بدین منظور سه نوع شکل هندسی ضربه‌زننده مخروطی، سهموی و کروی و نیز سه نوع رویه آلومینیومی، کامپوزیتی متعامد و کامپوزیتی شبه‌همسانگرد با ضخامت 2 میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. از فوم آلومینیومی به ضخامت 20 میلی‌متر به عنوان هسته صفحه ساندویچی استفاده شد. کلیه آزمایش‌ها در دمای اتاق و طبق استاندارد مربوطه آماده‌سازی و با استفاده از روش ضربه وزنه‌افتان انجام شد. بحث در خصوص تحلیل نتایج در بخش قبل بدان اشاره شد، موارد ذیل به عنوان جمع‌بندی نتایج قابل ذکر است:

- در صفحات ساندویچی با رویه آلومینیومی، بیشترین نیروی برخورد مربوط به ضربه‌زننده کروی و کمترین آن مربوط به ضربه‌زننده مخروطی است. به عبارتی با کاهش شعاع انحنای ضربه‌زننده، بیشینه نیروی برخورد نیز کاهش می‌یابد. لذا در کاربردهایی از جاذب‌های انرژی که شکل هندسی ضربه‌زننده از نوع کروی است، بیشینه نیروی برخورد بسیار زیاد است که می‌بایستی در طراحی سازه‌ها مورد توجه قرار گیرد.
- در صفحات ساندویچی با رویه آلومینیومی، جابجایی ضربه‌زننده مخروطی به واسطه امکان نفوذ در صفحه، از سایر انواع ضربه‌زننده بیشتر و نوع کروی دارای کمترین عمق نفوذ ضربه‌زننده است. می‌توان گفت هر چه ضربه‌زننده تیزتر باشد، جابجایی آن در اثر برخورد با صفحه افزایش می‌یابد. لذا در طراحی سازه‌های جاذب انرژی عمق نفوذ ضربه‌زننده عامل بسیار مؤثری تلقی گردیده و این پارامتر تابعی از شعاع انحنای آن می‌باشد.
- میزان جذب انرژی جنبشی ویژه ناشی از برخورد ضربه‌زننده در صفحات با رویه آلومینیومی با ضربه‌زننده مخروطی بیشترین مقدار و برای ضربه‌زننده کروی کمترین مقدار می‌باشد. لذا در طراحی سازه‌هایی که در آن میزان جذب انرژی دارای اهمیت بیشتری بوده و همچنین ضربه‌زننده دارای هندسه مخروطی است، استفاده از این نوع صفحات ساندویچی توصیه می‌گردد.

- با استفاده از ضربه‌زننده کروی، بیشینه و کمینه نیروی برخورد به ترتیب در صفحات ساندویچی با رویه آلومینیومی و کامپوزیتی متعامد مشاهده شده است. همچنین در این حالت، میزان جابجایی ضربه‌زننده در صفحه با رویه کامپوزیتی متعامد بیشترین و با رویه آلومینیومی کمترین مقدار است. لذا در صورتیکه در طراحی صفحات ساندویچی کمترین میزان جابجایی دارای اهمیت بیشتری باشد، استفاده از رویه آلومینیومی توصیه می‌گردد.

به جابجایی ضربه‌زننده بوده و اطلاعاتی در مورد جابجایی قطعه کامپوزیتی ارائه نمی‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، در ابتدای نمودار، رفتار تقریباً خطی می‌باشد که با افزایش میزان نفوذ ضربه‌زننده، میزان نیرو نیز افزایش می‌یابد. از شیب این بخش خطی ابتدایی نمودار نیرو-جابجایی، می‌توان به سفتی خمشی ورق تعبیر کرد. قسمت دوم نمودار و در بخش کوچکی، با افزایش میزان نفوذ ضربه‌زننده، مقدار نیرو تقریباً ثابت است. تا اینکه در بخش پایانی که مربوط به بار برداری آزمایش است، دیگر ضربه‌زننده در نمونه نفوذ نکرده و با جدایش ضربه‌زننده از نمونه، نیروی وارده تا رسیدن به صفر به تدریج کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است میزان اختلاف بیشینه نیروی برخورد و مقدار انرژی ویژه جذب‌شده توسط صفحه ساندویچی با سه رویه مختلف حدود 4-5 درصد است. این میزان اختلاف در سه رویه بیانگر آنست که رویه‌های کامپوزیتی متعامد و شبه‌همسانگرد نسبت به رویه آلومینیومی، دارای انرژی ویژه جذب بیشتری بوده و لذا می‌تواند جایگزین مناسبی جهت ساخت صفحات ساندویچی تحت بار ضربه معرفی گردد. علاوه بر آن، کاهش وزن سازه، استحکام در برابر سایش، خستگی، مقاومت حرارتی و سایر خصوصیات متمایز مواد کامپوزیت می‌تواند مشوق طراح برای استفاده از این رویه‌ها در طراحی سازه‌های جاذب انرژی باشد.

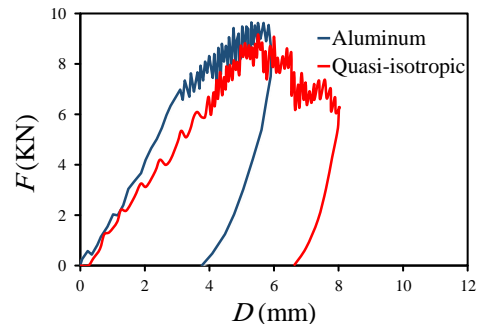


Fig. 12 Comparison of force-displacement diagrams for two types of skin layer (pure aluminum and quasi-isotropic composite) with spherical impactor

شکل 12 مقایسه نمودار نیرو-جابجایی برای دو نوع رویه آلومینیومی و کامپوزیتی شبه‌همسانگرد در صفحه ساندویچی با ضربه‌زننده کروی

شکل 13 تصاویر نمونه‌های ساندویچی با رویه‌های مختلف را که با استفاده از ضربه‌زننده کروی تحت آزمایش ضربه‌افتان قرار گرفته، نشان داده شده است. از آنجایی که تحلیل آسیب نمونه‌ها و مکانیزم تخریب آنها موضوع این مقاله نیست، صرفاً به گزارش نمونه‌ای از آن بسنده می‌شود. همانگونه که ملاحظه می‌شود، ضربه‌زننده کروی در صفحه با رویه‌های آلومینیومی و شبه‌همسانگرد از رویه بالایی وارد شده اما در هسته فومی صفحه متوقف شده است. در صورتی که در صفحه با رویه متعامد ضربه‌زننده از رویه پایینی خارج شده شده است. همانگونه که در شکل نیز مشاهده می‌شود، آسیب سطحی نمونه با رویه شبه‌همسانگرد بیشتر از آسیب سطحی نمونه مشابه با رویه متعامد است. این پدیده به علت نیروی برخورد بیشتر ضربه‌زننده در این حالت است (شکل 11). همچنین جدایش رویه از هسته در نمونه متعامد دیده می‌شود که در مورد مشابه شبه‌همسانگرد ملاحظه نشده است. همچنین در ارزیابی عمق نفوذ ضربه‌زننده در این حالت، بیشترین عمق نفوذ متعلق به صفحه با رویه متعامد و کمترین آن مربوط به صفحه با رویه آلومینیومی است که در شکل 10 نیز مشاهده می‌شود.

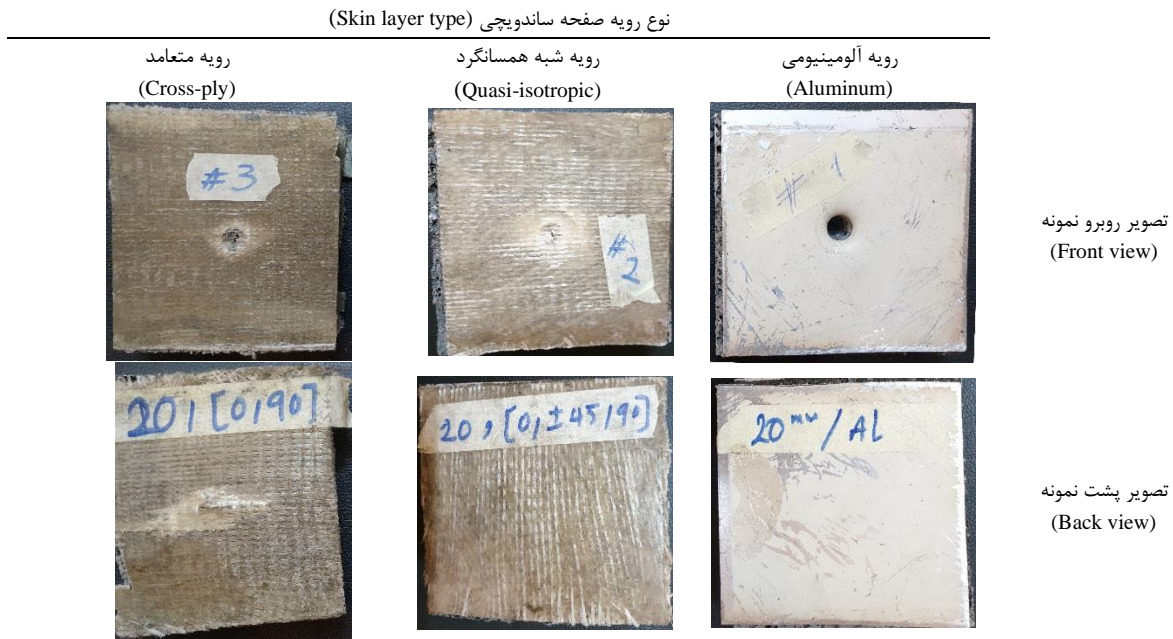


Fig. 13 Front and back view of the specimens after testing by a spherical impactor

شکل 13 نمای روبرو و پشت نمونه های پس از انجام آزمایش ضربه وزنه‌افشان بوسیله ضربه‌زننده کروی

- با توجه به مقایسه مقدار انرژی‌های ویژه جذب‌شده در صفحات با رویه‌های آلومینیومی، متعامد و شبه‌همسانگرد، می‌توان نتیجه گرفت در صورتیکه در طراحی جاذب انرژی میزان جذب انرژی ویژه دارای اهمیت بیشتری باشد، رویه‌های کامپوزیتی می‌تواند به عنوان جایگزین رویه آلومینیومی استفاده شود. در میان رویه‌های کامپوزیتی بررسی شده در این تحقیق، رویه شبه-همسانگرد دارای عملکرد مطلوب‌تری در این خصوص می‌باشد. کاهش وزن، کاهش هزینه‌های تولید و افزایش سایر خواص مکانیکی (مقاومت در برابر سایش، خوردگی و ...) نیز از سایر خصوصیات بکارگیری رویه‌های کامپوزیتی در طراحی سازه‌های ساندویچی در بار ضربه است.
- با توجه به وابستگی همزمان پارامترهای مختلف روی عملکرد صفحات ساندویچی در برابر بار ضربه، پیشنهاد می‌شود یافتن حالت بهینه جهت طراحی جاذب با بیشترین مقدار جذب انرژی در آینده مورد مطالعه قرار گیرد. همچنین بررسی اثر آسیب سطحی، مکانیزم تخریب صفحات ساندویچی بر اثر ضربه و نیز میزان استحکام فشاری پس از ضربه نیز می‌بایستی مورد بررسی بیشتر قرار گیرد.
- 7- مراجع**
- [1] Farahat H. "design and instrumentation of low velocity drop-weight impact testing machine for estimation of energy absorption capacity in aluminum based composite foam," In Persian, Modarres Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 7, pp. 219-228, 2016.
  - [2] Ghajar A.R. "effect of impactor shape and temperature on the behavior of Eglass/epoxy composite laminates," In Persian, Modarres Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 10, pp. 1-8, 2014.
  - [3] Caminero MA, García I, Rodríguez, GP, "Experimental study of the influence of thickness and ply-stacking sequence on the compression after impact strength of carbon fiber reinforced epoxy laminates," Polymer Testing, Vol. 66, pp. 360-370, 2018.
  - [4] Wang H, Ramakrishnan KR, Shankar, K, "Experimental study of the medium velocity impact response of sandwich panels with different cores," Materials & Design, Vol. 99, pp. 68-82, 2016.
  - [5] Long S, Yao X, Wang H, Zhang X, "Failure analysis and modeling of foam sandwich laminates under impact loading," Composite Structures, Vol. 197, pp. 10-20, 2016.
  - [6] Emre AH, Kadir K, Karakuzu S, Demir M, Aykul H, "Flexural Performance of the Sandwich Structures Having Aluminum Foam Core with Different Thicknesses," World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering, Vol. 9, No. 5, pp. 596-601, 2015.
  - [7] Liu C, Zhang XY, Ye L, "High velocity impact responses of sandwich panels with metal fiber laminate skins and aluminum foam core," International Journal of Impact Engineering, Vol. 100, pp. 139-153, 2017.
  - [8] Liu C, Zhang YX, Li J "Impact responses of sandwich panels with fiber metal laminate skins and aluminum foam core," Composite Structures, Vol. 182, pp. 183-190, 2017.
  - [9] Crupi V, Kara E, Epasto G, Guglielmino E, Aykul H "Prediction model for the impact response of glass fiber reinforced aluminum foam sandwiches," International Journal of Impact Engineering, Vol. 77, pp. 97-107, 2017.
  - [10] Cheng SL, Zhao XY, Xin YJ, Du SY, Li HJ "Quasi-static localized indentation tests on integrated sandwich panel of aluminum foam and epoxy resin," Composite Structures, Vol. 129, pp. 157-164, 2015.
  - [11] Han MS, Cho JU, "Impact damage behavior of sandwich composite with aluminum foam core," Trans. Nonferrous Met. Soc., Vol. 24, pp. 42-46, 2014.
  - [12] Rajaneesh A, Sridhar I, Rajendran S "Impact modeling of foam cored sandwich plates with ductile or brittle faceplates," Composite Structures, Vol. 94, pp. 1745-1754, 2014.
  - [13] Babaei H., Mirzababaie T., Alitavoli M, "Study on the response of circular thin plate under low velocity impact," Geomechanics and Engineering, Vol. 9, No. 2, pp. 207-218, 2015.
  - [14] Babaei H., Mirzababaie T., Alitavoli M, "Experimental study and analytical modeling for inelastic response of rectangular plates," In Persian, Journal of Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 4, pp. 361-368, 2015.
  - [15] Jafari s, Rahnema S, "Numerical study of Energy Absorption in Composite Sandwich Structures under Low Velocity Impact," In Persian, Journal of Solid and Fluid Mechanics, Vol. 7, No. 1, pp. 51-64, 2017.
  - [16] Farahat H, Ahmadi SY, "Studying the Behavior of A356/SiCp Composite Foam under Low-Velocity Impact Loading," In Persian,

Journal of Solid and Fluid Mechanics, Vol. 7, No. 2, pp. 129-147, 2017.

- [17] Paknejad R, Ashenai Ghasemi F, Malekzadeh Fard K, "The Effects of Arbitrary Boundary Conditions on a Laminated Composite Plate Response Subjected to Large Mass & Low Velocity Impact," In Persian, Journal of Solid and Fluid Mechanics, Vol. 8, No. 1, pp. 35-49, 2018.
- [18] Torabizadeh MA, Shokrieh MM, Fereidoon A, "Dynamic failure behavior of glass/epoxy composites under low temperature using Charpy impact test method," Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, Vol. 18, pp. 211-220, 2011.
- [19] Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event. Annual Book of ASTM Standard, D7136, 2005.