



# High Velocity Impact on Sandwich Panels with Graded Foam-cored and Aluminum Face-sheet: Numerical and Experimental Assessment

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Kazemi M.<sup>\*1</sup> PhD,

Alavi Nia A.<sup>2</sup> PhD

### How to cite this article

Kazemi M, Alavi Nia A. High Velocity Impact on Sandwich Panels with Graded Foam-cored and Aluminum Face-sheet: Numerical and Experimental Assessment. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(4): 1039-1047.

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Malayer University, Malayer, Iran

<sup>2</sup>Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

### \*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Malayer University, Malayer, Iran.  
Postal Code: 6571995863  
Phone: +98 (81) 32225312  
Fax: +98 (81) 32225312  
Kazemi@malayeru.ac.ir

### Article History

Received: August 23, 2018

Accepted: December 01, 2018

ePublished: April 06, 2019

## ABSTRACT

In this research, the ballistic strength of sandwich structures with aluminum face-sheet and polyurethane foam cores of various densities have been investigated. The effect of graded changes in the density of foam core and arrangement of foamed layers with different densities on the absorption of energy and the ballistic limit of sandwich structures at high velocity (160-300 m/s) under the impact of semi-spherical nosed cylindrical projectiles were investigated. Generally, five different types of panels were designed in dimensions of 100×100 mm<sup>2</sup>, 6 in each. In total, the prepared samples were 30. Numerical simulations were performed, using Ls-dyna software. The results of this study showed that, firstly, there is good agreement between the experimental and simulation results and, secondly, the experimental and simulation results showed that the ballistic limit and energy absorption of sandwich structures of the same mass with the graded foam core in the case a less density foam layer is on the side of the impact for the three-layer panels is, respectively, 5.5% and 11.5% higher than the panel with single-layer foam core and average density.

**Keywords** Sandwich Structures; Ballistic Limit; Simulation; Graded Foam Core

## CITATION LINKS

[1] Energy absorption during projectile perforation of lightweight sandwich panels with metallic fibre cores [2] Study of foam density variations in composite sandwich panels under high velocity impact loading [3] Material characterization of a composite-foam sandwich for the front structure of a high speed train [4] Impact fracture behavior at the material of aluminum foam [5] Lateral plastic collapse of sandwich tubes with metal foam core [6] Dynamic response of sandwich spherical shell with graded metallic foam cores subjected to blast loading [7] An experimental study of energy absorption in impact on sandwich plates [8] Constitutive modeling of aluminum foam including fracture and statistical variation of density [9] Low velocity perforation behaviour of polymer composite sandwich panels [10] The penetration energy of sandwich panel elements under static and dynamic loading [11] The penetration energy of sandwich panel elements under static and dynamic loading [12] Analytical study of high velocity impact on sandwich panels with foam core and aluminum face-sheets [13] Ballistic impact experiments of metallic sandwich panels with aluminium foam core [14] Experimental study on the shock absorption performance of combined aluminium honeycombs under impact loading [15] Investigation of high velocity impact of cylindrical projectile on sandwich panels with fiber-metal laminates skins and polyurethane core [16] Experimental and numerical investigation of a blunt rigid projectile penetrating into a sandwich panel having aluminum foam core [17] A numerical analysis on effect of impedance and thickness of various layers on deflection of target plate in layered armor systems under explosive loading [18] An empirical study on ballistic resistance of sandwich targets with aluminum facesheets and composite core [19] An analytical model for composite sandwich panels with honeycomb core subjected to high-velocity impact [20] Experimental and numerical investigations of the effect of cellular wired core on the ballistic resistance of sandwich structures [21] A numerical study on the impact behavior of foam-cored cylindrical sandwich shells subjected to normal/oblique impact [22] Compressive response of polymeric foams under quasi-static, medium and high strain rate conditions [23] Study of factors influencing the mechanical properties of polyurethane foams under dynamic compression [24] Behavior of sandwich structures and spaced plates subjected to high-velocity impacts [25] Sandwich plates with functionally graded metallic foam cores subjected to air blast loading

## برخورد سرعت بالا روی پانل‌های ساندویچی با هسته فومی مدرج و رویه آلومینیومی: بررسی عددی و تجربی

مهدی کاظمی\* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

علی علوی‌نیا PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران

### چکیده

در این تحقیق، رفتار هدف‌های ساندویچی با رویه آلومینیومی و هسته فوم پلی‌یورتان مدرج با چگالی‌های مختلف بررسی شده است. تاثیر تغییرات درجه‌بندی‌شده چگالی فوم هسته و اثر ترتیب و توالی لایه‌های فومی با چگالی‌های مختلف، در جذب انرژی و حد بالستیک سازه‌های ساندویچی که در سرعت بالا (۱۶۰ تا ۳۰۰ متر بر ثانیه) تحت ضربه پرتابه‌های استوانه‌ای سر نیم‌کروی قرار می‌گیرند، به روش تجربی و عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. به‌طور کلی پنج نوع پانل متفاوت از نظر چیدمان لایه‌ها در ابعاد ۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر مربع و با تعداد شش عدد از هر نوع تهیه شد. در مجموع تعداد نمونه‌های تهیه‌شده برابر ۳۰ نمونه شد. شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار ال‌اس‌داین‌ا انجام شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که اولاً تطابق خوبی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی برقرار است و ثانیاً نتایج تجربی و شبیه‌سازی نشان داد که حد بالستیک و جذب انرژی سازه‌های ساندویچی با جرم یکسان با هسته فومی مدرج در حالتی که لایه فومی با چگالی کمتر در سمت ضربه قرار گیرد، برای پانل‌های سه لایه‌ای به ترتیب ۵/۵ و ۱۱/۵٪ بیشتر از هسته فومی تک‌لایه با چگالی میانگین است.

**کلیدواژه‌ها:** سازه‌های ساندویچی، حد بالستیک، شبیه‌سازی، هسته فومی مدرج

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۱۰

\*نویسنده مسئول: kazemi@malayeru.ac.ir

### ۱- مقدمه

افزایش جذب انرژی تحت بارگذاری ضربه‌ای می‌تواند با تغییر شکل مواد در سازه ساندویچی حاصل شود، به‌ویژه زمانی که هسته از مواد سلولی سبک وزن ساخته شده باشد. ساختارهای سلولی قابلیت تحمل تغییر شکل‌های پلاستیک بزرگ در یک تنش ثابت به نام تنش پایا را دارند و بنابراین می‌توانند مقدار زیادی از انرژی جنبشی ناشی از برخورد را قبل از فروپاشی جذب نمایند<sup>[1]</sup>. اگر این مواد در تنش‌های نزدیک به تنش پایای خود، تحت بارگذاری قرار گیرند، مناسب‌ترین کارایی را خواهند داشت.

در سال‌های اخیر، مطالعات تجربی زیادی برای مشخص‌کردن آسیب ضربه در سازه‌های ساندویچی انجام شده که برخی از این مطالعات مربوط به رفتار سازه در برابر ضربه سرعت بالا است<sup>[2]</sup>. به‌طور کلی، مقاومت پانل‌های ساندویچی در برابر ضربات سرعت بالا تحت تاثیر عوامل مختلفی چون چگالی هسته، ضخامت رویه، ابعاد هندسی پانل ساندویچی و مشخصات هندسی پرتابه است<sup>[3]</sup>. رفتار پانل‌های ساندویچی با هسته‌های فومی و رویه‌هایی از جنس آلایزهای آلومینیوم تحت ضربه‌های سرعت بالا و پایین به‌صورت تجربی و عددی توسط محققان متعددی بررسی شده است. بیشتر مطالعات روی سازه‌های ساندویچی به‌منظور مشخص‌کردن بار شکست، سرعت حد بالستیک، انرژی نفوذ و مقدار آسیب ناشی از برخورد با پرتابه بوده است<sup>[4-6]</sup>. گلدسمیت و ساکن<sup>[7]</sup> مطالعات تجربی را روی سازه‌های ساندویچی با هسته لانه زنبوری و رویه کامپوزیتی تحت بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیک انجام دادند. ریس و همکاران<sup>[8]</sup>، کاربرد سازه‌های ساندویچی در صنعت را بررسی

نمودند. آنها با توجه به نتایج آزمایش‌ها، سه مود شکست برای سازه‌ها در بارگذاری شبه‌استاتیکی ارائه نمودند که شامل فرورفتگی موضعی در محل اعمال ضربه، تغییر شکل برشی در هسته و تغییر شکل فشاری در رویه بودند. ماینر و همکاران<sup>[9]</sup>، سازه‌های ساندویچی با رویه کامپوزیتی و هسته لانه زنبوری را در برخوردهای سرعت پایین مورد آزمایش قرار دادند. آنها مشاهده کردند که با افزایش سرعت پرتابه، قابلیت جذب انرژی بیشتر می‌شود و این نتیجه را به افزایش یافتن تنش لهیدگی هسته و رویه در نرخ کرنش بالا نسبت دادند. روچ و همکاران<sup>[10, 11]</sup> به بررسی انرژی نفوذ در حالت استاتیکی و دینامیک در سازه ساندویچی با هسته فوم سلول بسته PVC و ارتباط بین میزان انرژی جذب‌شده و مساحت لایه‌لایه‌شدگی در ساختارهای ساندویچی پرداختند. علوی‌نیا و کاظمی<sup>[12]</sup> ضربه سرعت بالا روی پانل‌های ساندویچی با رویه‌های فلزی و هسته فومی در برخورد قائم با یک پرتابه استوانه‌ای را به روش تحلیلی بررسی کردند. آنها برای ارزیابی صحت روش تحلیلی پیشنهادی از آزمایش‌های تجربی صورت‌گرفته روی دو نوع پانل با هسته‌های فوم پلیمری و فلزی و رویه‌های آلومینیومی بهره گرفتند و نشان دادند که روش تحلیلی ارائه‌شده، دقت قابل قبولی در تعیین سرعت باقیمانده پرتابه در برخورد با پانل‌هایی با هسته فوم پلیمری و فلزی و با نسبت چگالی‌های مختلف دارا است. هاو و همکاران<sup>[13]</sup> نفوذ شبه‌استاتیکی و حد بالستیک سازه‌های ساندویچی فلزی با هسته فوم آلومینیومی را مورد مطالعه قرار دادند و تاثیر سرعت اولیه و شکل پرتابه، ضخامت و چگالی فوم هسته را روی سرعت حد بالستیک و انرژی جذب‌شده بررسی نمودند. نتایج آنها نشان داد که افزایش سرعت اولیه پرتابه، ضخامت سازه ساندویچی و چگالی فوم موجب افزایش انرژی جذب‌شده و سرعت حد بالستیک می‌شود. دن و همکاران<sup>[1]</sup>، جذب انرژی طی نفوذ پرتابه در سازه ساندویچی با هسته فیبر فلزی را به‌صورت عددی و تجربی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تجربی آنها نشان داد که میزان جذب انرژی در محدوده سرعت حد بالستیک بیشترین مقدار را دارد و با افزایش سرعت ضربه، مقدار جذب انرژی کاهش می‌یابد. همچنین بررسی‌های عددی آنها نشان داد که این افزایش ناشی از انرژی جنبشی ذرات جداشده و تاثیر نرخ کرنش است و جذب انرژی به‌وسیله تغییر شکل پلاستیک و شکست صورت می‌گیرد. به‌علاوه، با افزایش سرعت پرتابه، جذب انرژی در نتیجه تغییر مودهای شکست کاهش یافت.

کاو و همکاران<sup>[14]</sup>، به بررسی عملکرد جذب انرژی شوک سازه‌های ساندویچی با هسته هانی‌کام ترکیبی آلومینیومی تحت بار ضربه‌ای و شبه‌استاتیکی پرداختند. آنها نشان دادند که ساختار لانه زنبوری ترکیبی، میزان جذب انرژی بیشتری نسبت به لانه زنبوری تکی در تست ضربه دارد.

نصیرزاده و ثابت<sup>[2]</sup> حد بالستیک و جذب انرژی سازه‌های ساندویچی با هسته فوم پلی‌یورتان و اثر نانوکلی در هسته فوم پلی‌یورتان بر خواص ضربه‌ای سازه‌های ساندویچی‌ها را مورد بررسی قرار دادند. قلمی‌چوپر و صدیقی<sup>[15]</sup> اثر پارامترهای سرعت پرتابه، چگالی هسته، ضخامت هسته، ضخامت رویه‌ها و جهت‌گیری الیاف در رفتار حد بالستیک و جذب انرژی سازه‌های ساندویچی با هسته فوم پلی‌یورتان و رویه‌های آلومینیومی و کامپوزیتی را به‌صورت عددی و تجربی مورد مطالعه قرار دادند. ضیاءشمامی و همکاران<sup>[16]</sup> نفوذ پرتابه صلب سر تخت در اهداف ساندویچی آلومینیوم- فوم را به‌صورت تجربی و عددی بررسی کردند. طبق آزمایش‌ها و شبیه‌سازی صورت‌گرفته توسط آنها، با افزایش چگالی

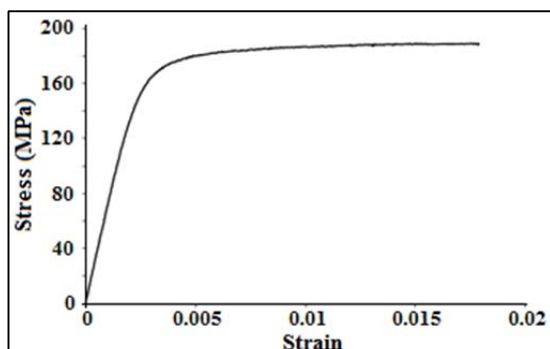
جدول ۱) خواص مکانیکی پرتابه

| مقدار | خاصیت مکانیکی               |
|-------|-----------------------------|
| ۷۸۶۰  | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) |
| ۲۱۰   | E (GPa)                     |
| ۰/۳   | $\nu$                       |

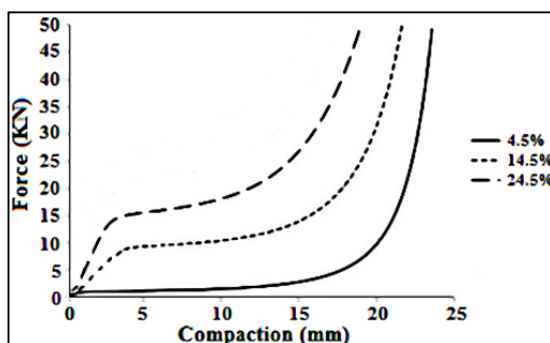
پانل‌های ساندویچی: پانل‌های ساندویچی از دو بخش اصلی تشکیل می‌شوند. نخست هسته میانی با چگالی کم که سبک و معمولاً حجیم است و دیگری رویه‌های واقع در دو طرف هسته که سخت و معمولاً نازک هستند. در این تحقیق، از رویه‌های آلومینیومی و هسته فوم پلی‌یورتانی برای ساخت پانل‌های ساندویچی استفاده شد و ابعاد تمامی پانل‌های ساخته شده ۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر مربع بود.

ورق‌های رویه: رویه‌های آلومینیومی برای نمونه‌های ساندویچی از آلیاژ AL-1050 با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر انتخاب و آزمایش کشش برای تعیین منحنی تنش- کرنش روی سه نمونه، طبق استاندارد ASTM-E8 با دستگاه کشش Santam-150T انجام شد (نمودار ۱).

فوم پلی‌یورتان: هسته سازه‌های ساندویچی از فوم پلی‌یورتان با سلول‌های بسته و نسبت چگالی‌های ۴/۵، ۱۴/۵ و ۲۴٪ تهیه شد. برای تعیین رفتار مکانیکی فوم پلی‌یورتان از استاندارد ASTM-D1621-00 استفاده شد [22]. نتایج آزمایش‌های فشار محوری روی فوم‌های استفاده شده در هسته سازه‌های ساندویچی در نمودار ۲ ارائه شده است.



نمودار ۱) منحنی تنش- کرنش حقیقی کششی ورق آلومینیومی AL-1050



نمودار ۲) منحنی فشاری فوم‌های پلی‌یورتان با نسبت چگالی‌های مختلف

## ۲-۲- ساخت نمونه‌ها

سازه‌های ساندویچی مورد آزمایش شامل دو صفحه آلومینیومی به‌عنوان رویه و با هسته فوم پلی‌یورتان تک‌لایه یا هسته فوم پلی‌یورتان چندلایه بودند. رویه‌ها با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر تهیه و نمونه‌های با هسته فوم به‌صورت سه‌لایه با نسبت چگالی‌های ۴/۵،

و ضخامت فوم و سرعت اولیه پرتابه، جذب انرژی سازه ساندویچی نیز افزایش می‌یابد. /اصلانی و زمانی‌آشانی [17] رفتار سازه‌های چندلایه در نرخ کرنش بالا و تأثیر آنها بر میرایی موج شوک و خیز لایه هدف را مورد بررسی قرار دادند. اثر ضخامت لایه‌های سرامیکی، آلومینیومی و فولادی بر خیز لایه هدف، به‌صورت عددی مورد تحقیق قرار گرفته و مدلی ریاضی برای خیز لایه هدف ارائه شده است. برای مقایسه بهتر سازه‌های چندلایه از نسبت سفتی به وزن استفاده شده و مقایسه بین این موارد صورت پذیرفته است. نتایج آنها نشان می‌دهد که استفاده از دو لایه سرامیک در اطراف لایه فلزی باعث افزایش نسبت سفتی به وزن سازه می‌شود و در نتیجه کارایی سیستم زرهی را افزایش می‌دهد. علوی‌نیا و همکاران [18] با انجام آزمایش‌های بالستیک روی سازه‌های ساندویچی با رویه‌های آلومینیومی و هسته فوم پلیمری به بررسی اثر پارامترهایی چون سرعت ضربه، تغییر ضخامت و چگالی هسته، شکل دماغه پرتابه و تقویت هسته فوم با استفاده از پین‌های آلومینیومی با درصد‌های مختلف وزنی روی حد بالستیک و جذب انرژی پرداختند. فعلی و نامداری‌پور [19] یک مدل تحلیلی جدید برای سوراخ‌شدن پانل ساندویچی کامپوزیت- هانی‌کام ارائه دادند. آنها سوراخ‌شدن پانل را در سه مرحله شامل سوراخ‌شدن صفحه بالایی، سوراخ‌شدن هانی‌کام و سوراخ‌شدن صفحه پایینی در نظر گرفتند. در این مدل تحلیلی، کامپوزیت به‌صورت الیاف بافته‌شده تار و پود در نظر گرفته شد. علوی‌نیا و همکاران [20] برخورد قائم پرتابه استوانه‌ای فولادی سرتخت با پانل‌های ساندویچی با هسته مشبک مفتولی و رویه‌های آلومینیومی را به روش‌های تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند و اثر پارامترهایی چون کاهش قطر و افزایش تعداد ردیف مفتول‌ها و نیز کاهش فاصله میان مفتول‌ها روی حد بالستیک این نوع از پانل‌های ساندویچی را بررسی کردند. سو و همکاران [21] به بررسی عددی برخورد سرعت بالای پرتابه با ورق‌های ساندویچی استوانه‌ای پرداختند و اثر پارامترهایی چون سرعت و زاویه برخورد پرتابه، قطر و شکل هندسی دماغه پرتابه و ضخامت رویه را روی حد بالستیک و جذب انرژی بررسی کردند.

در این تحقیق، مقاومت بالستیک سازه‌های ساندویچی با رویه‌های آلومینیومی و هسته فوم پلیمری مطالعه شده و اثر پارامترهایی چون سرعت ضربه، تغییرات چگالی هسته، مدرج‌کردن هسته فوم با استفاده از لایه‌های فومی با نسبت چگالی‌های مختلف (با ثابت‌نگه‌داشتن ضخامت و جرم پانل‌ها) روی حد بالستیک و جذب انرژی مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- آزمایش‌های تجربی

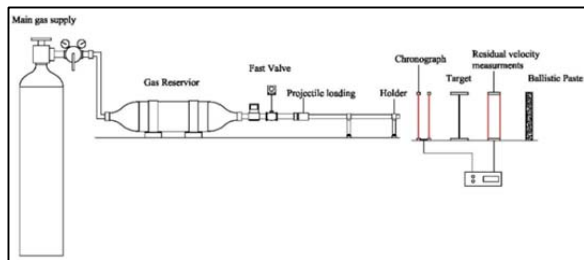
### ۲-۱- خصوصیات مواد

پرتابه: پرتابه‌های مورد استفاده برای آزمون‌های تجربی نفوذ، استوانه‌هایی با دماغه نیکروی با طول ۱۹ و قطر ۸ میلی‌متر و جرم ۷/۵۵ گرم از جنس فولادی (VCN) بودند که تا ۵۲ راکول سخت‌کاری شدند (شکل ۱). خواص مکانیکی پرتابه در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱) پرتابه و غلاف مورد استفاده

ندارد. به همین دلیل از دو پرده دوتایی موازی از منبع نور لیزر و دیود حساس به نور استفاده شد که هر یک شامل ۸۰ عدد منبع نور لیزر در دو راستای افقی و عمودی هستند.



شکل (۳) طرحواره اسلحه گازی

## ۲-۵- آزمایش‌های بالستیک

نمونه‌ها در داخل محفظه نگهدارنده دستگاه تفنگ گازی به وسیله پیچ‌هایی محکم شدند، به طوری که شرایط مرزی کاملاً گیردار در لبه‌های سازه ساندویچی تامین شود. سطح موثر سازه ساندویچی در مقابل نفوذ پرتابه در قسمت محفظه نگهدارنده، مربعی به ضلع ۸۰ میلی‌متر بوده است (شکل ۴).

پس از قرارگیری نمونه در فیکسچر مخصوص و تنظیم فشار مخزن دستگاه، پرتابه با سرعتی بیش از سرعت حد بالستیک به سمت هدف شلیک و سرعت‌های قبل و بعد از برخورد آن به هدف، اندازه‌گیری و ثبت شد. برای هر حالت خاص از پرتابه و هدف، شش آزمایش انجام و با استفاده از داده‌های آنها، منحنی تغییرات سرعت باقیمانده برحسب سرعت برخورد رسم شد.



شکل (۴) نمایی از دستگاه آزمایش و نمونه قرارداده شده در فیکسچر آن

## ۳- شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی نفوذ پرتابه صلب سر نیم‌کروی در پانل ساندویچی از نرم‌افزار ال‌اس- داینا استفاده شده که یک نرم‌افزار اجزای محدود غیرخطی صریح است. در این نرم‌افزار نزدیک به ۱۹۰ مدل ماده و ۱۳ معادله حالت برای توصیف رفتار مواد مختلف ارایه شده است. انتخاب صحیح مدل ماده و معادله حالت، همچنین اعمال صحیح شرایط فیزیکی مساله از قبیل شرایط مرزی و استفاده از سطوح تماس و المان‌های متناسب با نوع مساله، امکان انجام شبیه‌سازی دقیق به کمک این نرم‌افزار را فراهم می‌کند. صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی به کمک نتایج تست‌های تجربی انجام شده است. شبیه‌سازی‌ها و تعریف کلمات کلیدی در نسخه 971-R6 نرم‌افزار انجام و برای تحلیل از حلگر نسخه R4.2 استفاده شده است.

۱۴/۵ و ۲۴٪ در ضخامت کلی ۳۰ میلی‌متر ساخته شدند. به‌طور کلی، پنج نوع پانل متفاوت از نظر چیدمان لایه‌ها در ابعاد ۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر مربع و با تعداد شش عدد از هر نوع تهیه شد. برای اتصال رویه‌ها به هسته و لایه‌های هسته به یکدیگر از چسب اپوکسی استفاده شد. در شکل ۲ نمونه‌های تهیه‌شده و در جدول ۲ مشخصات فیزیکی نمونه‌ها ارایه شده است. در مجموع تعداد نمونه‌های تهیه‌شده برابر با ۳۰ نمونه شد.



شکل (۲) نمایی ایزومتریک از نمونه‌های ساندویچی

جدول (۲) ضرایب مدل مادی پرتابه

| مقدار              | خاصیت مکانیکی                |
|--------------------|------------------------------|
| $7800 \times 10^6$ | $\rho$ (kg/mm <sup>3</sup> ) |
| $200 \times 10^3$  | E (MPa)                      |
| ۰/۳                | $\nu$                        |

## ۲-۳- کدگذاری نمونه‌ها

کد نمونه‌ها به‌طور کلی حداکثر از سه حرف و یک عدد تشکیل شده که حرف P نشان‌دهنده پانل با هسته پلی‌یورتان، عدد پس از آن نشان‌دهنده تعداد لایه‌های هسته فوم و حروف پس از عدد نشان‌دهنده ترتیب قرارگیری لایه‌ها با نسبت چگالی‌های زیاد به کم و کم به زیاد (H بیانگر لایه با نسبت چگالی زیاد، L بیانگر لایه با نسبت چگالی کم و A بیانگر لایه با نسبت چگالی میانگین) است. در جدول ۳ کدهای انتخاب‌شده برای نمونه‌ها آورده شده است.

جدول (۳) کدگذاری نمونه‌های ساندویچی

| ضخامت رویه (mm) | ضخامت هر لایه (mm) | نسبت چگالی هر لایه از هسته (%) | نسبت چگالی میانگین هسته (%) | کد نمونه   |
|-----------------|--------------------|--------------------------------|-----------------------------|------------|
| ۱/۵             | ۱۰                 | ۱۴/۵، ۲۴/۵، ۴/۵                | ۱۴/۵                        | P3HL, P3LH |
| ۱/۵             | ۱۵                 | ۴/۵، ۲۴/۵                      | ۱۴/۵                        | P2HL, P2LH |
| ۱/۵             | ۱۰                 | ۱۴/۵                           | ۱۴/۵                        | P3A        |

## ۲-۴- دستگاه آزمایش

آزمایش‌های بالستیک با استفاده از دستگاه تفنگ گازی یک‌مرحله‌ای در دانشگاه بوعلی‌سینا انجام شده است (شکل ۳). به‌منظور اندازه‌گیری سرعت پرتابه قبل از برخورد به هدف از یک دستگاه کروномتر مجهز به سیستم نوری و شماره‌انداز دیجیتال استفاده شد. برای اندازه‌گیری سرعت پرتابه پس از برخورد، با توجه به این که پس از نفوذ، پرتابه از مسیر خود منحرف می‌شود، امکان اندازه‌گیری سرعت پسماند با روش اندازه‌گیری سرعت ورودی وجود

ضرایب مدل ماده شماره ۶۳ آورده شده‌اند. چون این مدل ماده معیاری برای خرابی و حذف المان ندارد، در تحلیل از تکنیک فرسایش المان استفاده شده است.

جدول ۴) ضرایب مدل ماده فوم

| نام            | چگالی<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | ضریب یانگ<br>(MPa) | تنش کششی<br>شکست (MPa) | ضریب<br>میرایی |
|----------------|-------------------------------|--------------------|------------------------|----------------|
| F <sub>1</sub> | ۵۴                            | ۴                  | ۰/۲۵                   | ۰/۴            |
| F <sub>2</sub> | ۱۷۴                           | ۵۴/۶               | ۲                      | ۰/۳            |
| F <sub>3</sub> | ۲۹۴                           | ۱۴۶                | ۱۰                     | ۰/۱            |

### ۳-۲-۳- رویه‌ها

برای صفحات رویه که از جنس Al-1050 است، از مدل ماده MAT-003-PLASTIC KINEMATIC استفاده شد. این مدل رفتاری در تحلیل مسایل ضربه‌ای و نفوذ، مدلی مناسب است. همچنین، اثرات نرخ کرنش با رابطه کوپر- سایموند (معادله ۱) تخمین زده شد.

$$\sigma_{y-dyn} = \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right] (\sigma_{y-st} + E_p \epsilon_p) \quad (1)$$

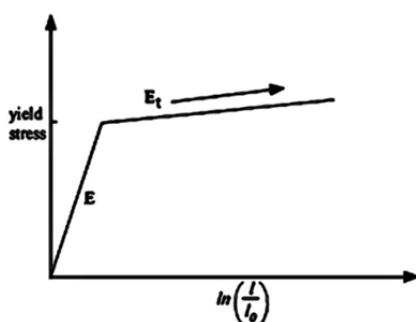
در معادله ۱، p و C ضرایب تجربی هستند که برای آلومینیوم به ترتیب برابر با ۴ و ۱۰<sup>-۱</sup> (ms)<sup>-۱</sup> است [23]. همچنین، E<sub>p</sub> طبق معادله ۲ محاسبه می‌شود.

$$E_p = \frac{E * E_t}{E - E_t} \quad (2)$$

که E<sub>t</sub> مدول مماسی منحنی تنش-کرنش دوخطی است (شکل ۶) [24]. جدول ۵ ثابت‌های به‌کاررفته در مدل ماده پلاستیک-سینماتیک را نشان می‌دهد.

جدول ۵) ضرایب مدل ماده رویه‌ها

| چگالی<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | ضریب<br>یانگ<br>(GPa) | نسبت<br>پواسان | تنش<br>تسلیم<br>(MPa) | مدول<br>مماسی<br>(MPa) | پارامتر<br>نرخ<br>کرنش<br>Src<br>[23] | پارامتر<br>نرخ<br>کرنش<br>Srp<br>[23] | کرنش<br>شکست |
|-------------------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------|
| ۲۷۰۰                          | ۷۰/۰۱                 | ۰/۳            | ۱۵۵/۵                 | ۸۲۰                    | ۶۵۰۰                                  | ۴                                     | ۰/۱۸         |



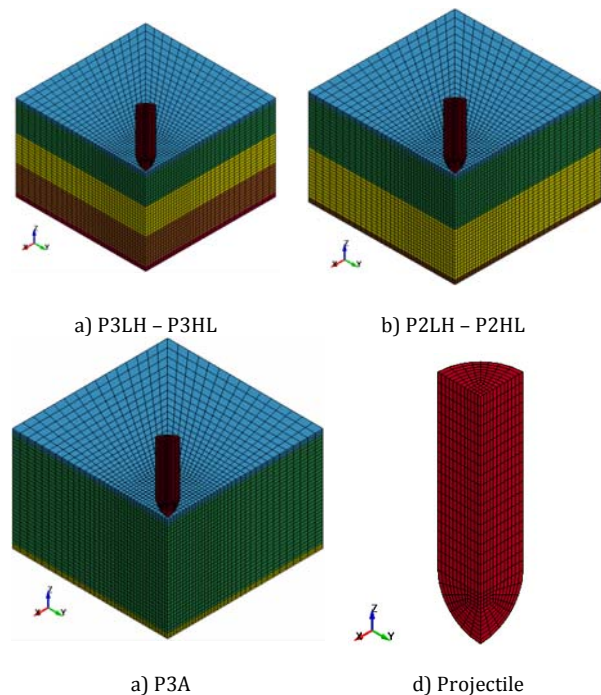
شکل ۶) رفتار الاستیک-پلاستیک دوخطی [24]

### ۳-۳- اعمال شرایط اولیه و مرزی

با توجه به شبیه‌سازی یک‌چهارم مدل، درجات آزادی و چرخش‌های تمام لبه‌های بیرونی هدف در تمام جهات، مقید شدند و در لبه‌های داخلی، شرایط تقارن تعریف شد. شرط اولیه اعمالی نیز شرط اولیه سرعت بود که تمام المان‌های پرتابه در جهت محوری (Z) برابر سرعت اولیه پرتابه قبل از برخورد در نظر گرفته شد.

### ۳-۱- معرفی مدل هندسی المان‌ها

برای تعریف مدل هندسی پرتابه و هدف در نرم‌افزار، پرتابه و هر لایه از هدف، هر کدام در یک قسمت جداگانه تعریف شده‌اند. برای شبکه‌بندی صفحات رویه، هسته و پرتابه از المان سالیید (المان مکعبی ۸گره‌ای) استفاده شده است. به دلیل متقارن بودن بارگذاری و هندسه مساله، برای صرفه‌جویی در زمان حل، یک‌چهارم مدل هندسی در نظر گرفته شده است. برای تحلیل دقیق‌تر نرم‌افزار، در محل برخورد پرتابه با هدف از شبکه‌بندی ریزتری استفاده شده که مدل اجزای محدود مساله در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵) مدل اجزای محدود پرتابه و پانل ساندویچی با هسته‌های مختلف

### ۳-۲- مدل رفتار مواد

#### ۳-۱-۲- پرتابه

با توجه به این که در آزمایش‌های تجربی، پرتابه‌ها از جنس فولاد بودند و در عمل تا ۵۲ راکول سخت‌کاری شدند، برای مدل‌کردن آنها از مدل ماده MAT-020-RIGID استفاده شد. در جدول ۲ مشخصات مکانیکی پرتابه ارایه شده است.

#### ۳-۲-۲- هسته پانل ساندویچی

با وجود آن که تعداد زیادی از مدل‌ها برای شبیه‌سازی رفتار مواد فومی در نرم‌افزار ال‌اس-داینما در دسترس هستند، به دلیل رفتار پیچیده و بسیار متنوع فوم‌ها، انتخاب مدل ماده برای یک فوم موضوع ساده‌ای نیست.

با بررسی‌های انجام‌شده مشخص شد که یکی از ساده‌ترین و کاراترین مدل ماده‌های مربوط به فوم، مدل ماده MAT-063-CRUSHABLE FOAM است که توانایی شبیه‌سازی فوم‌های فله‌ای و غیرفله‌ای را دارد. از ویژگی‌های این مدل ماده می‌توان به سادگی کالیبره‌شدن آن اشاره نمود و از معایب آن می‌توان در نظر نگرفتن نرخ کرنش را ذکر کرد. بنابراین، در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده از این مدل ماده استفاده شد.

یکی از پارامترهای مهم در این مدل ماده نمودار تنش-کرنش است. پس از آزمون فشار، نمودار تنش-کرنش حقیقی به دست می‌آید و به نرم‌افزار داده می‌شود. در جدول ۴ خواص فوم‌ها و

با توجه به نمودار ۴ برای تعداد المان‌های ۲۶۲۳۵، ۳۱۷۴۸ و ۳۸۰۲۵ نتایج سرعت خروجی تقریباً یکسان‌اند. شیب خط متصل‌کننده این سه نقطه تقریباً صفر است. پس تعداد المان مناسب برای این مساله، ۳۱۷۴۸ در نظر گرفته شد که میانگینی از سه حالت آخر است.

#### ۴- نتایج و بحث

در این بخش، نتایج حاصل از آزمایش‌های بالستیک ارایه و تاثیر پارامترهای سرعت برخورد، تغییر چگالی هسته، ترتیب و توالی و نیز اثر تعداد لایه‌ها روی حد بالستیک بررسی شده است. علاوه بر این، به مقایسه حد بالستیک سازه‌های ساندویچی با هسته فومی میانگین و هسته فومی لایه‌لایه با نسبت چگالی مدرج و ضخامت و جرم یکسان پرداخته شده است.

##### ۴-۱- تاثیر سرعت برخورد

با داشتن سرعت‌های ورودی و خروجی برای هر پانل می‌توان با برازش منحنی بر آنها و استفاده از رابطه لامبرت- جوناس (معادله ۳)، ضرایب این معادله و متعاقباً سرعت حد بالستیک برای هر پانل را به دست آورد.

برای برازش منحنی‌ها از معادله لامبرت- جوناس (رابطه ۳) و در نظر گرفتن  $p$  های مختلف در بازه  $0.1/25 < p < 0.2/75$  استفاده شده است.

$$V_r = AV_i^p - B \quad (3)$$

رابطه لامبرت- جوناس را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$V_r = (AV_i^p - B)^{1/p} \quad (4)$$

در معادلات ۳ و ۴،  $V_r$  سرعت خروجی و  $V_i$  سرعت ورودی است. در نمودار ۳، منحنی تغییرات سرعت پسماند نسبت به سرعت اولیه برای سازه‌های ساندویچی با نسبت چگالی میانگین ۱۴/۵٪ و ضخامت هسته ۳۰ میلی‌متری به دست آمده از روش‌های تجربی و عددی ترسیم شده‌اند.

همان طور که در نمودار ۳ نشان داده شده است، برای سازه با هسته فومی با چگالی میانگین، با کاهش سرعت برخورد پرتابه، سرعت باقیمانده پرتابه نیز کاهش می‌یابد. این فرآیند در سرعت‌های بالا نسبت به حد بالستیک خطی بوده و در سرعت‌های نزدیک به حد بالستیک غیرخطی است. به عنوان مثال، در سرعت برخوردهای نزدیک به حد بالستیک، سرعت باقیمانده پرتابه به میزان بیشتری کاهش می‌یابد که مدت زمان اعمال نیروی اصطکاک به پرتابه می‌تواند یکی از دلایل این رویداد باشد. در واقع هر چه سرعت پرتابه کمتر باشد، پرتابه مدت زمان بیشتری را داخل سازه سپر می‌کند که سبب افزایش کار ناشی از نیروی اصطکاک می‌شود و در نهایت، انرژی جنبشی پرتابه دچار کاهش بیشتری می‌شود. همچنین از نمودارهای سرعت پسماند نمونه‌ها نسبت به سرعت اولیه واضح بوده که تطابق خوبی بین سرعت‌های باقیمانده و در نهایت حد بالستیک به دست آمده برای نمونه با چگالی میانگین به روش‌های تجربی و عددی برقرار است. به گونه‌ای که حد بالستیک برای نمونه ساندویچی P3A با روش‌های تجربی و عددی به ترتیب برابر با ۱۳۶/۹ و ۱۲۷/۹ متر بر ثانیه است.

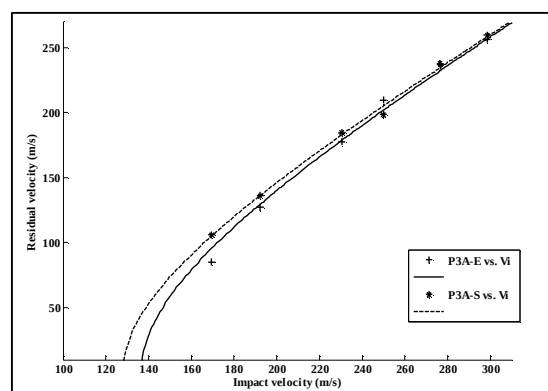
##### ۴-۲- تاثیر تغییر تدریجی چگالی فوم هسته

در این بخش نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی برای پانل‌های مختلف ارایه و با یکدیگر مقایسه شده است. نحوه نفوذ پرتابه در سازه‌های با هسته تک‌لایه و سه‌لایه در شکل ۷ نمایش داده شده است. از آنجایی که برای ارزیابی رفتن المان‌ها در مسیر پرتابه از تکنیک فرسایش المان استفاده شده است، المان‌ها

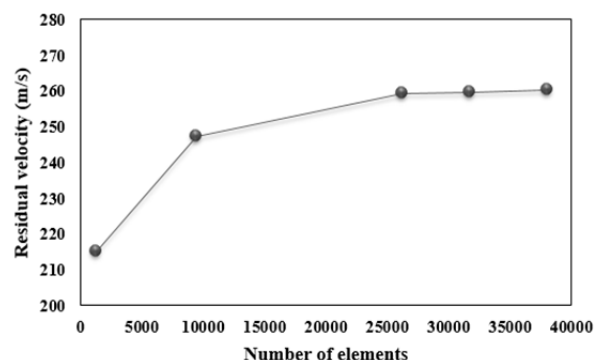
به منظور معرفی تماس در شبیه‌سازی پرتابه و پانل ساندویچی، سه نوع تماس معرفی شده است. اولین نوع تماس Contact-Automatic-Single-Surface است. در این نوع تماس برخورد بین اجزای پانل یعنی رویه‌های بالا و پایین و لایه‌های هسته معرفی می‌شود. دومین نوع تماس Contact-Eroding-Surface-to-Surface در نظر گرفته شده که برخورد سطح به سطح مخرب بین پرتابه و پانل ساندویچی است. سومین نوع تماس که بین رویه‌ها با هسته‌ها و هسته‌ها با یکدیگر بوده، Contact-Automatic-Surface-to-Surface Tie break است. همچنین، در این تماس می‌توان میزان چسبندگی لایه‌ها به هم را تعیین کرد.

##### ۳-۵- شبکه‌بندی و همگرایی شبکه

برای کم کردن هزینه شبیه‌سازی و داشتن دقت کافی نیاز است که شبکه‌بندی به نحو درستی انجام شود. به این منظور، شبکه‌های اطراف محل برخورد پرتابه با ابعاد کوچک‌تر ایجاد می‌شوند و این شبکه هر چه از محل برخورد فاصله می‌گیرد، با نسبتی مشخص بزرگ‌تر می‌شود (نمودار ۳). حال باید تعداد مناسب المان‌های این شبکه را مشخص نمود. در ابتدا تعداد المان‌ها به دلخواه انتخاب و شبیه‌سازی انجام می‌شود. سپس تعداد المان‌ها تا جایی افزایش داده می‌شود که خروجی مساله مقداری تقریباً ثابت و مستقل از شبکه‌بندی شود که به این عمل همگرایی شبکه گفته می‌شود. در این مطالعه به همگرایی شبکه با استفاده از سازه ساندویچی با چگالی میانگین با سرعت ورودی ۲۹۸/۵ متر بر ثانیه پرداخته شد. نتایج بررسی همگرایی شبکه در نمودار ۴ ارایه شده است.



نمودار ۳) منحنی تغییرات سرعت پسماند نسبت به سرعت اولیه برای سازه‌های ساندویچی با نسبت چگالی میانگین ۱۴/۵٪ و ضخامت هسته ۳۰ میلی‌متری به روش‌های تجربی و عددی



نمودار ۴) تغییرات سرعت خروجی پرتابه برحسب تعداد المان‌های هدف برای سازه با چگالی میانگین (سرعت برخورد ۲۹۸/۵ متر بر ثانیه)

جدول ۶) مقایسه سرعت حد بالستیک و جذب انرژی پانل‌های مختلف در روش‌های تجربی و شبیه‌سازی

| نوع پانل | شبیه‌سازی  |        | تجربی      |        | میزان اختلاف (%) |      |
|----------|------------|--------|------------|--------|------------------|------|
|          | $V_b(m/s)$ | $E(J)$ | $V_b(m/s)$ | $E(J)$ | $V_b(m/s)$       | $E$  |
| P3A      | ۱۲۷/۹      | ۶۱/۷   | ۱۳۶/۵      | ۷۰/۳   | ۶/۳              | ۱۲/۱ |
| P3HL     | ۱۳۲/۱      | ۶۵/۸   | ۱۳۹/۲      | ۷۳/۱   | ۵/۱              | ۹/۹  |
| P3LH     | ۱۳۶/۱      | ۶۹/۹   | ۱۴۲/۹      | ۷۷/۱   | ۴/۷              | ۹/۴  |

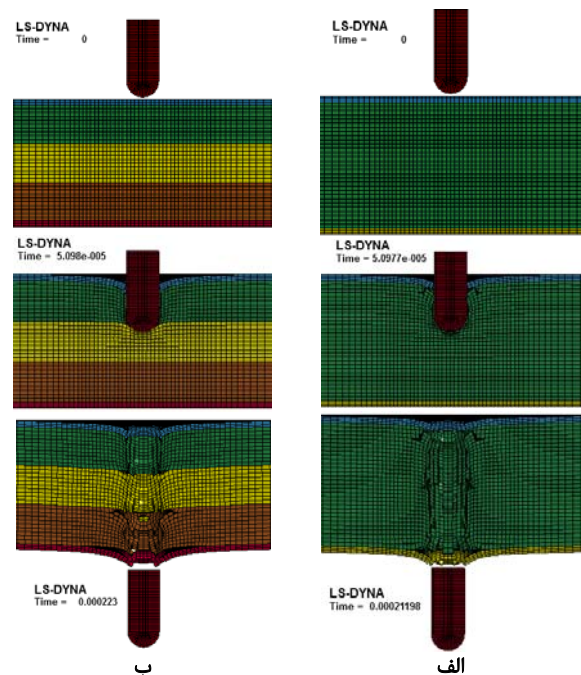
نمودار ۵ به‌دست‌آمده از روش‌های تجربی و عددی نشان می‌دهد که توانایی جذب انرژی پانل‌های ساندویچی و مقاومت بالستیکی آنها را می‌توان به‌صورت ذیل طبقه‌بندی کرد:

$V_b(P3A) < V_b(P2HL) < V_b(P3HL) < V_b(P2LH) < V_b(P3LH)$   
در نهایت با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده برای پانل‌های ساندویچی با جرم و ابعاد هندسی برابر می‌توان گفت که سازه با چگالی میانگین دارای جذب انرژی پایین‌تری نسبت به بقیه پانل‌های هم‌وزن خود بوده که به این معنی است که لایه‌ای‌کردن هسته باعث بالاتر رفتن حد بالستیک و جذب انرژی پانل می‌شود. بین سازه‌هایی با هسته لایه‌ای (تجربی و شبیه‌سازی)، چیدمانی که منجر به ایجاد هسته با چگالی کاهش می‌شود، دارای بدترین جذب انرژی یعنی کمترین حد بالستیک و چیدمان افزایشی دارای بهترین جذب انرژی و بالاترین حد بالستیک هستند و روند نفوذ می‌تواند یکی از دلایل این رویداد باشد. به‌عنوان مثال در سازه P3LH، لایه‌های پشتی چگال‌تر هستند، بنابراین هر لایه توسط لایه‌های پشتی خود به‌خوبی پشتیبانی می‌شود و این باعث می‌شود که لایه‌های جلویی، مقاومت بیشتری از خود در برابر نفوذ پرتابه نشان دهند و کرنش‌های فشاری بالاتری را تجربه کنند و دچار چگالش بیشتری شوند. در واقع، با توجه به روند نفوذ پرتابه می‌توان گفت در حالتی که چگالی هسته روند افزایشی (P3LH) دارد، پرتابه با سرعت‌های کمتری به لایه‌های چگال‌تر می‌رسد و همین امر سبب کاهش بیشتر سرعت پرتابه می‌شود. همچنین در سازه P3LH، به‌دلیل جلوگیری از نفوذ پرتابه به لایه‌های چگال‌تر فرصت بیشتری برای تغییر شکل قبل از سوراخ شدن کامل دارند و در نتیجه فرصت جذب انرژی بیشتری دارند و منجر به کاهش بیشتر سرعت پرتابه و در نهایت افزایش حد بالستیک سازه می‌شود. لیو و همکاران [25] به شبیه‌سازی مقاومت سازه‌های ساندویچی با هسته فوم با چیدمان‌های لایه‌ای مختلف تحت بارگذاری انفجاری پرداختند. نتیجه قابل توجهی که می‌توان از مقایسه مطالعه انجام‌شده در این تحقیق و کارلیو و همکاران [25] گرفت، این است که در هر دو نوع بارگذاری بالستیکی و انفجاری، لایه‌ای‌کردن هسته، جذب انرژی را بهبود می‌بخشد، اما در بارگذاری بالستیکی، چیدمان صعودی بهترین عملکرد (بالاترین حد بالستیک) را دارد و این در حالی است که در بارگذاری انفجاری، چیدمان نزولی بهترین عملکرد (کمترین تغییر شکل یا جابه‌جایی در رویه پشتی) را دارد.

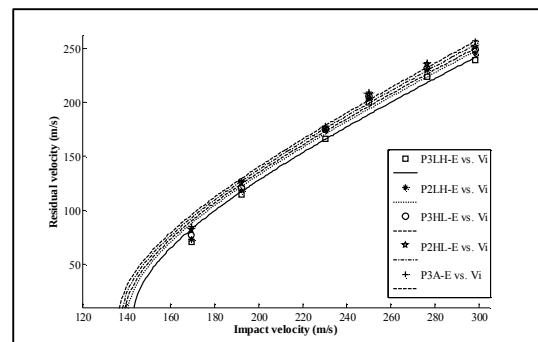
## ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مقاومت بالستیکی سازه‌های ساندویچی ساخته‌شده از رویه‌های آلومینیومی Al-1050 و هسته فوم پلی‌یورتان با چگالی ثابت و هسته فوم پلی‌یورتان مدرج با نسبت چگالی متغیر (لایه‌لایه) به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی بررسی شد. نمونه‌های با هسته فوم با نسبت چگالی میانگین ۱۴/۵٪ در پنج نوع متفاوت از لحاظ چینش لایه‌ای، در ابعاد ۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر و به روش دستی ساخته شدند. برای هر نوع از نمونه‌ها تعداد شش پانل ساخته شد

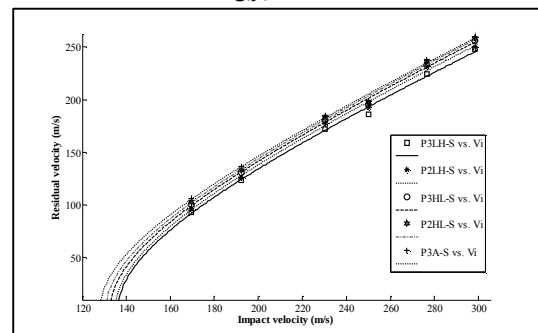
پس از رسیدن به معیار مورد نظر حذف می‌شوند، لذا نمی‌توان پلاگ‌های ناشی از برخورد را مشاهده نمود. نمودارهای حد بالستیک به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی، ترسیم و با نتایج تجربی به‌دست‌آمده مقایسه شده است. در ادامه و در نمودار ۵ برازش‌های انجام‌شده روی داده‌های عددی و تجربی به‌صورت جداگانه برای همه پانل‌های ساندویچی نمایش داده شده و در جدول ۶ سرعت‌های حد بالستیک و جذب انرژی هر پانل با استفاده از داده‌های تجربی و شبیه‌سازی نیز گزارش شده است.



شکل ۷) نفوذ پرتابه در سازه‌های ساندویچی تک‌لایه و سه‌لایه؛ (الف) تک‌لایه و (ب) سه‌لایه



الف) تجربی



ب) شبیه‌سازی

نمودار ۵) حد بالستیک کلیه پانل‌های ساندویچی به‌دست‌آمده از داده‌های تجربی و شبیه‌سازی؛ (الف) تجربی، (ب) شبیه‌سازی

energy absorption in impact on sandwich plates. *International Journal of Impact Engineering*. 1992;12(2):241-262.

8- Reyes A, Hopperstad OS, Berstad T, Hanssen AG, Langseth M. Constitutive modeling of aluminum foam including fracture and statistical variation of density. *European Journal of Mechanics A Solids*. 2003;22(6):815-835.

9- Mines RAW, Worrall CM, Gibson AG. Low velocity perforation behaviour of polymer composite sandwich panels. *International Journal of Impact Engineering*. 1998;21(10):855-879.

10- Roach AM, Evans KE, Jones N. The penetration energy of sandwich panel elements under static and dynamic loading. Part I. Composite Structures. 1998;42(2):119-134.

11- Roach AM, Jones N, Evans KE. The penetration energy of sandwich panel elements under static and dynamic loading. Part II. Composite Structures. 1998;42(2):135-152.

12- Alavi Nia A, Kazemi M. Analytical study of high velocity impact on sandwich panels with foam core and aluminum face-sheets. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(6):231-239. [Persian]

13- Hou W, Zhu F, Lu G, Fang DN. Ballistic impact experiments of metallic sandwich panels with aluminium foam core. *International Journal of Impact Engineering*. 2010;37(10):1045-1055.

14- Cao L, Lin Y, Lu F, Chen R, Zhang Z, Li Y. Experimental study on the shock absorption performance of combined aluminium honeycombs under impact loading. *Shock and Vibration*. 2015;2015:689546.

15- Ghalami-Chooabar M, Sadighi M. Investigation of high velocity impact of cylindrical projectile on sandwich panels with fiber-metal laminates skins and polyurethane core. *Aerospace Science and Technology*. 2014;32(1):142-152.

16- Ziya Shamami M, Khodarahmi H, Vahedi K, Pol MH. Experimental and numerical investigation of a blunt rigid projectile penetrating into a sandwich panel having aluminum foam core. *Journal of Modares Mechanical Engineering*. 2013;13(5):1-13. [Persian]

17- Aslani A, Zamani Ashani J. A numerical analysis on effect of impedance and thickness of various layers on deflection of target plate in layered armor systems under explosive loading. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2014;1(2):11-20. [Persian]

18- Alavi Nia A, Ranjbarzadeh H, Kazemi M. An empirical study on ballistic resistance of sandwich targets with aluminum facesheets and composite core. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2017;14(6):1085-1105.

19- Feli S, Namdari Pour MH. An analytical model for composite sandwich panels with honeycomb core subjected to high-velocity impact. *Composites Part B Engineering*. 2012;43(5):2439-2447.

20- Alavi Nia A, Mokari S, Zakizadeh M, Kazemi M. Experimental and numerical investigations of the effect of cellular wired core on the ballistic resistance of sandwich structures. *Aerospace Science and Technology*. 2017;70:445-452.

21- Su B, Zhou Z, Zhang J, Wang Z, Shu X, Li Z. A numerical study on the impact behavior of foam-cored cylindrical sandwich shells subjected to normal/oblique impact. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2015;12(11):2045-2060.

22- Ouellet S, Cronin D, Worswick M. Compressive

و اسحله گازی با پیشرانده هوا در محدوده سرعت‌های ۱۶۰-۳۰۰ متر بر ثانیه برای انجام آزمون‌های ضربه سرعت بالا به وسیله پرتابه‌های صلب سر نیم‌کروی مورد استفاده قرار گرفت. براساس نتایج به‌دست‌آمده، پارامترهایی چون چینش لایه‌ها و اثر تغییر تدریجی چگالی هسته و سرعت پرتابه در رفتار بالستیکی سازه‌های ساندویچی تاثیر داشتند. با مقایسه انجام‌شده بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی مشخص شد که تطابق خوبی بین آنها برقرار است. با فرض ثابت‌بودن وزن سازه ساندویچی با هسته فوم، با تغییر تدریجی چگالی هسته و چینش لایه‌ای بهینه می‌توان به بهترین عملکرد از لحاظ حد بالستیک و جذب انرژی رسید. تغییر تدریجی چگالی هسته در راستای مسیر نفوذ پرتابه از طریق لایه‌لایه‌کردن هسته فومی در سازه‌های ساندویچی، افزایش نسبتاً خوبی در حد بالستیک به‌وسیله روش‌های تجربی و شبیه‌سازی نشان داد، به‌طوری که با استفاده از نتایج تجربی می‌توان گفت در مقایسه با پانل ساندویچی با هسته تک‌لایه با چگالی میانگین (P3A)، سرعت حد بالستیک سازه‌های با هسته چندلایه P2LH، P3LH و P3HL به ترتیب ۲/۹، ۴/۷ و ۲ و یک‌درصد و مقدار جذب انرژی پانل‌ها به ترتیب به میزان ۹/۸، ۶/۰۴، ۴/۰۴ و ۲/۱ بیشتر است. همچنین، نتایج شبیه‌سازی به این ترتیب است که در مقایسه با پانل ساندویچی با چگالی میانگین (P3A)، سرعت حد بالستیک سازه‌های P2LH، P3LH، P3HL و P2HL به ترتیب ۶/۴، ۴/۷، ۳/۳ و ۱/۹ و مقدار جذب انرژی پانل‌ها به ترتیب به میزان ۱۳/۲، ۹/۷، ۶/۷ و ۳/۸ بیشتر است. دلیل اختلاف اندک در نتایج تجربی و شبیه‌سازی می‌تواند در نظر نگرفتن اثرات نرخ کرنش روی خواص مواد در شبیه‌سازی باشد.

**تشکر و قدردانی:** موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

**تاییدیه اخلاقی:** موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

**تعارض منافع:** موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

**سهم نویسندگان:** مهدی کاظمی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۵۰٪)؛ علی علوی‌نیا (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی (۵۰٪)

**منابع مالی:** موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

## منابع

- 1- Dean J, S-Fallah A, Brown PM, Louca LA, Clyne TW. Energy absorption during projectile perforation of lightweight sandwich panels with metallic fibre cores. *Composite Structures*. 2011;93(3):1089-1095.
- 2- Nasirzadeh R, Sabet AR. Study of foam density variations in composite sandwich panels under high velocity impact loading. *International Journal of Impact Engineering*. 2014;63:129-139.
- 3- Belingardi G, Cavatorta MP, Duella R. Material characterization of a composite-foam sandwich for the front structure of a high speed train. *Composite Structures*. 2003;61(1-2):13-25.
- 4- Cho JU, Hong SJ, Lee SK, Cho Ch. Impact fracture behavior at the material of aluminum foam. *Materials Science and Engineering A*. 2012;539:250-258.
- 5- Shen J, Lu G, Ruan D, Seah CC. Lateral plastic collapse of sandwich tubes with metal foam core. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2015;91:99-109.
- 6- Li Sh, Wang Z, Wu G, Zhao L, Li X. Dynamic response of sandwich spherical shell with graded metallic foam cores subjected to blast loading. *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*. 2014;56:262-271.
- 7- Goldsmith W, Sackman JL. An experimental study of

24- García-Castillo SK, Buitrago BL, Barbero E. Behavior of sandwich structures and spaced plates subjected to high-velocity impacts. *Polymer Composites*. 2011;32(2):290-296.

25- Liu XR, Tian XG, Lu TJ, Liang B. Sandwich plates with functionally graded metallic foam cores subjected to air blast loading. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2014;84:61-72.

response of polymeric foams under quasi-static, medium and high strain rate conditions. *Polymer Testing*. 2006;25(6):731-743.

23- Linul E, Marsavina L, Voiconi T, Sadowski T. Study of factors influencing the mechanical properties of polyurethane foams under dynamic compression. *Journal of Physics Conference Series*. 2013;451(1):012002.