



# An Investigation into Plastic Deformation of Sandwich Structures with Aluminum Facesheets and Pumice Core under Low-Velocity Impact Loading

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Eyvazkhani M.<sup>1</sup> MSc,  
Mirzababaie Mostofi T.<sup>2</sup> PhD,  
Babaei H.<sup>1\*</sup> PhD

### How to cite this article

Eyvazkhani M, Mirzababaie Mostofi T, Babaei H. An Investigation into Plastic Deformation of Sandwich Structures with Aluminum Facesheets and Pumice Core under Low-Velocity Impact Loading. Modares Mechanical Engineering. 2021;21(5):297-305.

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran

### \*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.  
Phone: +98 13 3369 0539  
Fax: -  
ghbabaei@guilan.ac.ir

### Article History

Received: December 13, 2020  
Accepted: February 27, 2021  
ePublished: April 10, 2021

## ABSTRACT

In the current research study, the large plastic deformation and failure mechanism of sandwich structures with aluminum facesheets and pumice core under low-velocity impact loading have been investigated. The drop hammer testing machine was used to apply the impact load on the specimen at seven different energy levels 34.3, 68.6, 102.9, 137.2, 171.5, 205.8, and 223 J. To achieve the mentioned energy levels, the weight of the impactor was considered constant and equal to 3.5 kg and the standoff distance of the hammer was changed from 1 to 6.5 m. 16 experimental samples were considered in two types of layering with and without pumice core. Also, in this series of experiments, the thickness of facesheets was fixed and two different thicknesses of 16 and 32 mm were considered for the core. Experimental results showed that at all energy levels, the sandwich panel with 16 mm pumice core shows a smaller deformed area due to the shorter porous space between two facesheets. Also, at low energy levels, the thickness of the pumice core does not play a key role in improving the impact resistance of the structure. Compared to the coreless sandwich structure, the use of a very low-mass pumice core can prevent the plastic deformation of the rear facesheet, and the 16 mm thickness of the pumice core can even prevent the front surface from petalling.

**Keywords** Impact Loading, Drop Hammer Testing Machine, Granular Materials, Rectangular Plate.

## CITATION LINKS

[1] On dimensionless numbers for the dynamic plastic response of quadrangular mild steel plates subjected to localized and uniform impulsive loading. [2] Dynamic plastic response of double-layered circular metallic plates due to localized impulsive loading. [3] Gas mixture detonation load on polyurea-coated aluminum plates. [4] Repeated localized impulsive loading on monolithic and multi-layered metallic plates. [5] Experimental investigation and a model presentation for predicting the behavior of metal and alumina powder compaction under impact loading. [6] Experimental and Analytical Study of Effective Factors on Compaction Process of Aluminium Powder under the Impact Load by Low Speed. [7] An experimental study of energy absorption in impact on sandwich plates. [8] Improved theory for contact indentation of sandwich panels. [9] Low velocity perforation behaviour of polymer composite sandwich panels. [10] Collapsible impact energy absorbers: an overview. [11] X-ray tomography and finite element simulation of the indentation behavior of metal foams. [12] Design and testing of joints for composite sandwich/steel hybrid ship hulls. [13] Dynamic compressive strength properties of aluminium foams. Part I—experimental data and observations. [14] Dynamic compressive strength properties of aluminium foams. Part II—‘shock’ theory and comparison with experimental data and numerical models. [15] Ballistic limit determination of aluminum honeycombs—experimental study. [16] Low-velocity impact response of sandwich composites with nanophased foam core and biaxial ( $\pm 45$ ) braided face sheets. [17] Crashworthiness design optimisation of metal honeycomb energy absorber used in lunar lander. [18] Investigation on the high velocity impact properties of glass-reinforced fiber metal laminates. [19] Experimental investigation of impact loading on honeycomb sandwich panels filled with foam. [20] Experimental investigation of quasistatic penetration tests on honeycomb sandwich panels filled with polymer foam.

## بررسی تغییر شکل پلاستیک ساختارهای ساندویچی با رویه‌های آلومینیومی و هسته پوکه معدنی تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت‌پایین

مرتضی عیوض‌خانی MSc

کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

توحید میرزایی‌بابای مستوفی PhD

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ایوان‌کی، ایوان‌کی، ایران.

هاشم بابایی \* PhD

دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

### چکیده

در پژوهش حاضر، مکانیسم تغییر شکل بزرگ پلاستیک و شکست ساختارهای ساندویچی با رویه‌های آلومینیومی و هسته پوکه معدنی تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت‌پایین مورد بررسی قرار گرفته است. از سامانه سقوط وزنه برای اعمال بار ضربه‌ای به نمونه در ۷ سطح انرژی مختلف ۳/۳۴، ۶/۶۸، ۹/۱۰۲، ۱۳/۱۳۷، ۱۷/۱۷۱ و ۲۰/۲۰۵ ژول استفاده شد. برای دستیابی به سطوح انرژی مذکور، جرم ضربه زنده ثابت و برابر با ۳/۵ کیلوگرم در نظر گرفته شد و ارتفاع ضربه زنده از نمونه از ۱ تا ۶/۵ متر تغییر داده شد. ۱۶ نمونه آزمایشی در دو نوع لایه‌بندی با و بدون هسته پوکه معدنی در نظر شد. همچنین، در این سری از آزمایش‌ها، ضخامت رویه فلزی ثابت و دو ضخامت مختلف ۱۶ و ۳۲ میلی‌متر برای هسته پوکه معدنی در نظر گرفته شد. نتایج تجربی نشان داد که در تمامی سطوح انرژی، در ساختار ساندویچی با هسته ۱۶ میلی‌متری، ناحیه کوچک‌تری دچار تغییر شکل دائمی می‌شود و این بدان علت است که فضای متخلخل میان دو ورق فلزی کوتاه‌تر است. همچنین، در سطوح انرژی پایین، ضخامت هسته پوکه معدنی نقش کلیدی را در بهبود مقاومت سازه در برابر بار ضربه‌ای وارد نمی‌کند. در قیاس با ساختار ساندویچی بدون هسته، استفاده از هسته پوکه معدنی با جرمی بسیار کم می‌تواند مانع تغییر شکل پلاستیک رویه عقبی شود و ضخامت ۱۶ میلی‌متری هسته پوکه معدنی حتی مانع گلبرگی شدن رویه جلویی نیز می‌شود.

**کلیدواژه‌ها:** بارگذاری ضربه‌ای، سامانه سقوط وزنه، مطالعه آزمایشگاهی، مواد دانه‌ای، ورق مستطیلی.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۰۹

\* نویسنده مسئول: ghhbabei@guilan.ac.ir

### ۱- مقدمه

شکل‌دهی ورق‌های فلزی همواره مورد توجه محققین و صنعت‌گران بوده است و به‌طور کلی روش‌های شکل‌دهی به دودسته تقسیم می‌شوند که عبارت‌اند از: (۱) روش شکل‌دهی با نرخ انرژی بالا<sup>[1-4]</sup>، (۲) روش شکل‌دهی با نرخ انرژی پایین<sup>[5,6]</sup>. در روش شکل‌دهی با نرخ انرژی پایین، برای شکل‌دهی فلزات از یک جرم به‌عنوان ضربه زنده استفاده می‌شود. آنچه در این شیوه اهمیت دارد، آن است که سرعت جرم به هنگام ضربه زدن می‌تواند در حدود کمتر از ۹ متر بر ثانیه باشد. انرژی تولیدی در این روش با انرژی تولیدشده به روش شکل‌دهی با سرعت‌بالا که

در آن سرعت موج ضربه در حدود ۷۶۰۰ متر بر ثانیه است قابل قیاس نیست؛ بنابراین در روش شکل‌دهی با سرعت‌بالا فشار زیادی در مدت کوتاهی بر قطعه اعمال می‌شود<sup>[5,6]</sup>. روش نرخ انرژی بالا دارای معایب و مزایایی است. به‌طور مثال، این روش معمولاً توسط خرج انفجاری انجام می‌شود که صدای ناهنجار انفجار، امکان بروز حادثه، عدم دسترسی آسان به مواد منفجره و مسائل امنیتی از معایب و محدودیت‌های این روش است. روش‌های با نرخ انرژی پایین با وجود این که میزان شکل‌پذیری ورق محدود بوده و با سرعتی پایین انجام می‌شود ولی ارزان و قابل‌دسترس هستند که این موضوع باعث جذب محققین شده است. این روش، در شمار پایین تولید و در مقیاس نمونه‌سازی می‌تواند جایگزین مناسبی برای فرآیند با نرخ انرژی بالا باشد. تحقیقات تجربی نسبتاً گسترده‌ای در زمینه شکل‌دهی با نرخ انرژی بالا ساختارهای ساندویچی توسط خرج انفجاری انجام شده است اما در خصوص شکل‌دهی با نرخ انرژی پایین این سازه با دستگاه سقوط وزنه، تحقیقات بسیار محدود است. در ادامه به‌مرور پیشینه تحقیق این موضوع پرداخته می‌شود.

در سال ۱۹۹۲، گلداسمیت و ساکمن، پانل‌های ساندویچی با ورق‌هایی از کامپوزیت و فلز را مورد تحقیق قرار دادند، آنها خم شدن و کشش هسته را مطالعه کردند<sup>[7]</sup>. در سال ۱۹۹۶، السون و همکاران، معیاری برحسب اجرام ضربه زنده به هدف ارائه کردند که برحسب آن، نوع ضربه و مدل مناسب توصیف می‌شود<sup>[8]</sup>. در سال ۱۹۹۸، ماینز و همکاران، پانل‌های ساندویچی ساخته‌شده از شیشه اپوکسی را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند<sup>[9]</sup>. در سال ۲۰۰۱ القمدی، تحقیقاتی که در چهار دهه اخیر بر روی جاذب‌های انرژی که تحت بارگذاری ضربه‌ای صورت گرفته را مورد بررسی قرار داد<sup>[10]</sup>. در سال ۲۰۰۴، کادر و همکارانش، نشان دادند که تغییر شکل پلاستیک فوم‌های فلزی فقط در منطقه زیر پرتابه در حین نفوذ رخ می‌دهد<sup>[11]</sup>. در سال ۲۰۰۴، سائو، گریستد، دو نوع اتصال چسبی و پیچی و اتصال سوراخ‌دار همراه با تزریق پس مقطعی از فولاد زنگ‌نزن از یک طرف و طرف دیگر سازه ساندویچی با رویه کامپوزیتی و هسته از جنس فوم را مورد بررسی قرار داد<sup>[12]</sup>. در سال ۲۰۰۵، رید و همکارانش، مکانیزم فشردگی و مقاومت فوم را در حین نفوذ مطالعه کردند<sup>[13,14]</sup>. در سال ۲۰۰۸، علوی نیا و همکاران، مقاومت صفحات آلومینیومی را توسط ضربه زنده استوانه‌ای مورد بررسی قرار دادند و یک مدل تحلیلی بالستیک برای آن ارائه دادند<sup>[15]</sup>. در سال ۲۰۰۹، بوئیان و همکاران، بار پیک و انرژی جذب‌شده را در طول تغییر شکل سازه مورد بررسی قرار دادند<sup>[16]</sup>. در سال ۲۰۱۱، لی و همکاران، خواص جذب انرژی توسط لانه‌زنبوری فلزی را مورد مطالعه قرار دادند، آنها از مدل سطح پاسخ برای بهینه‌سازی انرژی جذب‌شده استفاده کردند<sup>[17]</sup>. در سال ۲۰۱۲، احمدی و همکاران، اثرات سرعت، انرژی جنبشی و همچنین رفتار ضربه، تورفتگی و جابه‌جایی بر روی پانل



شکل ۱) سامانه سقوط وزنه با ظرفیت پایین در آزمایشگاه ضربه و انفجار در دانشگاه گیلان

ضربه زننده فولادی با تنش تسلیم بالا به جرم ۷۵۰ گرم است. این ضربه زننده فولادی توسط دو ریل با حداقل اصطکاک در اطرافش مهار شده که در راستای کاملاً عمودی سقوط می‌کند تا فرآیند شبیه سقوط آزاد شود. ضربه زننده سامانه مورد استفاده به همراه متعلقاتش جهت سقوط جرمی برابر با ۳/۵ کیلوگرم دارد و حداکثر می‌توان آن را تا ارتفاع ۷ متر بالا برد. جهت انجام آزمایش، ضربه زننده با دستگیره مغناطیسی قابل کنترل تا ارتفاع مناسب بالا برده می‌شود و سپس با کلید رهاسازی طراحی شده برای سامانه آزاد می‌گردد.

#### ۲-۲- نمونه‌های آزمایشگاهی و خواص مکانیکی

ساختارهای ساندویچی دارای رویه‌های آلومینیومی با ضخامت ثابت ۱ میلی‌متر در تمامی آزمایش‌ها و همچنین هسته‌ای از جنس پوکه معدنی در دو ضخامت مختلف ۱۶ و ۳۲ میلی‌متر ساخته و مهیا شدند. لازم به توضیح است که ورق‌های آلومینیومی از شرکت آلومینیوم اراک در ایران خریداری شدند. ترکیبات شیمیایی ورق آلومینیوم در جدول ۱ ارائه شده است.

در ابتدا نمونه ورق‌های مورد آزمایش در ابعاد ۴۰۰×۳۰۰ میلی‌متر برش زده شدند. نمونه‌های آزمایشی بین دو ننگه‌دارنده فولادی به ابعاد ۴۰۰×۳۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۲۰ میلی‌متر قرار داده شدند و توسط ۱۶ پیچ M12 به‌طور کاملاً گیردار مهار شدند. هر دو

جدول ۱) ترکیبات شیمیایی ورق‌های آلومینیومی استفاده شده در تحقیق حاضر (درصد وزنی)

| عنصر | ماده           |
|------|----------------|
| V    | آلومینیوم ۱۰۵۰ |
| Zn   | ۰/۰۱           |
| Ti   | ۰/۰۲           |
| Mg   | ۰/۰۳           |
| Mn   | ۰/۰۶           |
| Si   | ۰/۲۶           |
| Fe   | ۰/۴۴           |
| Al   | ۹۹/۰           |

ساندویچی مورد مطالعه قرار دادند [18]. در سال ۲۰۱۶، طبق مطالعات حسن پور و همکاران، در مورد صفحات ساندویچی، پاسخ ضربه به این صفحات وابسته به حداکثر ضربه، ضخامت سازه و نوع ورق پانل ساندویچی می‌باشد که از شرایط مرزی مستقل است [19,20].

با مرور مطالعات پیشین محققان، این نتیجه حاصل شد که بیشتر مطالعات در زمینه رفتار ساختارهای ساندویچی با رویه‌های آلومینیومی با هسته‌های فلزی بوده و تاکنون تحقیقی روی تغییر شکل پلاستیک ساختارهای ساندویچی با هسته پوکه معدنی تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت پایین انجام نشده است. لذا برای تحقق هدف مطرح شده از رویه‌های آلومینیومی و هسته پوکه معدنی در دو ترکیب بندی مختلف و آزمایش تحت هفت سطح انرژی متفاوت استفاده می‌شود. شایان توجه است که هدف اصلی دیگر طرح حاضر، پیشنهاد هسته پوکه معدنی به عنوان یک جاذب انرژی با ساختاری سبک و ارزان قیمت در سازه است. در این مطالعه تجربی، اثر ضخامت لایه پوکه معدنی، فاصله استقرار ضربه زننده از نمونه و همچنین عدم پوکه معدنی به‌عنوان هسته روی پاسخ دینامیکی و تغییر شکل پلاستیک سازه مطالعه می‌گردد که در قیاس با سایر تحقیقات موجود در ادبیات موضوع جز نوآوری‌های تحقیق حاضر محسوب می‌گردد.

#### ۲- مطالعه آزمایشگاهی

##### ۱-۲- سامانه تست آزمایشگاهی

طراحی و ساخت یک جاذب انرژی با ساختاری سبک و ارزان قیمت که دارای ظرفیت بالای جذب انرژی باشد از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است؛ لذا در این تحقیق، هدف از مطالعات آزمایشگاهی آن است تا بتوان رفتار دینامیکی ساختارهای ساندویچی با رویه‌های آلومینیومی و هسته پوکه معدنی تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت پایین با سامانه سقوط وزنه را مورد بررسی قرار داد که تاکنون در این زمینه مطالعه‌ای در پیشینه تحقیق صورت نگرفته است.

در پژوهش حاضر، مطابق با شکل ۱ از سامانه سقوط وزنه یا دراپ هم ساخته شده در آزمایشگاه ضربه و انفجار دانشگاه گیلان برای مطالعه تغییر شکل پلاستیک و الگوی شکست ساختارهای ساندویچی با رویه‌های آلومینیومی و هسته پوکه معدنی تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت پایین استفاده شده است. مطابق با شکل ارائه شده، در این سامانه انرژی پتانسیل وزنه‌ای در ارتفاع معین به انرژی جنبشی تبدیل شده و به‌صورت بار ضربه‌ای به نمونه تحت آزمایش وارد می‌شود؛ به عبارت دیگر انرژی جنبشی پرتابه به نیروی دینامیکی تبدیل می‌شود و به تبع آن تغییر شکل ساختار رخ می‌دهد. این روش ماهیتی کاملاً مکانیکی دارد و نرخ تغییر شکل در آن در بازه‌ی میلی‌ثانیه است. این سامانه متشکل از یک

شد. لازم به ذکر است که برای ورق‌های آلومینیومی در راس‌تاهای متفاوت، منحنی تنش و کرنش کاملاً مشابه و منطبق بر یکدیگر بودند. در جدول ۲، مقادیر تنش تسلیم استاتیکی، تنش نهایی و همچنین کرنش شکست، چگالی و مدول الاستیسیته برای هر دو ماده آلومینیوم و پوکه معدنی ارائه شده است.

در تحقیق حاضر از پوکه معدنی سفید استفاده شده است. پوکه معدنی متشکل از گدازه‌های آتشفشان است که پس از رسیدن به سطح زمین سرد شده و به صورت دانه‌های ریز و درشت متخلخل تشکیل گردیده که اصطلاح علمی آن پومیس می‌باشد و توسط دستگاه دانه‌بندی شده و در اختیار مصرف‌کنندگان قرار می‌گیرد. زمانی که کوه‌های آتشفشان دچار انفجار می‌شوند از آنها مواد درون هسته زمین به شکل ذوب شده خارج می‌گردد. این مواد ذوب شده دمای بسیار بالایی دارند و وقتی به زمین می‌رسد دمای آنها کاهش پیدا می‌کند و سپس پوکه سفید را تشکیل می‌دهد. در پوکه‌های سفید تخلخل زیادی وجود دارد به همین دلیل صدا، گرما و سرما نمی‌تواند از آن عبور کند. این پوکه دارای وزن کم و بسیار سبک است که در عین حال مقاومت خوبی در برابر ضربه از خود نشان می‌دهد. همچنین عمر تمام نشدنی دارد که بیش از هزاران سال همانند روز قبل باقی می‌ماند. این پوکه سایندهای مختلفی دارد که شامل: پوکه بادامی، پوکه نخودی، پوکه عدسی، و پوکه ماسه نرمه. این پوکه به دلیل داشتن خاصیت نرم و پودر شونگی بهترین گزینه برای انتخاب هسته سازه ساندویچی است و قابلیت جذب انرژی فوق‌العاده‌ای دارد.

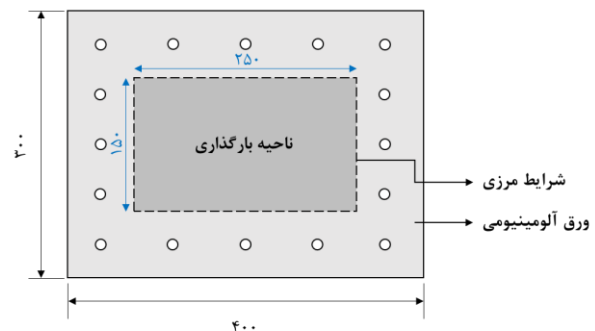
با توجه به توضیحات ارائه شده و مطابق با جدول ۳، ۱۶ ساختار ساندویچی شامل ۱۴ ساختار با هسته پوکه معدنی و ۲ ساختار بدون هسته پوکه معدنی در چهار گروه‌بندی به‌منظور بررسی تغییر شکل پلاستیک و پاسخ دینامیکی ساختارهای ساندویچی با رویه‌های آلومینیومی و هسته پوکه معدنی تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت‌پایین طراحی و ساخته شده‌اند. دو گروه اول آزمایشی تحت ۷ سطح انرژی مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. این در حالی است که برای دو گروه بعدی تنها یک سطح انرژی جهت مقایسه با ساختار ساندویچی با هسته پوکه معدنی در نظر گرفته شد. شایان توجه است که در این سری از آزمایش‌ها، تمرکز کارهای تجربی انجام‌گرفته بر میزان اثربخشی استفاده از هسته پوکه معدنی روی افزایش مقاومت ساختارهای ساندویچی سبک در برابر بار ضربه‌ای بود.

جدول ۲) خواص مکانیکی مواد استفاده شده در تحقیق حاضر

| ماده       | تنش تسلیم استاتیکی (MPa) | تنش نهایی استاتیکی (MPa) | کرنش شکست (%) | چگالی (kg/m <sup>3</sup> ) | مدول یانگ (GPa) |
|------------|--------------------------|--------------------------|---------------|----------------------------|-----------------|
| آلومینیوم  | ۱۱۰                      | ۱۲۳                      | ۰/۴۰          | ۲۷۰۰                       | ۶۹              |
| پوکه معدنی | -                        | -                        | -             | ۲۷۰                        | -               |

نگهدارنده دارای سوراخی با ابعاد ۲۵۰×۱۵۰ میلی‌متر هستند که این سوراخ در نگه‌دارنده جلویی برای امکان خروج و شکل‌گیری ورق و در نگه‌دارنده عقبی برای اعمال بار روی نمونه آزمایشی است. فرض بر این است که به دلیل ضخامت زیاد نگه‌دارنده‌های فلزی، آن‌ها از اجسام غیرقابل تغییر شکل هستند؛ یعنی در مقایسه با نمونه‌های آزمایشگاهی نازک تغییر شکل غیرقابل توجهی را تجربه می‌کنند. شایان توجه است که برای قرار دادن پوکه‌های معدنی به‌عنوان جاذب انرژی و هسته در میان دو رویه آلومینیومی از نگه‌دارنده‌های چوبی در ضخامت‌های ۱۶ و ۳۲ میلی‌متر استفاده گردید. میزان تغییر شکل نهایی تمامی نمونه‌ها پس از انجام آزمایش، توسط کولیس ارتفاع‌سنج اندازه‌گیری شده است. شماتیک هندسی نمونه آزمایشی و همچنین نمونه‌ای از رویه آلومینیومی به همراه هسته پوکه معدنی قبل از انجام آزمایش به ترتیب در شکل ۲ و شکل ۳ نشان داده شده است.

خواص مکانیکی مواد فلزی مورد استفاده در این مجموعه آزمایشی از انجام آزمون کشش تک‌محوره بر مبنای استاندارد ASTM-E8 روی نمونه‌های آماده‌شده از ورق‌هایی از جنس آلایژ آلومینیوم تعیین شده است. برای بررسی همگنی خواص مواد، از هر ورق در سه راستای مختلف افقی، عمودی و اریب (۴۵ درجه) نمونه‌هایی را با دستگاه وایر کات برش زده و سپس تحت آزمایش کشش با شرایط کاملاً یکسان قرار داده شد. برای تعیین تنش تسلیم استاتیکی و تنش نهایی استاتیکی، از هر ضخامت، دو نمونه آزمایشگاهی تهیه شد. در انجام آزمایش، نمونه‌ها با سه سرعت ۰.۵، ۱۰ و ۱۵ (میلی‌متر بر دقیقه) تحت کشش قرار گرفته‌اند. با توجه به طول اولیه نمونه‌ها (۵۰ میلی‌متر)، سه نرخ کرنش با مقادیر s-1 ۱/۶۷×۱۰<sup>-۳</sup>، s-1 ۳/۳۳×۱۰<sup>-۳</sup> و s-1 ۵×۱۰<sup>-۳</sup> اعمال

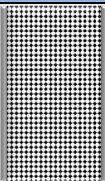
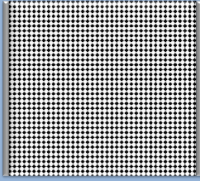


شکل ۲) شماتیک هندسی نمونه آزمایشی (ابعاد به میلی‌متر است)



شکل ۳) نمونه‌ای از ساختار قبل از انجام آزمایش

جدول ۳) گروه‌های آزمایشی

| هئندسه  | کد آزمایش | ضخامت کل (mm) | چگالی سطحی (kg/m <sup>2</sup> ) | فاصله ضربه زننده از هدف (mm)  | تعداد آزمایش |
|---|-----------|---------------|---------------------------------|-------------------------------|--------------|
|  | Al-P16-Al | ۱۰/۵+۱        | ۱۵/۱                            | ۶/۵ و ۴/۵، ۳/۴، ۳/۳، ۲/۳، ۱/۳ | ۷            |
|  | Al-P32-Al | ۱۰/۳۲+۱       | ۱۹/۴                            | ۶/۵ و ۴/۵، ۳/۴، ۳/۳، ۲/۳، ۱/۳ | ۷            |
| هوا   | Al-A16-Al | ۱۰/۵+۱        | ۱۰/۸                            | ۶                             | ۱            |
| هوا   | Al-A32-Al | ۱۰/۳۲+۱       | ۱۰/۸                            | ۶                             | ۱            |

در جدول ارائه شده، در ستون کد آزمایش، حرف Al بیانگر ورق آلومینیومی، حرف P بیانگر هسته پوکه معدنی، عدد بعد از حرف P نشان دهنده ضخامت هسته است. همچنین حرف A به معنای در نظر گرفتن هوا بین دو ورق آلومینیومی است.

### ۳- بحث و بررسی نتایج تجربی

در جدول ۴، کلیه مشخصات و نتایج آزمایش‌های انجام شده روی ساختارهای ساندویچی با رویه‌های آلومینیومی و هسته پوکه معدنی تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت پایین در سطوح انرژی مختلف ارائه شده است. در این جدول،  $W_{0,f}$  بیشترین خیز دائمی رویه جلویی،  $W_{0,b}$  بیشترین خیز دائمی رویه عقبی،  $D_f$  قطر تغییر شکل رویه جلویی و  $D_b$  قطر تغییر شکل رویه عقبی ارائه شده است. نتایج به دست آمده از مجموعه آزمایش‌های انجام گرفته نشان دهنده پاسخ و رفتار مکانیکی ساختارهای ساندویچی با رویه‌های آلومینیومی و هسته پوکه معدنی تحت بارگذاری ضربه‌ای است که در آن اثر تغییرات ضخامت هسته، سطح انرژی و نوع هسته بررسی شده است. لازم به توضیح است که در این سری از آزمایش‌ها، جرم ضربه زننده برابر با  $3/5$  کیلوگرم بوده و مقادیر بیشترین خیز برای لایه عقبی ارائه شده است. شایان توجه است که داده‌های ستاره‌دار، به دلیل گلبرگی شدن رویه، بیشترین تغییر شکل دائمی سازه تا نقطه اثر باقی مانده روی هسته محاسبه شده است.

### ۳-۱- مکانیسم تغییر شکل و الگوی شکست

در این قسمت از تحقیق، در ابتدا به بیان مشاهدات تجربی در مورد مدهای تغییر شکل ساختارهای ساندویچی پرداخته می‌شود و سپس تأثیر تغییر پارامترهای تجربی مانند ضخامت هسته، وجود یا عدم وجود هسته پوکه معدنی و سطح انرژی بر بیشترین خیز دائمی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. مشاهدات تجربی باهدف بررسی مدهای تغییر شکل ساختارهای ساندویچی با رویه‌های آلومینیومی و هسته پوکه معدنی تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت پایین نشان می‌دهد که در طول ۷ آزمایش برای

جدول ۴) نتایج تجربی

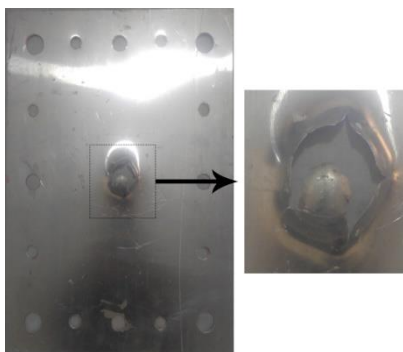
| کد آزمایش    | فاصله برخورد (m) | سرعت برخورد (m/s) | انرژی (J) | $W_{0,f}$ (mm) | $W_{0,b}$ (mm) | $D_f$ (mm) | $D_b$ (mm) | توضیحات                  |
|--------------|------------------|-------------------|-----------|----------------|----------------|------------|------------|--------------------------|
| Al-P16-Al-1  | ۱                | ۴/۴               | ۳۴/۳      | ۲/۳۵           | ۰              | ۹/۷۷       | ۰          | بدون پارگی               |
| Al-P16-Al-2  | ۲                | ۶/۳               | ۶۸/۶      | ۵/۶۴           | ۰              | ۱۲/۹۷      | ۰          | بدون پارگی               |
| Al-P16-Al-3  | ۳                | ۷/۷               | ۱۰۲/۹     | ۱۰/۱۲          | ۰              | ۱۸/۹۵      | ۰          | بدون پارگی               |
| Al-P16-Al-4  | ۴                | ۸/۹               | ۱۳۷/۲     | ۱۲/۸۷          | -۰/۳           | ۲۲/۸۰      | ۴/۴۴       | پارگی جزئی در رویه جلویی |
| Al-P16-Al-5  | ۵                | ۹/۹               | ۱۷۱/۵     | ۱۴/۳۸          | -۰/۷           | ۲۵/۵۷      | ۶/۹۰       | پارگی جزئی در رویه جلویی |
| Al-P16-Al-6  | ۶                | ۱۰/۸              | ۲۰۵/۸     | ۱۵/۹۶          | -۰/۴۵          | ۲۷/۸۹      | ۱۱/۰۵      | پارگی جزئی در رویه جلویی |
| Al-P16-Al-7  | ۶/۵              | ۱۱/۳              | ۲۲۳/۰     | ۱۶/۷۴°         | -۰/۶۳          | ۲۸/۵۳      | ۱۲/۳۴      | گلبرگ شدن رویه جلویی     |
| Al-P32-Al-8  | ۱                | ۴/۴               | ۳۴/۳      | ۲/۴۱           | ۰              | ۱۰/۰۶      | ۰          | بدون پارگی               |
| Al-P32-Al-9  | ۲                | ۶/۳               | ۶۸/۶      | ۷/۳۳           | ۰              | ۱۵/۵۶      | ۰          | بدون پارگی               |
| Al-P32-Al-10 | ۳                | ۷/۷               | ۱۰۲/۹     | ۱۳/۳۷          | ۰              | ۲۰/۸۵      | ۰          | بدون پارگی               |
| Al-P32-Al-11 | ۴                | ۸/۹               | ۱۳۷/۲     | ۱۶/۵۸          | ۰              | ۲۴/۰۵      | ۰          | پارگی جزئی در رویه جلویی |
| Al-P32-Al-12 | ۵                | ۹/۹               | ۱۷۱/۵     | ۱۸/۸۵          | ۰              | ۲۶/۸۰      | ۰          | پارگی جزئی در رویه جلویی |
| Al-P32-Al-13 | ۶                | ۱۰/۸              | ۲۰۵/۸     | ۲۰/۸۴°         | ۰              | ۲۹/۱۵      | ۰          | گلبرگ شدن رویه جلویی     |
| Al-P32-Al-14 | ۶/۵              | ۱۱/۳              | ۲۲۳/۰     | ۲۱/۷۲°         | ۰              | ۲۹/۶۹      | ۰          | گلبرگ شدن رویه جلویی     |
| Al-A16-Al-15 | ۶                | ۱۰/۸              | ۲۰۵/۸     | ۵۱/۱۴°         | ۱۳/۲۶          | ۳۴/۱۱      | ۱۲/۱۲      | گلبرگ شدن رویه جلویی     |
| Al-A16-Al-15 | ۶                | ۱۰/۸              | ۲۰۵/۸     | ۵۱/۱۴°         | ۱۳/۲۶          | ۳۴/۱۱      | ۱۲/۱۲      | پارگی جزئی در رویه عقبی  |

جذب می‌کند و لایه عقبی دچار هیچ‌گونه تغییر شکل الاستیک بزرگی نشده است.

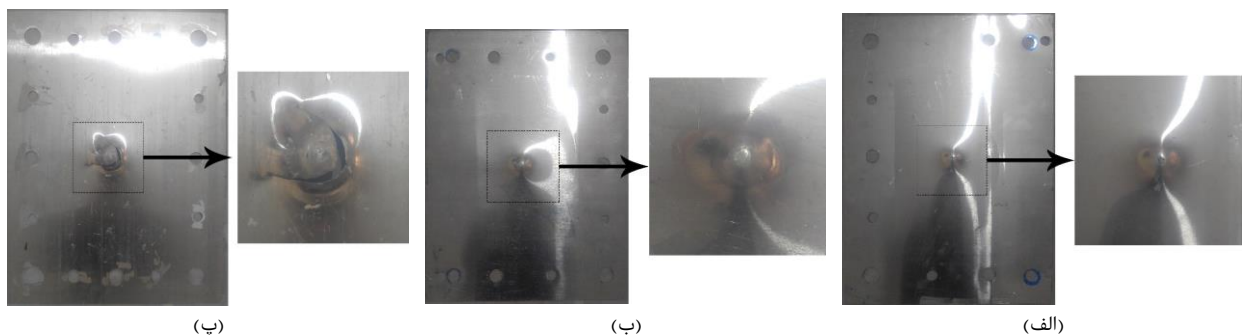
### ۳-۲- رابطه بیشترین خیز دائمی با انرژی

اکنون، پس از بررسی و تشریح مدهای تغییر شکل پلاستیک ساختارهای ساندویچی با رویه‌های آلومینیومی و هسته پوکه معدنی تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت‌پایین به تحلیل نتایج تجربی کمی به‌دست‌آمده پرداخته می‌شود. لازم به توضیح است که در تحلیل‌های انجام‌شده در این بخش، جرم ضربه زننده برابر با ۳/۵ کیلوگرم لحاظ شده است. در شکل ۶، نمودار تغییرات بیشترین خیز دائمی رویه جلویی برای دو ساختار Al-P16-Al و Al-P32-Al برحسب انرژی پتانسیل نمایش داده شده است. جهت تحلیل کمی و مقایسه آماری، در شکل ۷ نیز نمودار ستونی تغییرات بیشترین خیز دائمی رویه جلویی برای دو ساختار برحسب انرژی پتانسیل نمایش داده شده است.

در حالت کلی، همان‌طور که انتظار می‌رفت، بیشترین خیز دائمی ساختارهای مختلف با افزایش انرژی پتانسیل به‌صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. برای بیان رابطه بیشترین خیز دائمی رویه جلویی دو ساختار Al-P16-Al و Al-P32-Al برحسب انرژی پتانسیل، در شکل ۶ نمودارهای درجه ۲ روی داده‌های آزمایشگاهی برازش شد که معادلات برازش در همان شکل ارائه شده است. نگاه دقیق‌تر به نمودار ارائه‌شده در شکل ۷ و جدول داده‌های تجربی نشان می‌دهد که در تمامی سطوح انرژی، ساختار Al-P16-Al دارای عملکرد بهتری در برابر بار ضربه‌ای بوده



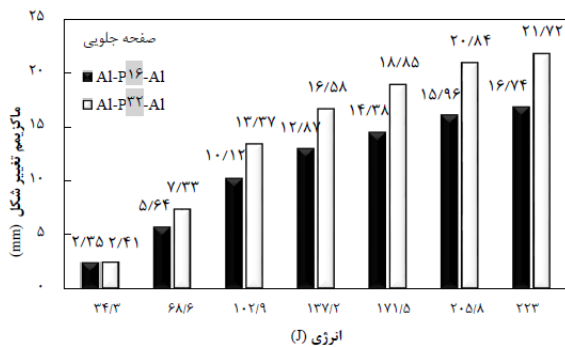
شکل ۵) مکانیسم تغییر شکل پلاستیک رویه جلویی ساختارهای آزمایشی Al-P32-Al-13



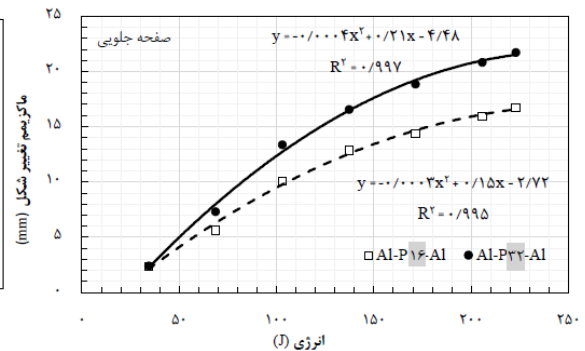
شکل ۴) مکانیسم تغییر شکل پلاستیک رویه جلویی ساختارهای آزمایشی Al-P16-Al: الف) Al-P16-Al-1، ب) Al-P16-Al-4، پ) Al-P16-Al-7

ضخامت ۱۶ میلی‌متری هسته پوکه معدنی، ساختارها سطوح مختلفی از تغییر شکل غیر الاستیک بزرگ (مد اول تغییر شکل)، پارگی جزئی در ناحیه برخورد ضربه زننده و همچنین گلبرگ شدن را نشان دادند. این در حالی است که با افزایش انرژی جنبشی به ۱۳۷/۲ ژول، به‌تدریج رویه عقبی شروع به تغییر شکل پلاستیک کرده و هسته پوکه معدنی نیروی ضربه‌ای اعمال‌شده را به رویه عقبی منتقل می‌کند. همچنین گلبرگی شدن رویه جلویی در آخرین سطح انرژی؛ یعنی، ۲۲۳ ژول، رخ می‌دهد. شایان توجه است که این تغییر شکل بسیار جزئی بوده و می‌توان این‌گونه در نظر گرفت که ساختار Al-P16-Al توانایی جذب انرژی ۲۲۳ ژول را بدون آنکه به رویه عقبی آسیب برسد، دارد. نمونه‌ای از پروفیل تغییر شکل ساختارهای آزمایشی Al-P16-Al در شکل ۴ نشان داده شده است. پروفیل‌های تغییر شکل نشان داده شده برای سازه در این مجموعه آزمایشی بیانگر آن است که لایه جلویی و هسته پوکه معدنی، انرژی قابل‌توجهی از برخورد ضربه زننده با سازه را جذب می‌کند و انرژی جنبشی منتقل‌شده بر سطح لایه عقبی در سطوح انرژی بالاتر بسیار کم است. همچنین سطحی از ساختار که بین دو نگه‌دارنده قرار دارد، دچار هیچ‌گونه تغییر شکل غیر الاستیک بزرگی نشده و مکان‌هایی که در آن‌ها پیچ‌ها قرار دارند، دچار هیچ‌گونه کشیدگی نشده‌اند.

همچنین در طول ۷ آزمایش برای ضخامت ۳۲ میلی‌متری هسته پوکه معدنی، مشابه با حالت قبل، ساختارهای آزمایشی سطوح مختلفی از تغییر شکل غیر الاستیک بزرگ (مد اول تغییر شکل)، پارگی جزئی در ناحیه برخورد ضربه زننده و همچنین گلبرگ شدن را نشان دادند. این در حالی است که برخلاف حالت قبلی و با افزایش ضخامت هسته، گلبرگی شدن رویه جلویی از یک سطح پایین‌تر (۲۰۵/۸ ژول) در مقایسه با ضخامت هسته ۱۶ میلی‌متری شروع می‌شود. همچنین افزایش ضخامت هسته پوکه معدنی باعث می‌شود که هسته انرژی بیشتری جذب کند و رویه عقبی به‌هیچ‌وجه دچار تغییر شکل پلاستیک نگردد. نمونه‌ای از پروفیل تغییر شکل ساختارهای آزمایشی Al-P32-Al در شکل ۵ نشان داده شده است. پروفیل‌های تغییر شکل نشان داده شده برای سازه در این مجموعه آزمایشی بیانگر آن است که لایه جلویی و هسته پوکه معدنی، انرژی قابل‌توجهی از برخورد ضربه زننده با سازه را



شکل ۷) نمودار ستونی تغییرات بیشترین خیز دائمی رویه جلویی دو ساختار Al-P32-Al و P16-Al برحسب انرژی پتانسیل

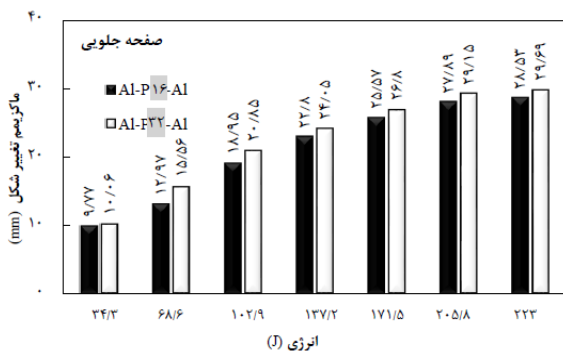


مرحله قبل می‌شود. مقایسه نتایج برای دو ساختار نشان می‌دهد که روند افزایش در ساختار ساندویچی به هسته پوک‌ه معدنی با ضخامت ۳۲ میلی‌متر صعودی‌تر بوده و این به علت افزایش حجم فضای متخلخل ایجادشده بین دو ورق آلومینیومی است. لذا باید سعی کرد تا بهینه‌ترین فاصله بین دو ورق را برای پر کردن پوک‌ه معدنی به دست آورد. علاوه بر آن، مقایسه نتایج برای دو حالت وجود/عدم وجود هسته پوک‌ه معدنی با ضخامت ۱۶ و ۳۲ میلی‌متر نشان می‌دهد که استفاده از هسته منجر به کاهش بیشترین خیز دائمی رویه عقبی به میزان قابل‌توجهی می‌شود و مانع از نفوذ کامل ضربه زنده در هسته و رویه عقبی می‌گردد.

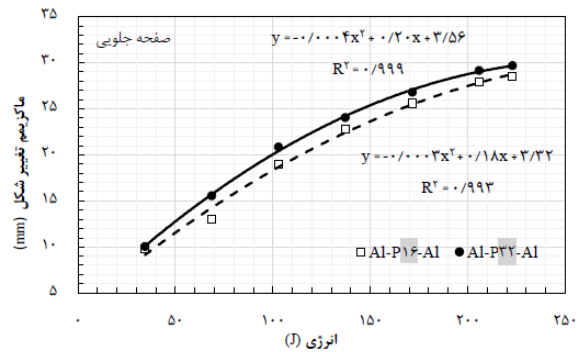
### ۳-۳- رابطه قطر ناحیه تغییر شکل یافته با انرژی

اکنون، پس از بررسی و تشریح رابطه بیشترین خیز دائمی با انرژی پتانسیل در رفتار ساختارهای ساندویچی با رویه‌های آلومینیومی و هسته پوک‌ه معدنی تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت‌پایین به تحلیل رابطه قطر ناحیه تغییر شکل یافته با انرژی پرداخته می‌شود. در شکل ۸، نمودار تغییرات قطر ناحیه تغییر شکل یافته رویه جلویی برای دو ساختار Al-P16-Al و Al-P32-Al برحسب انرژی پتانسیل نمایش داده شده است. جهت تحلیل کمی و مقایسه آماری، در شکل ۹ نیز نمودار ستونی تغییرات قطر ناحیه تغییر شکل یافته رویه جلویی برای دو ساختار برحسب انرژی پتانسیل نمایش داده شده است.

است. این در صورتی است که هر دو ساختار در اولین سطح انرژی؛ یعنی ۳۴/۳ ژول، تفاوت چندانی ندارند و این بدان معناست که در سطوح انرژی پایین ضخامت هسته پوک‌ه معدنی نقش کلیدی را در بهبود مقاومت سازه در برابر بار ضربه‌ای وارد نمی‌کند. به‌طور جزئی‌تر، مقایسه نتایج به‌دست‌آمده برای ساختار Al-P16-Al نشان می‌دهد که افزایش تصاعدی انرژی پتانسیل از ۳۴/۳ تا ۲۲۳ ژول منجر به افزایش بیشترین خیز دائمی رویه جلویی به میزان ۱۴۰، ۳۳۰/۶، ۴۴۷/۷، ۵۱۱/۹، ۵۷۹/۱ و ۶۱۲/۳ درصد به ترتیب در فاصله استقرار ضربه زنده از ۲ متر، ۳ متر، ۴ متر، ۵ متر، ۶ متر و ۶/۵ متر در مقایسه با شرایط ۱ متر می‌شود. همچنین مقایسه نتایج برای این ساختار نشان می‌دهد که افزایش سطح انرژی در هر مرحله منجر به افزایش بیشترین خیز دائمی رویه جلویی به میزان ۱۴۰، ۷۹/۴، ۲۷/۲، ۱۱/۷، ۱۱/۰ و ۴/۹ درصد در مقایسه با مرحله قبل می‌شود. همچنین مقایسه نتایج به‌دست‌آمده برای ساختار Al-P32-Al نشان می‌دهد که افزایش تصاعدی انرژی پتانسیل از ۳۴/۳ تا ۲۲۳ ژول منجر به افزایش بیشترین خیز دائمی رویه جلویی به میزان ۲۰۴/۱، ۴۵۴/۸، ۳۸۳/۸، ۶۸۲/۲، ۷۶۴/۷ و ۸۰۱/۲ درصد به ترتیب در فاصله استقرار ضربه زنده از ۲ متر، ۳ متر، ۴ متر، ۵ متر، ۶ متر و ۶/۵ متر در مقایسه با شرایط ۱ متر می‌شود. همچنین مقایسه نتایج برای این ساختار نشان می‌دهد که افزایش سطح انرژی در هر مرحله منجر به افزایش بیشترین خیز دائمی رویه جلویی به میزان ۲۰۴/۱، ۸۲/۴، ۲۴/۰، ۱۳/۷، ۱۰/۶ و ۴/۲ درصد در مقایسه با



شکل ۸) تغییرات قطر ناحیه تغییر شکل یافته رویه جلویی دو ساختار Al-P16-Al و Al-P32-Al برحسب انرژی پتانسیل



#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی پاسخ دینامیکی و تغییر شکل پلاستیک ساختارهای ساندویچی با رویه‌های آلومینیومی و هسته پوکو معدنی تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت‌پایین با سامانه سقوط وزنه پرداخته شده است. در این سری از آزمایش‌ها، ۱۶ ساختار ساندویچی شامل ۱۴ ساختار با هسته پوکو معدنی و ۲ ساختار بدون هسته پوکو معدنی با رویه‌های آلومینیومی در چهار گروه‌بندی طراحی و ساخته شدند. دو گروه اول آزمایشی تحت ۷ سطح انرژی مختلف ۳/۳۴، ۶/۶۸، ۹/۱۰۲، ۱۲/۱۳۷، ۱۵/۱۷۱، ۸/۲۰۵ و ۲۲۳ ژول موردبررسی قرار گرفتند. این در حالی است که برای دو گروه بعدی تنها یک سطح انرژی ۸/۲۰۵ ژول جهت مقایسه با ساختار ساندویچی با هسته پوکو معدنی در نظر گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد که

در طول ۷ آزمایش برای ضخامت ۱۶ میلی‌متری هسته پوکو معدنی، ساختارها سطوح مختلفی از تغییر شکل غیر الاستیک بزرگ (مد اول تغییر شکل)، پارگی جزئی در ناحیه برخورد ضربه زننده و همچنین گلبرگ شدن را نشان دادند و با افزایش انرژی جنبشی به ۲/۱۳۷ ژول، به تدریج رویه عقبی شروع به تغییر شکل پلاستیک کرده و هسته پوکو معدنی نیروی ضربه‌ای اعمال شده را به رویه عقبی منتقل می‌کند. همچنین، گلبرگی شدن رویه جلویی در آخرین سطح انرژی؛ یعنی، ۲۲۳ ژول، رخ می‌دهد ولی این تغییر شکل بسیار جزئی بوده و می‌توان این‌گونه در نظر گرفت که ساختار Al-P16-Al توانایی جذب انرژی ۲۲۳ ژول را بدون آنکه به رویه عقبی آسیب برسد، دارد.

در طول ۷ آزمایش برای ضخامت ۳۲ میلی‌متری هسته پوکو معدنی نیز ساختارهای آزمایشی سطوح مختلفی از تغییر شکل غیر الاستیک بزرگ (مد اول تغییر شکل)، پارگی جزئی در ناحیه برخورد ضربه زننده و همچنین گلبرگ شدن را نشان دادند. این در حالی است که برخلاف حالت قبلی و با افزایش ضخامت هسته، گلبرگی شدن رویه جلویی از یک سطح پایین‌تر (۸/۲۰۵ ژول) در مقایسه با ضخامت هسته ۱۶ میلی‌متری شروع می‌شود. همچنین افزایش ضخامت هسته پوکو معدنی باعث می‌شود که هسته انرژی بیشتری جذب کند و رویه عقبی به‌هیچ‌وجه دچار تغییر شکل پلاستیک نگردد.

در قیاس با ساختار ساندویچی بدون هسته، استفاده از هسته پوکو معدنی با جرمی بسیار کم می‌تواند مانع تغییر شکل پلاستیک رویه عقبی شود و ضخامت ۱۶ میلی‌متری هسته پوکو معدنی حتی مانع گلبرگی شدن رویه جلویی نیز می‌شود.

در سطوح انرژی پایین ضخامت هسته پوکو معدنی نقش کلیدی را در بهبود مقاومت سازه در برابر بار ضربه‌ای وارد نمی‌کند.

در تمامی سطوح انرژی، در ساختار Al-P16-Al ناحیه کوچک‌تری دچار تغییر شکل دائمی می‌شود و این بدان علت است که فضای متخلخل میان دو ورق فلزی کوتاه‌تر است. این در صورتی است

در حالت کلی، همان‌طور که انتظار می‌رفت، قطر ناحیه تغییر شکل یافته ساختارهای مختلف با افزایش انرژی پتانسیل به‌صورت غیرخطی افزایش می‌یابد به‌طوری‌که در ابتدا دارای شیب بسیار صعودی و پس‌از آن به مقداری ثابت که برابر با قطر ضربه زننده است، می‌رسد. برای بیان رابطه قطر ناحیه تغییر شکل یافته رویه جلویی دو ساختار Al-P16-Al و Al-P32-Al برحسب انرژی پتانسیل، در شکل ۸ نمودارهای درجه ۲ روی داده‌های آزمایشگاهی برازش شد که معادلات برازش شده در همان شکل ارائه شده است. نگاه دقیق‌تر به نمودار ارائه شده در شکل ۹ و جدول داده‌های تجربی نشان می‌دهد که در تمامی سطوح انرژی، در ساختار Al-P16-Al ناحیه کوچک‌تری دچار تغییر شکل دائمی می‌شود و این بدان علت است که فضای متخلخل میان دو ورق فلزی کوتاه‌تر است. این در صورتی است که هر دو ساختار در اولین سطح انرژی؛ یعنی ۳/۳۴ ژول، تفاوت چندانی ندارند و این مسئله دوباره نکته گفته شده در قسمت قبلی را تأیید می‌نماید که در سطوح انرژی پایین ضخامت هسته پوکو معدنی نقش کلیدی را در بهبود مقاومت سازه در برابر بار ضربه‌ای وارد نمی‌کند. به‌طور جزئی‌تر، مقایسه نتایج به‌دست‌آمده برای ساختار Al-P16-Al نشان می‌دهد که افزایش تصاعدی انرژی پتانسیل از ۳/۳۴ تا ۲۲۳ ژول منجر به افزایش قطر ناحیه تغییر شکل یافته رویه جلویی به میزان ۸/۳۲، ۰/۹۴، ۴/۱۳۳، ۷/۱۶۱، ۵/۱۸۵ و ۰/۱۹۲ درصد به ترتیب در فاصله استقرار ضربه زننده از ۲ متر، ۳ متر، ۴ متر، ۵ متر، ۶ متر و ۷/۶ متر در مقایسه با شرایط ۱ متر می‌شود. همچنین مقایسه نتایج برای این ساختار نشان می‌دهد که افزایش سطح انرژی در هر مرحله منجر به افزایش قطر ناحیه تغییر شکل یافته رویه جلویی به میزان ۸/۳۲، ۱/۴۶، ۳/۲۰، ۱/۱۲، ۱/۹ و ۱/۳ درصد در مقایسه با مرحله قبل می‌شود. همچنین مقایسه نتایج به‌دست‌آمده برای ساختار Al-P32-Al نشان می‌دهد که افزایش تصاعدی انرژی پتانسیل از ۳/۳۴ تا ۲۲۳ ژول منجر به افزایش قطر ناحیه تغییر شکل یافته رویه جلویی به میزان ۷/۵۴، ۳/۱۰۷، ۱/۱۳۹، ۴/۲۶۶، ۸/۱۸۹ و ۱/۱۹۵ درصد به ترتیب در فاصله استقرار ضربه زننده از ۲ متر، ۳ متر، ۴ متر، ۵ متر، ۶ متر و ۷/۶ متر در مقایسه با شرایط ۱ متر می‌شود. همچنین مقایسه نتایج برای این ساختار نشان می‌دهد که افزایش سطح انرژی در هر مرحله منجر به افزایش قطر ناحیه تغییر شکل یافته رویه جلویی به میزان ۷/۵۴، ۰/۳۴، ۳/۱۵، ۴/۱۱، ۸/۸ و ۹/۱ درصد در مقایسه با مرحله قبل می‌شود. مقایسه نتایج برای دو ساختار نشان می‌دهد که روند افزایش در ساختار ساندویچی به هسته پوکو معدنی با ضخامت ۳۲ میلی‌متر صعودی‌تر بوده و این به علت افزایش حجم فضای متخلخل ایجاد شده بین دو ورق آلومینیومی است. لذا باید سعی کرد تا بهینه‌ترین فاصله بین دو ورق را برای پر کردن پوکو معدنی به دست آورد.



sandwich panels. *International Journal of Impact Engineering*. 1998;21(10):855-79.

10- Alghamdi AA. Collapsible impact energy absorbers: an overview. *Thin-walled structures*. 2001;39(2):189-213.

11- Kádár C, Maire E, Borbély A, Peix G, Lendvai J, Rajkovits Z. X-ray tomography and finite element simulation of the indentation behavior of metal foams. *Materials Science and Engineering: A*. 2004;387:321-5.

12- Cao J, Grenestedt JL. Design and testing of joints for composite sandwich/steel hybrid ship hulls. *Composites Part A: Applied science and manufacturing*. 2004;35(9):1091-105.

13- Tan PJ, Reid SR, Harrigan JJ, Zou Z, Li S. Dynamic compressive strength properties of aluminium foams. Part I—experimental data and observations. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2005;53(10):2174-205.

14- Tan PJ, Reid SR, Harrigan JJ, Zou Z, Li S. Dynamic compressive strength properties of aluminium foams. Part II—'shock'theory and comparison with experimental data and numerical models. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2005;53(10):2206-30.

15- Nia AA, Razavi SB, Majzooobi GH. Ballistic limit determination of aluminum honeycombs—experimental study. *Materials Science and Engineering: A*. 2008;488(1-2):273-80.

16- Bhuiyan MA, Hosur MV, Jeelani S. Low-velocity impact response of sandwich composites with nanophased foam core and biaxial ( $\pm 45$ ) braided face sheets. *Composites Part B: Engineering*. 2009;40(6):561-71.

17- Li M, Deng Z, Liu R, Guo H. Crashworthiness design optimisation of metal honeycomb energy absorber used in lunar lander. *International Journal of crashworthiness*. 2011;16(4):411-9.

18- Ahmadi H, Liaghat GH, Sabouri H, Bidkhouiri E. Investigation on the high velocity impact properties of glass-reinforced fiber metal laminates. *Journal of Composite Materials*. 2013;47(13):1605-15.

19- Hassanpour Roubeneh F, Liaghat G, Sabouri H, Hadavinia H. High-velocity impact loading in honeycomb sandwich panels reinforced with polymer foam: a numerical approach study. *Iranian Polymer Journal*. 2020;707-21.

20- Hassanpour Roubeneh F, Liaghat G, Sabouri H, Hadavinia H. Experimental investigation of quasistatic penetration tests on honeycomb sandwich panels filled with polymer foam. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2020;27(21):1803-15.

که هر دو ساختار در اولین سطح انرژی؛ یعنی ۳۴/۳ ژول، تفاوت چندانی ندارند و این مسئله دوباره نکته گفته شده در قسمت ۴ را تأیید می‌نماید.

**تشکر و قدردانی:** نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

**تأییدیه اخلاقی:** محتویات علمی مقاله حاصل پژوهش نویسندگان و صحت نتایج آن نیز بر عهده آن‌ها است.

**تعارض منافع:** این مقاله هیچ‌گونه تعارض منافی با سازمان‌ها و اشخاص ندارد.

**سهم نویسندگان:** مرتضی عیوض خانی (نویسنده اول): پژوهشگر کمکی، نگارنده مقدمه (۳۵٪)، توحید میرزابابایی مستوفی (نویسنده دوم): پژوهشگر اصلی، روش شناس، تحلیلگر آماری، نگارنده بحث (۵۵٪)، هاشم بابایی (نویسنده سوم): پژوهشگر کمکی (۱۰٪)

**منابع مالی:** کلیه هزینه‌ها توسط نویسندگان تأمین شده است.

### منابع

1- Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Armoudli E. On dimensionless numbers for the dynamic plastic response of quadrangular mild steel plates subjected to localized and uniform impulsive loading. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2017;231(5):939-50.

2- Rezasefat M, Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Ziya-Shamami M, Alitavoli M. Dynamic plastic response of double-layered circular metallic plates due to localized impulsive loading. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2019;233(7):1449-71.

3- Mostofi TM, Sayah-Badkhor M, Rezasefat M, Ozbakkaloglu T, Babaei H. Gas mixture detonation load on polyurea-coated aluminum plates. *Thin-Walled Structures*. 2020;155:106851.

4- Rezasefat M, Mostofi TM, Ozbakkaloglu T. Repeated localized impulsive loading on monolithic and multi-layered metallic plates. *Thin-Walled Structures*. 2019;144:106332.

5- Babaei H, Mostofi TM, Alitavoli M, Namdari M. Experimental investigation and a model presentation for predicting the behavior of metal and alumina powder compaction under impact loading. *Journal of Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(5):357-66.

6- Alitavoli M, Babaei H, Mahmoudi A, Golbaf A, Mostofi TM. Experimental and Analytical Study of Effective Factors on Compaction Process of Aluminium Powder under the Impact Load by Low Speed. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(7).

7- Goldsmith W, Sackman JL. An experimental study of energy absorption in impact on sandwich plates. *International Journal of Impact Engineering*. 1992;12(2):241-62.

8- Olsson R, McManus HL. Improved theory for contact indentation of sandwich panels. *AIAA journal*. 1996;34(6):1238-44.

9- Mines RA, Worrall CM, Gibson AG. Low velocity perforation behaviour of polymer composite