



# Numerical and Experimental Investigation of Deformation of Circular Sandwich Plates with Vertical Metal Tube Core Under Free Blast Load

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Farmani S.A,<sup>1</sup>  
Alitavoli A<sup>1</sup>,  
Babaei H<sup>1\*</sup>,  
Haghgoo M<sup>1</sup>,

### How to cite this article

Farmani S.A, Alitavoli A, Babaei H, Haghgoo M. Numerical and experimental investigation of deformation of circular sandwich plates with vertical metal tube core under free blast load. Modares Mechanical Engineering; 2023;23(12):673-683.

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

### \*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

ghbabaei@guilan.ac.ir

### Article History

Received: June 13, 2023  
Accepted: January 16, 2024  
ePublished: March 9, 2024

## ABSTRACT

In this research, the deformation of circular metal sandwich panels with vertical tube cores under blast load has been investigated numerically and experimentally. The relationship of energy balance in different components of the structure has been considered. The core tubes are installed in a cross arrangement and vertically with the same height between the upper and lower sheets of the sandwich structure. The amount of energy absorbed by the cores is determined according to their location in the structure and the effect of their number and diameter. The grouping of the desired tests for this research has been done according to the thickness of the sheet 1.2 and 2 mm and with aluminum cores with diameters of 12 and 16 (mm). Numerical simulation has been done in the form of free explosion and by defining the pressure function using the Conwep method in Abaqus software. To validate the numerical results, experimental tests have been carried out with the construction of sandwich structure. In both methods, the maximum lateral displacement of the structure at its center and the displacement in terms of distance from the center of the structure, at cores location have been measured. Increased number of tubes in the core of the structure decreased the maximum rise in the upper layer and decreased the transverse displacement of the lower sheet. Structures with fewer cores and less sheet thickness showed more energy absorption. The average difference between the results of numerical and experimental methods was approximately 11%.

**Keywords** Circular Sandwich Plate, Vertical Tubular Core, Free Explosion, Large Deformation, Energy Balance

## CITATION LINKS

1- Metal foams: a design guide. 2- Numerical investigation of the response ... 3- Blast resistance and parametric ... 4- Numerical Investigations on Blast Protection System ... 5- Dynamic response of circular metal sandwich ... 6- Optimum Selection of Corrugated Sandwich Panels Shape and ... 7- Efficient modelling of blast loaded ... 8- The deformation and tearing of thin circular plates subjected to impulsive loads. 9- The influence of gas mixture detonation ... 10- Experimental and theoretical study on large ductile transverse ... 11- Blast Response Studies on Metallic Tube Core Sandwich Panels. SSRG 12- Investigation into the response of fully clamped ... 13- Experimental and numerical investigation of the ... 14- The Influence of Uniform and ... 15- Blast response of cladding sandwich panels with ... 16- Blast resistance of metallic tube-core ... 17- Deflection analysis of clamped square ... 18- Dynamic responses of ultralight all-metallic ... 19- Damage assessment of marine grade ... 20- A Constitutive Model and Data for Metals Subject to ... 21- A Constitutive Model and Data for Metals Subject to Large ... 22- Fracture characteristics of three metals subjected to various ... 23- Evaluation of Temperature Effects on Forming ... 24- Airblast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical ... 25- BLAST LOADING ON STRUCTURES FROM THE EXPLOSIONS ... 26- Abaqus 6.9 Documentation, Dassault Systèmes Simulia Corp, Providence, RI, USA. 27- Repeated localized impulsive loading on monolithic ... 28- Blast Loading and Evaluation of Nonlinear ... 29- Analytical modelling of metallic circular plates subjected to impulsive loads.

## بررسی عددی و تجربی تغییر شکل صفحات ساندویچی مدور با هسته لوله عمودی فلزی تحت بار انفجار آزاد

سید محمود فرمانی<sup>۱</sup>، مجید علی طاولی<sup>۱</sup>، هاشم بابایی<sup>۱\*</sup>، مجتبی حقگو<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

### چکیده

در این تحقیق، تغییر شکل ساندویچ پانل‌های فلزی دایروی با هسته لوله عمودی تحت بار انفجار به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. رابطه توازن انرژی در اجزاء مختلف سازه دیده شده است. لوله‌های هسته با چیدمان متقاطع و به صورت عمودی با ارتفاع یکسان بین ورق‌های فوقانی و تحتانی سازه ساندویچی تعبیه شده‌اند. میزان انرژی جذب شده توسط هسته‌ها بر حسب موقعیت قرارگیری در سازه، تعداد، و قطرشان تعیین شده است. گروه‌بندی آزمایش‌ها برای انجام این تحقیق بر حسب ضخامت ورق ۱/۲ و ۲ میلی‌متر و با هسته‌های آلومینیومی به قطرهای ۱۲ و ۱۶ میلی‌متر صورت گرفته است. شبیه‌سازی عددی به صورت انفجار آزاد و با تعریف تابع فشار به روش کانوپ در نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. به منظور صحت‌سنجی نتایج عددی، آزمایش تجربی با ساخت سازه ساندویچی انجام شده است. در هر دو روش، حداکثر جابجایی عرضی سازه در مرکز آن و جابجایی بر حسب فاصله از مرکز سازه، در محل‌های قرارگیری هسته‌ها اندازه‌گیری شده است. افزایش تعداد لوله‌های هسته سازه، حداکثر خیز در روبه فوقانی را کاهش داد و جابجایی عرضی ورق تحتانی را کمتر کرد. سازه‌هایی با تعداد هسته و ضخامت ورق کمتر، جذب انرژی بیشتری از خود نشان دادند. میانگین اختلاف بین نتایج روش‌های عددی و تجربی تقریباً ۱۱ درصد بود.

**کلیدواژه‌ها:** ورق ساندویچ دایروی، هسته لوله‌ای عمودی، انفجار آزاد، تغییرشکل بزرگ، توازن انرژی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۶

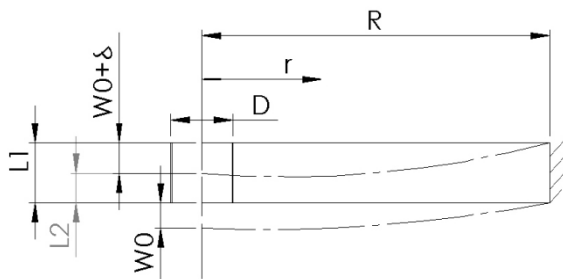
\* نویسنده مسئول: ghhbabei@guilan.ac.ir

### ۱- مقدمه

از سازه‌های ساندویچی برای جذب انرژی‌های زیاد (ضربه) و به عنوان حائل در برابر موج انفجاری استفاده می‌شود. این سازه‌ها بعنوان جاذب انرژی باید بیشترین تغییر شکل یا کرنش را از خود نشان دهند<sup>[۱]</sup>. در زمینه جذب انرژی و خیز (جابجایی عرضی) در سازه ساندویچی با هسته لوله استوانه‌ای عمودی و با مقطع دایروی مطالعات مختصری انجام شده است. بررسی‌های صورت گرفته اغلب بر سازه‌های ساندویچی با هسته مقطع مربعی شکل، ورق چهارگوش و با تعداد هسته‌های مختلف به روش تجربی، عددی یا ترکیبی از این دو روش بوده است. پارامترهایی نظیر تعداد هسته‌ها، ضخامت هسته، نسبت ابعادی آنها (ارتفاع به مقطع هسته) و همچنین ضخامت ورق‌های سازه ساندویچی بعنوان متغیرهای اصلی تعریف شده‌اند. میزان جذب انرژی و جابجایی

عرضی نقطه میانی سازه در این تحقیق‌ها مورد بررسی قرار گرفته است<sup>[۲-۴]</sup>. قمری‌زاده و همکاران به روش عددی و تحلیلی مبتنی بر انرژی کرنشی و کار پلاستیک انجام شده توسط اجزای مختلف سازه، پاسخ سازه ساندویچی دارای هسته لوله‌ای شعاعی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها معادلات حاکم بر تعادل در انرژی سازه برحسب خیز بیشینه ورق تحتانی سازه ساندویچی را به دست آوردند<sup>[۵]</sup>. شهابیان و همکاران به بررسی تاثیر شکل هسته موجدار سازه ساندویچی و نوع مصالح بکار رفته در آن پرداختند. آن‌ها رفتار پانل‌های ساندویچی از جنس آلومینیوم و فولاد را در برابر بارهای انفجاری مورد بررسی قرار دادند. در فرآیند تحلیل، چهار نوع ورق موجدار مستطیلی، دوزنقه‌ای، مثلثی و بیضوی برای هسته پانل‌ها در نظر گرفته شد<sup>[۶]</sup>. مطالعاتی نیز توسط آلسون در زمینه مدل سازی برای صفحات تقویت شده و سازه‌های پوسته استوانه‌ای، و نیوریک در زمینه تغییر شکل پلاستیک ورق‌های دایروی تحت بار انفجار و بررسی حالت‌های واماندگی در آنها انجام شده است<sup>[۷-۸]</sup>. رفتار دینامیکی ورق مستطیلی تحت بار یکنواخت و موضعی حاصل از انفجار، توسط مستوفی و همکاران بررسی شده است<sup>[۹-۱۰]</sup>. راجا و همکاران، ساندویچ پانل با ورق‌های فوقانی و تحتانی و یک هسته فلزی مربع شکل طراحی کرده‌اند. مولفه‌های مورد مطالعه، تغییر ضخامت هسته (با مقطع مربعی) و فاصله بین آنها بود. آن‌ها کارایی ورق‌های ساندویچی از نظر نیروی عکس‌العمل در واحد سطح و انرژی جذب شده توسط ورق فوقانی و بخش هسته را بررسی کردند<sup>[۱۱]</sup>. بابایی و همکاران اثر ضخامت ورق، فاصله قرارگیری ماده منفجره، خواص مواد بر میزان تغییر شکل، جابجایی عرضی نقطه میانی ورق و توزیع کرنش روی ورق‌های فولادی و آلومینیومی را بررسی کردند<sup>[۱۲]</sup>. تئوبالد و همکاران ضمن بررسی پاسخ ورق‌های ساندویچی با هسته‌های مقطع مربع عمودی در برابر بار انفجار به روش عددی، اثر مقدار ماده منفجره، نوع ماده و تعداد لوله‌های هسته فلزی را دیدند و مقایسه‌ای بر میزان له‌شدگی هسته‌ها با توجه به تعداد آنها انجام دادند<sup>[۱۳]</sup>. گودرزی و همکاران به بررسی تجربی و عددی بیشینه جابجایی عرضی ورق‌های دایروی آلومینیومی در برابر انفجار در هوا پرداختند. هدف از طراحی و اجرای آزمایش‌ها در تحقیق آنها، بررسی تأثیر نحوه برخورد موج انفجار بر میزان تغییر شکل و استخراج دو مدل نیمه تجربی برای پیش‌بینی حداکثر جابجایی عرضی نقطه میانی ورق دایروی در دو حالت موج شوک یکنواخت و غیر یکنواخت بوده است<sup>[۱۳]</sup>. سیاح بادخور و همکاران به روش تجربی و تحلیل بسرفت (Regression) و با استفاده از روش روبه پاسخ، اثر بارگذاری انفجاری یکنواخت و موضعی روی ورق‌های تک لایه دایروی را مورد بررسی قرار دادند. در مطالعه آنها اثر شعاع و ضخامت ورق، شدت بار وارده، خواص مکانیکی ورق، شعاع بارگذاری و فاصله استقرار بر جابجایی عرضی ورق‌های دایره‌ای شکل به صورت همزمان بررسی گردید<sup>[۱۴]</sup>. یوون و همکاران پاسخ

تغییر شکل، استوانه‌ای و عمودی هستند. جهت  $z$  به طرف بالا و عمود بر سطح ورق است.



شکل ۱) طرح واره سازه قبل و بعد از تغییر شکل

در این مسئله تعداد هسته‌ها برای هر آزمایش، ۵ و ۹ لوله با ارتفاع یکسان و با قطرهای متفاوت در نظر گرفته می‌شود که در مرکز سازه، شعاع ۵۵ میلی‌متری از مرکز و بیشترین شعاع ورق سازه (مماس با تکیه‌گاه گیردار) نصب می‌شوند. با توجه به فاصله محل قرارگیری مواد منفجره و اندازه شعاع ورق ساندویچی، مسئله به صورت یکنواخت تعریف می‌شود. پس از بارگذاری انفجاری، ورق فوقانی دارای خیز  $W_0 + \delta$  و ورق تحتانی دارای خیز  $W_0$  در مرکز سازه است. لوله‌های هسته مطابق شکل ۱ به اندازه  $\delta$  دچار له‌شدگی می‌شوند. نکته قابل توجه کوچک بودن سایر جابجایی‌ها نسبت به جابجایی‌های عرضی در راستای ضخامت است. به همین دلیل در این تحقیق از بررسی کرنش ضخامت ورق ساندویچ پانل صرف نظر شده است. در بررسی عددی، میزان جابجایی عرضی سازه و مقادیر انرژی بتفکیک انرژی‌های کرنشی، جنبشی و کار پلاستیک در فرآیند تغییر شکل در نظر گرفته می‌شود. کار پلاستیک هسته‌ها، شامل کار پلاستیک ناشی از خم شدن لوله‌های اطراف تکیه‌گاه گیردار و کار پلاستیک ناشی از له‌شدگی هسته‌های لوله‌ای در مرکز و میانه سازه است. در این تحقیق ۵ گروه از نمونه‌ها با توجه به ضخامت ورق‌های فوقانی و تحتانی سازه و تعداد لوله‌های هسته با قطرهای خارجی ۱۲ و ۱۶ میلی‌متر مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شده است. در هر گروه، ضخامت ورق‌های فوقانی و تحتانی ثابت هستند اما تعداد هسته‌ها ۹ و ۵ عدد در نظر گرفته شده‌اند تا اثر تعداد هسته‌ها در میزان جذب انرژی تعیین شود. نسبت طول به قطر هسته‌های آلومینیومی تقریباً ۲ به ۱ در جدول ۱ در نظر گرفته شده است.

### ۳- شبیه سازی عددی

از نرم‌افزار شبیه‌سازی آباکوس برای بررسی عددی استفاده می‌شود. ابتدا، مدل هندسی سازه ساندویچی در محیط نرم افزار ایجاد می‌شود. سپس جنس و مشخصات مکانیکی اجزاء بکار رفته در سازه تعریف می‌شوند. در ادامه، شرایط مرزی گیردار برای ورق‌های فوقانی و تحتانی سازه و همچنین رینگ واسط (فاصله‌انداز) تعریف شده و سپس با تعریف فرآیند انفجار بصورت آزاد، بارگذاری انفجاری اعمال می‌شود.

ورق‌های ساندویچی با هسته لوله آلومینیومی و فولادی در برابر انفجار را به روش تجربی بررسی کردند. لوله‌های هسته در این بررسی، با فوم پرکننده پلی اورتان و بدون فوم تهیه شده و با چیدمان مختلف در ۴ نوع سازه مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد ورق‌های ساندویچی با هسته لوله‌ای پر شده، نسبت به هسته‌های بدون مواد پرکننده ذکر شده فوق عملکرد بهتری دارند [15].

ژیا و همکاران به مطالعه مقاومت در برابر انفجار سازه ساندویچی لوله-هسته فلزی با در نظرگیری مراحل سه گانه فرآیند انفجار بصورت عددی و تجربی پرداختند. آن‌ها یک سازه ساندویچی با هسته لوله‌ای افقی به عنوان پانل ضد انفجار در دیوارهای مقاوم در برابر انفجار طراحی کردند و آزمایش‌های خمشی سه نقطه‌ای استاتیک، آزمایش‌های انفجار نزدیک و آزمایش‌های انفجار تماسی برای تعیین استحکام در برابر انفجار انجام دادند. آنها نشان دادند که در انفجار تماسی، پانل، موج ضربه را از طریق له کردن لوله و پاره شدن ورق کاهش داد [16]. ژو و همکاران یک معیار تسلیم جدید برای هسته فوم فلزی سه لایه پیشنهاد دادند. آن‌ها راه‌حل تحلیلی برای حداکثر انحراف مرکزی پانل‌ها به دست آوردند. نتایج آن‌ها بر بهتر بودن هسته یکنواخت نسبت به هسته گرادیان مثبت دلالت داشت به صورتی که نسبت به هسته با گرادیان مثبت با همان جرم، مقاومت انفجار تقریباً دو برابر بود [17]. لی و همکاران یک رویکرد تجربی و عددی برای بررسی پاسخ دینامیکی پانل ساندویچی کاملاً گیردار تحت بارگذاری انفجاری کاملاً مقید انجام دادند. آن‌ها برای یافتن مکانیسم‌های فیزیکی زیربنایی، شبیه‌سازی المان محدود با رویکرد اویلری-لاگرانژی جفت شده انجام دادند. نتایج شبیه‌سازی شان بر تغییر منحنی فشار-زمان با یک فاز شبه استاتیک طولانی مدت با دامنه فشار بسیار کم دلالت داشت [18]. در پژوهش‌های پیشین، اغلب بر میزان جابجایی ایجاد شده در ورق‌ها، تغییر شکل هسته‌های مقطع مربعی سازه ساندویچی و یا هسته‌های لوله افقی پرداخته شده بود. در تحقیق حاضر میزان انرژی جذب شده در اثر خمش و لهیدگی در هسته‌های لوله آلومینیومی عمودی با مقطع دایروی بسته به موقعیت قرارگیری و تعداد آنها در سازه ساندویچی پرداخته شده و با کار پلاستیک ورق‌های فوقانی و تحتانی مقایسه شده است.

### ۲- تعریف مساله

برای این مسئله، مقطع سازه شامل ورق‌های فولادی و هسته‌های آلومینیومی، قبل و بعد از تغییر شکل به صورت طرح-واره در شکل ۱ نشان داده شده است. که در آن ورق دایروی سازه دارای شعاعی برابر با  $R$ ، طول اولیه هسته‌های لوله‌ای  $L1$  و قطر خارجی لوله برابر با  $D$  است. ورق‌های فوقانی و تحتانی سازه پس از تغییر شکل به صورت خط-چین نشان داده شده است. هسته‌های سازه قبل از

شده معادل و نرخ کرنش مرجع هستند.  $T_r$ ،  $T$  و  $T_{melt}$  بترتیب دمای مواد، دمای محیط و دمای ذوب مواد هستند. از آنجا که اثرات گرم در زمینه آزمایش‌های دینامیکی از اثرات نرخ کرنش جدا نیست، از تاثیر حرارت پیش‌بینی شده توسط بخش سوم جانسون-کوک معمولاً صرف نظر می‌شود [22].

### ۳-۲- هندسه و شرایط مرزی

مدل سه بعدی این سازه‌ها با طراحی کلیه اجزای سازه (ورق و قید و بند) در اندازه حقیقی و مونتاژ آنها در محیط نرم‌افزار ایجاد شده است. نوع تجزیه و تحلیل برای انجام شبیه‌سازی به طور صریح و دینامیکی تعیین شده است. همچنین قید بین اجزا از نوع تماس سطح به سطح در نظر گرفته شده است. شرط مرزی برای ورق‌های فوقانی و تحتانی که بین نگهدارنده‌های اجزای سازه (کلمپ‌ها) و رینگ واسط واقع شده‌اند، بصورت گیردار کامل تعریف شده است. به این منظور در بخش بارگذاری و با انتخاب گزینه جابجایی-چرخش از شرایط مرزی مکانیکی، کلیه مقادیر جابجایی در راستای محورها (U1, U2, U3) و چرخش حول محورهای مختصات (UR1, UR2, UR3) صفر در نظر گرفته شده و شرط مرزی گیردار برای لبه‌های ورق و اجزای سازه تامین شد. همچنین اجزای سازه به صورت شکل‌پذیر تعریف شده و خواص مکانیکی و ضرایب جانسون-کوک برای ورق فولادی St12 و آلومینیوم 6061 بکار رفته در سازه‌ها در نرم‌افزار در بخش خواص ماده (property) تعریف شده است [23]. خواص سایر اجزاء مانند رینگ واسط بین ورق فوقانی و تحتانی و لوله (استقرار ماده) به صورت صلب در نظر گرفته شده‌اند.

### ۳-۳- مش بندی و اعمال بار انفجاری

برای بارگذاری انفجاری از تابع فشار کانوپ (Conwep) که وابسته به زمان است استفاده شده است (رابطه ۳). که در آن  $p_i$  و  $p_r$  به ترتیب فشار منعکس شده، فشار برخورد و  $\theta$  زاویه برخورد موج می‌باشند. در روش کانوپ فشار مناسب با توجه به نوع سطح انتخاب می‌شود که حلگر آن لاگرانژی-اولری کمتر است. در این روش، زمان محاسبه نسبت به روش لاگرانژی-اولری کمتر است. ضمناً در این روش نیازی به مدل سازی هوا و مواد منفجره نیست. بنابراین از عناصر تماسی برای انتقال موج انفجار استفاده نمی‌شود [24].

$$p_{(t)} = p_r \cos^2 \theta + p_i (1 + \cos^2 - 2 \cos \theta) \quad (3)$$

مقدار ۲۰ گرم ماده منفجره C4 برای انجام شبیه‌سازی‌ها در فاصله ۱۰۰ میلیمتری از سطح ورق فوقانی سازه و با تعیین نقطه مرجع (reference point) در نظر گرفته شده است. به منظور تعیین فاصله محل انفجار تا سطح ورق، نقطه مرجع (RP) در راستای محور z مختصات و در فاصله مورد نظر از سطح ورق تعریف می‌شود. برای شبیه‌سازی ماده منفجره با استفاده از ماژول تعامل (interaction) و با انتخاب گزینه موج برخورد (incident wave)

جدول (۱) گروه بندی و مشخصات ابعادی سازه‌های ساندویچی در این تحقیق					
تعداد گروه لوله (کد ابعاد لوله هسته آزمایش)	ضخامت ورق (میلیمتر)	سطح مواجهه ورق (میلیمترمربع)	جرم هسته‌ها جرم سازه		جرم سازه (کیلوگرم)
			جرم * تعداد	تعداد	
۹(۱۱)	۱۰φ*۱۲φ*۳۰	۲	۹*۴	۱/۰۲	۱
۵(۱۲)	۱۰φ*۱۲φ*۳۰	۳۱۴۰۰	۵*۴	۱/۰۰۴	۱
۹(۲۱)	۱۰φ*۱۲φ*۳۰	۳۱۴۰۰	۹*۴	۰/۶۲۷۴	۲
۵(۲۲)	۱۰φ*۱۲φ*۳۰	۳۱۴۰۰	۵*۴	۰/۶۱۱۴	۲
۹(۳۱)	۱۴φ*۱۶φ*۳۰	۳۱۴۰۰	۹*۵	۱/۰۳۱	۳
۵(۳۲)	۱۴φ*۱۶φ*۳۰	۳۱۴۰۰	۵*۵	۱/۰۰۹	۳
۹(۴۱)	۱۴φ*۱۶φ*۳۰	۳۱۴۰۰	۹*۵	۰/۶۳۶۴	۴
۵(۴۲)	۱۴φ*۱۶φ*۳۰	۳۱۴۰۰	۵*۵	۰/۶۱۶۴	۴
۵(۵۱)	-	۳۱۴۰۰	-	۱	۵

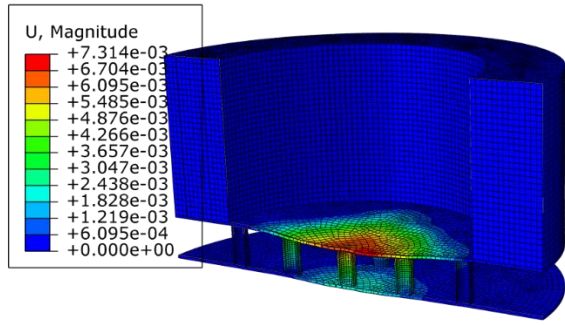
### ۳-۱- مدل مادی و معیار شکست

اثر مشخصه‌های مکانیکی و حرارتی مواد بر پاسخ سازه در برابر بارگذاری انفجاری، با مدل مادی بیان می‌شود. مدل مواد برای تعریف متغیرهای جریان یک ماده با مرتبط کردن تنش به تغییر شکل و انرژی داخلی بنا شده است. برای مدل‌سازی رفتار پلاستیکی مواد، یک مدل استحکام تعریف می‌شود. مدل استحکام جانسون-کوک نشان دهنده تغییر جریان تنش با شرایط کرنش، نرخ کرنش و دما برای بسیاری از مواد نرم است. این مدل برای موادی که تحت تاثیر کرنش‌های بزرگ، نرخ کرنش‌های زیاد و دمای بالا قرار می‌گیرند معتبر است [19-20]. در تحقیق حاضر از مدل الاستو-ویسکو-پلاستیک و شکست جانسون-کوک برای شبیه‌سازی استفاده شده است. در این مدل، اثرات نرخ کرنش و تغییرات دما بر تنش تسلیم در نظر گرفته شده است. این مدل شامل اثر تنش تسلیم، جریان پلاستیک، سخت شدن نرخ کرنش، ترموالاستیسیته خطی و نرم شدن ناشی از گرمایش آدیاباتیک است. بیان ریاضی این مدل بصورت رابطه‌های (۱) و (۲) است [21].

$$\bar{\sigma} = [\sigma_0 + B \dot{\epsilon}_p^n] \left[ 1 + C \log \left( \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] [-\hat{\theta}^m] \quad (1)$$

$$\hat{\theta}^m = \frac{T - T_r}{T_{melt} - T_r} \quad (2)$$

در رابطه (۱)،  $\sigma_0$  و  $\bar{\sigma}$  تنش تسلیم در کرنش‌های کوچک و بزرگ هستند.  $B$ ،  $C$ ،  $n$  و  $m$  پارامترهای وابسته مواد هستند که به صورت تجربی تعیین می‌شوند.  $n$  ضریب سخت شوندهگی کرنش،  $C$  ثابت نرخ کرنش و  $m$  ضریب حرارت هستند.  $\sigma_0$  استحکام تسلیم ماده، همراه با پارامترهای  $B$  و  $n$  از آزمایش‌های کششی شبه استاتیکی تعیین می‌شود.  $C$  پارامتر نرخ کرنش با آزمایش‌های کششی دینامیکی و در نرخ‌های کرنش متفاوت محاسبه می‌شود.  $\dot{\epsilon}_p$ ،  $\dot{\epsilon}_0$  و  $\hat{\theta}$  به ترتیب کرنش پلاستیک معادل، نرخ کرنش پلاستیک نرمال



شکل ۳) جابجایی عرضی سازه در آزمایش (۱۱)

### ۳-۴- نمودار توازن انرژی

ظرفیت جذب انرژی در برآورد مقاومت در برابر انفجار برای سازه‌های تحت بارگذاری دینامیکی حائز اهمیت است. در این بررسی، تعادل انرژی برای کل مدل شبیه‌سازی شده، با روابط (۴) و (۵)، با استفاده از مجموع مقادیر انرژی محاسبه شده توسط نرم افزار آباکوس ارائه شده است [27].

$$E_{total} = IE_{ALL} + KE_{ALL} + VD_{ALL} + FD_{ALL} - PW_{ALL} - WK_{ALL} = constant \quad (4)$$

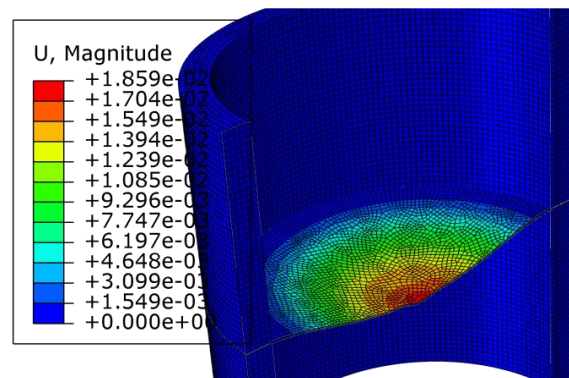
$$IE_{ALL} = SE_{ALL} + PD_{ALL} + AE_{ALL} \quad (5)$$

در روابط فوق، کل انرژی داخلی ( $IE_{ALL}$ )، انرژی جنبشی ( $KE_{ALL}$ )، انرژی مصرفی ویسکوز ( $VD_{ALL}$ )، انرژی اتلاف توسط اصطکاک ( $FD_{ALL}$ )، کار برخورد ( $PW_{ALL}$ ) و کاری که توسط بارهای خارجی به سیستم اعمال شده ( $WK_{ALL}$ ) تعریف می‌شوند. انرژی داخلی از سه نوع مختلف انرژی تشکیل شده است: انرژی کرنشی ( $SE_{ALL}$ )، انرژی مصرفی پلاستیک ( $PD_{ALL}$ ) و انرژی کرنشی مجازی ( $AE_{ALL}$ ). در شکل ۴، نمودار انرژی جنبشی حاصل از انفجار، کار پلاستیک انجام شده توسط نیروهای خارجی و سایر انرژی‌های فرآیند حاصل از شبیه‌سازی عددی توسط نرم افزار استخراج شده است. در طول تجزیه و تحلیل عددی، انرژی کل تقریباً ثابت می‌ماند. در حالی که انرژی کرنشی و همچنین انرژی جنبشی ابتدا افزایش می‌یابند، سپس در مراحل اولیه به حداکثر مقدار رسیده و در ادامه کاهش می‌یابند. در مقابل این روند، کل انرژی داخلی، انرژی اتلاف ویسکوز، انرژی اتلاف اصطکاک و انرژی کرنشی مجازی افزایش می‌یابند ولی انرژی جنبشی و کار پلاستیک در کار حاضر در مدت زمان  $0.7/0$  میلی ثانیه به حداکثر مقادیر خود می‌رسند. انرژی کرنشی مجازی در شبیه‌سازی عددی، انرژی مرتبط با زمان است که از اعوجاج بیش از حد شبکه‌ها جلوگیری می‌کند و مطابق شکل، انرژی کرنشی مجازی به طور قابل توجهی از کل انرژی داخلی کمتر است.

نوع انفجار بصورت آزاد (air blast) تعریف شده است. مطابق با [25] میزان ماده منفجره در بخش خرج انفجاری (conwep charge) با جرمی معادل با TNT (۲۰ گرم C4) و ضریب انفجار  $1/34$  مقداردهی می‌شود.

در این مطالعه، المان مورد نظر برای مش بندی اجزاء C3D8R از خانواده المانهای (continuum) با ۳ درجه آزادی (3D)، المان مکعبی با تعداد گره ۸ عدد، با فرمول بندی کاهش یافته (reduced) انتخاب شده است که به صورت همگن بوده و از پرکاربردترین المان‌های مورد استفاده در آباکوس است. این المان یک المان سه بعدی مکعبی شکل است که از روش انتگرال کاهش یافته برای حل آن استفاده می‌شود و هر گره دارای سه درجه آزادی در جهت محورهای مختصات کارتزین است [26]. در این شبیه‌سازی‌ها مش بندی با اندازه  $0.004/0$  متر و با ضریب انحراف  $0.1/0$  بصورت آزاد در نظر گرفته می‌شود و ضریب اصطکاک بین ورق و هسته لوله‌ای  $0.1/0$  است. همچنین بهترین اندازه مش به منظور رسیدن به نتایج تحلیل دقیق‌تر برای ورق و دیگر اجزا انجام گرفت. با استفاده از امکانات نرم افزار (verify mesh)، میزان و تعداد مش مورد بازبینی واقع شده و شاخص‌های متریک و اندازه روی ورق از نظر منظم بودن و زاویه بررسی شده است.

در شکل ۲، شبیه‌سازی ورق با ضخامت ۲ میلی‌متر بدون هسته آلومینیومی در برابر انفجار آزاد به عنوان مبنای مقایسه برای مقادیر خیز میانی در ورق‌های فوقانی و تعیین میزان جذب انرژی توسط هسته‌ها در سایر سازه‌های ساندویچی انجام شده است. بیشینه جابجایی عرضی ورق در این شبیه‌سازی  $18/59$  میلی‌متر می‌باشد که کمتر از ارتفاع رینگ فاصله‌انداز (۳۰ میلی‌متر) است.



شکل ۲) جابجایی عرضی سازه در آزمایش (۵۱)، سازه بدون هسته

شکل ۳ نشان‌دهنده جابجایی ورق‌های فوقانی و تحتانی در سازه ساندویچی با هسته لوله عمودی در امتداد محور z است که بر جابجایی حداکثری در مرکز ورق فوقانی تاکید دارد.

بالایی ورق تحتانی و با تطبیق سوراخ‌های محیطی نصب می‌شود. لوله‌های آلومینیومی با چیدمان متقاطع (×) به طوری که یک عدد در مرکز با شماره ۱۱، ۴ عدد در شعاع ۵۵ میلیمتری از مرکز با شماره‌های ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۴ عدد لوله دیگر در شعاع ۹۴ و ۹۲ میلیمتری از مرکز و با شماره‌های ۱۶، ۱۷، ۱۸ و ۱۹ داخل اسفنج قرار داده شده است. در ادامه ورق فوقانی سازه بر سطح مقطع لوله‌ها و رینگ فاصله انداز قرار گرفته و کلمپ فوقانی نیز بر روی آن نصب می‌شود و پیچ‌های نگهدارنده سازه پس از عبور از کلمپ فوقانی، ورق‌ها، رینگ و کلمپ تحتانی مطابق شکل ۵ محکم بسته می‌شوند. ماده منفجره بوسيله فوم و در فاصله‌ای به اندازه شعاع سازه از سطح ورق فوقانی قرار داده شده و چاشنی انفجاری روی آن نصب می‌شود و موج ناشی از انفجار به سطح بالای ورق فوقانی سازه برخورد می‌کند. برای محاسبه مقدار ایمپالس از رابطه تجربی (۶) که به رابطه کول (cole) معروف است استفاده شده که در آن ایمپالس حاصل از انفجار  $I$  بر حسب پاسکال-ثانیه،  $w$  میزان معادل ماده منفجره C4 (نسبت به تی ان تی) بر حسب کیلوگرم و  $s$  فاصله از ماده منفجره بر حسب متر تعریف شده است [28].

$$I = (5760)w^{\frac{1}{3}}\left(\frac{w^{\frac{1}{3}}}{s}\right)^{0.891} \quad (6)$$

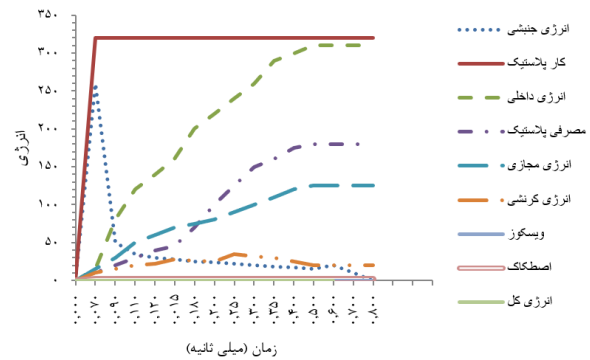
برای محاسبه انرژی تغییر شکل از رابطه وستین-بیکر (Westine-Baker) استفاده شده است که میزان انرژی حاصل از انفجار را برابر میزان انرژی تغییر شکل قرار می‌دهد. مطابق این روش میزان انرژی تغییر شکل بر حسب جابجایی عرضی سازه  $w_0$ ، تنش تسلیم  $\sigma_0$  و ضخامت ورق  $h$  از رابطه (۷) بدست می‌آید.

$$E_{def} = \frac{\pi^2 h^2 \sigma_0 w_0}{4} + \frac{1}{16}(\pi^3 h \sigma_0 w_0^2) \quad (7)$$

همچنین بر طبق اصل پایداری، نرخ تغییرات انرژی، در حین تغییر شکل ورق، همواره معادل رابطه (۸) است.

$$\dot{W}_e(t) = \dot{E}_c(t) + \dot{W}_p(t) \quad (8)$$

که  $\dot{W}_e$  نرخ کار خارجی انجام شده توسط فشار حاصل از انفجار در لحظه  $t$ ،  $\dot{E}_c$  نرخ تغییرات انرژی جنبشی در لحظه  $t$  و  $\dot{W}_p$  نرخ کار ناشی از تغییر شکل پلاستیک (انرژی کرنشی پلاستیک) می‌باشد [29]. شکل ۶ روش اندازه‌گیری بیشینه جابجایی در ورق‌های برش‌خورده سازه را با مهارکردن دو سمت ناحیه تغییر شکل یافته نشان می‌دهد. در شکل (۷) ورق‌های فوقانی و تحتانی مربوط به آزمایش‌های تجربی انجام شده در دو ستون و متناظر با هم نشان داده شده است. اثر فرورفتگی هسته‌ها روی ورق‌های تحتانی (در سمت چپ تصویر) و برآمدگی روی ورق فوقانی (در سمت راست تصویر) مشاهده می‌شود.



شکل ۴) نمودار توازن انرژی در شبیه سازی عددی برای آزمایش (۱۱)

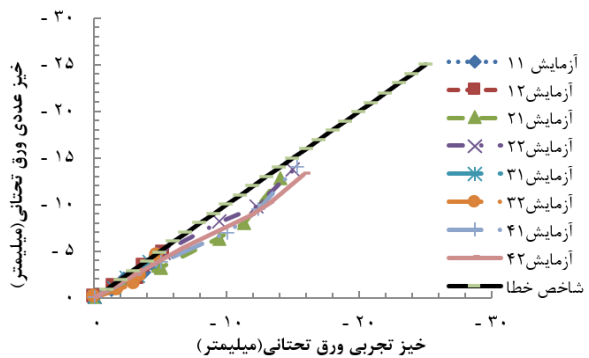
#### ۴- بررسی تجربی و اعتبار سنجی شبیه‌سازی‌ها

در این مرحله آزمایش‌های تجربی برای ورق فولادی بدون هسته لوله آلومینیومی و سازه ساندویچی شامل ورق‌های فوقانی و تحتانی با ضخامت ورق ۲ میلیمتر و هسته‌های لوله آلومینیومی (مطابق با جدول ۱) انجام شده است. برای انجام آزمایش‌های تجربی، دو گیره (کلمپ) فولادی ساخته شده از فولاد St37 به ابعاد  $350 \times 350$  میلیمتر با ضخامت ۲۵ میلیمتر دارای یک سوراخ با قطر داخلی ۲۰۰ میلیمتر که در مرکز آن تعبیه شده، ساخته شده و از آنها برای نگه‌داشتن ورق‌ها و اتصال به پایه نگهدارنده استفاده شده است. تعداد ۸ عدد سوراخ به قطر ۱۶ میلیمتر در قطر ۲۷۰ میلیمتر روی کلمپ‌های فولادی به منظور بستن ورق‌های ساندویچی تعبیه شده است. یک رینگ واسط با قطر داخلی ۲۰۰ میلیمتر و قطر خارجی ۳۰۰ میلیمتر با ضخامت ۳۰ میلیمتر به منظور جلوگیری از له‌شدن هسته‌های لوله‌ای هنگام سفت‌کردن پیچ‌ها و همچنین حفظ فاصله (۳۰ میلیمتر) بین ورق‌ها و ایجاد شرایط گیردار بین اجزاء استفاده می‌شود.



شکل ۵) نمونه در حال آماده سازی در اتاق انفجار گیره پایینی توسط ۴ پیچ بر روی پایه تکیه‌گاه نصب می‌شود. سپس ورق تحتانی با تطبیق سوراخ‌های اطراف بر روی کلمپ تحتانی قرار می‌گیرد. در مرحله بعد، رینگ دایره‌ای واسط در سطح

جدول ۲) مقادیر بیشینه جابجایی عرضی در سازه به روش عددی- تجربی و تغییر طول هسته ها									
کد گروه آزمایش	جابجایی عرضی سازه (میلیمتر)				خطا(خیز ورق تحتانی)%	طول ثانویه هسته ها(میلیمتر)			
	جابجایی ورق تحتانی	جابجایی ورق فوقانی	خیز ورق	شماره هسته‌ها		۱۱	۱۲..۱۵	۱۶..۱۹	
۱	(۱۱)	۴/۹	۴/۲۸	۱۰/۲۵	۷/۳۱۴	۱۵	۲۳/۹	۲۴/۶	۲۹/۴
	(۱۲)	۵/۲۵	۴/۷۶	۱۲/۴۵	۸/۱۶	۱۱	۲۱/۳	۲۲/۲	-
۲	(۲۱)	۱۴	۱۲/۸	۲۳/۲۵	۲۱/۹	۹	۲۰	۲۱/۸	۲۸/۳
	(۲۲)	۱۵	۱۳/۶۸	۲۳/۸	۲۲/۱	۱۰	۲۱/۳	۲۲/۲	-
۳	(۳۱)	۴/۲۵	۴/۰۱	۱۲/۵	۹/۶۴	۱۱	۲۱/۵	۲۲/۸	۲۸
	(۳۲)	۴/۸	۴/۵۱	۱۲/۹	۱۰/۸۳	۶	۲۲/۴	۲۳/۹	-
۴	(۴۱)	۱۵/۲۵	۱۳/۱۷	۲۲/۶	۲۱/۰۷	۸	۲۲/۱	۲۳/۵	۲۸/۳
	(۴۲)	۱۵/۸۵	۱۴/۰۴	۲۳/۴	۲۲/۵۸	۱۷	۲۰/۵	۲۲/۳	-
۵	(۵۱)	۰	۰	۱۹/۸	۱۸/۵۹	-	-	-	-



نمودار ۱) مقایسه نتایج بررسی عددی و تجربی برای خیز ورق تحتانی

بیشترین انحراف در آزمایش (۲۱) و تا مقدار ۱۴- میلیمتر مشاهده می‌شود. انحراف آزمایش (۴۲) در جابجایی‌های عرضی بعد از ۱۴- میلیمتر بیشتر می‌شود. در تمام آزمایش‌ها مقدار خیز تجربی در ورق تحتانی سازه بیشتر از خیز عددی است و نسبت این مقدار در سازه‌های با ضخامت ورق ۱/۲ میلیمتر نسبت به سازه‌های با ضخامت ورق ۲ میلیمتر بیشتر مشاهده می‌شود.

در نمودار ۲ نیز در تمام آزمایش‌ها جابجایی عرضی ورق‌های فوقانی سازه به روش تجربی بیشتر از روش عددی می‌باشد. در تمام آزمایش‌ها مقدار انحراف جابجایی عرضی نسبت به شاخص تا خیز ۱۰- تقریباً ۱۸ درصد است. درصد خطای جابجایی عرضی در ورق‌های فوقانی در سازه‌هایی با ضخامت ۱/۲ میلیمتر به طور میانگین ۵ درصد است. مطابق با نمودار، بیشترین خطای به وجود آمده در آزمایش (۴۱) است که تا جابجایی عرضی ۱۸- بوجود آمده است و پس از آن بتدریج این انحراف کمتر شده است.



شکل ۶) بیشینه جابجایی مرکز ورق فوقانی تست (۲۲)

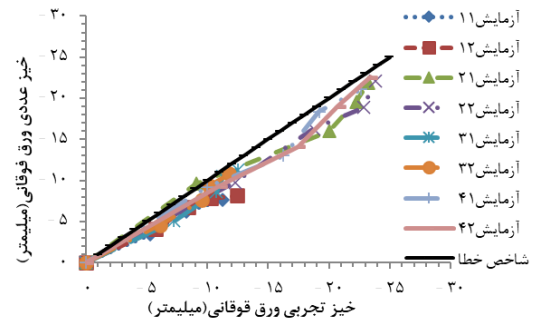
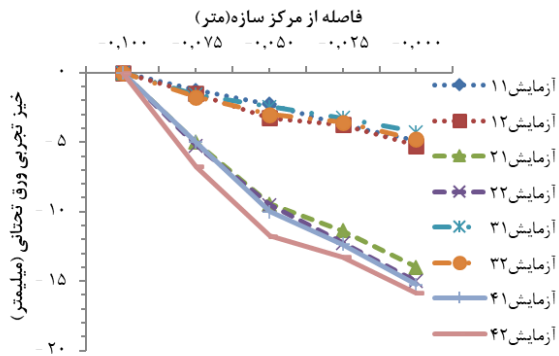


شکل ۷) ورق‌های فوقانی و تحتانی متناظر در سازه‌ها (بترتیب از راست) مربوط به آزمایش‌های تجربی انجام شده

## ۵- نتایج و بحث

در این بخش، پاسخ دینامیکی سازه‌های ساندویچی دایره‌ای با هسته لوله عمودی با روش عددی بررسی شده و با نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های تجربی مقایسه شده است. جدول ۲، بیشینه جابجایی عرضی ورق‌های فوقانی و تحتانی بر اساس نتایج عددی و تجربی در سازه‌های دارای هسته لوله آلومینیومی و سازه بدون هسته را نشان می‌دهد. بیشترین خیز در سازه‌های با ضخامت ورق یکسان، مربوط به آزمایش‌های (۲۲) و (۴۲) است. مقایسه مقادیر جابجایی عرضی در آزمون (۵۱) با گروه‌های آزمایشی (۱) و (۳) بیان می‌کند که اختلاف جابجایی عرضی در مرکز ورق فوقانی حداقل ۷/۷۶ میلیمتر است و حداکثر ۱۱/۲۶ میلیمتر است. در این مقایسه تأثیر وجود هسته‌ها و ورق تحتانی بر جابجایی عرضی سازه مشهود است. همچنین جدول ۲ داده‌های مربوط به تغییر ارتفاع در هسته‌های سازه را پس از بارگذاری به تفکیک محل قرارگیری آنها در سازه و شماره آزمایش نشان می‌دهد. مقایسه آزمایش‌های (۱۱) و (۳۱) بترتیب با قطر هسته‌های ۱۲ میلیمتری و ۱۶ میلیمتری نشان‌دهنده اختلاف ۱/۵ تا ۲/۵ میلیمتری در مقدار له‌شدگی هسته‌ها است. اثر تغییر قطر هسته‌ها در مقدار جابجایی عرضی در سازه‌های مشابه (از نظر ضخامت ورق‌ها و تعداد هسته)، بطور میانگین در ورق فوقانی ۱۰ درصد و در ورق تحتانی ۱۵ درصد است.

در نمودار ۱، مقایسه مقادیر خیز ورق تحتانی در سازه‌ها به روش تجربی و عددی نسبت به یکدیگر انجام شده است. مقدار انحراف جابجایی‌های عرضی تا مقدار ۵- میلیمتر نسبت به شاخص تقریباً ۶ درصد می‌باشد و این میزان با افزایش جابجایی عرضی در آزمایش‌هایی با ضخامت ورق ۱/۲ به تدریج افزایش می‌یابد.



نمودار ۲) مقایسه نتایج بررسی عددی و تجربی برای خیز ورق فوقانی

**نمودار ۴) خیز ورق تحتانی بر حسب فاصله از مرکز سازه به روش عددی**

مطابق با منحنی خیز ایجاد شده در ورق سازه، که در مرکز آن بیشینه و در پیرامون سازه که دارای شرایط مرزی گیردار است، کمینه می‌باشد، در هسته‌های سازه نیز تغییر طول متناظر با ورق ایجاد شده است. بطوریکه در آزمایش‌های انجام شده، هسته مرکزی با شماره (۱۱) بیشترین تغییر طول را نشان می‌دهد، و هسته‌های جانبی با شماره (۱۶، ۱۹) دارای کاهش طول کمتر از ۱ میلی‌متر اند. بنابراین در هسته‌های مرکزی شماره (۱۱) و هسته‌های میانی با شماره (۱۲، ۱۵) اثر لهدیگی مشاهده می‌شود در حالی که در قسمت بالای هسته جانبی شماره (۱۹)، خمش بوجود آمده است.

در شکل ۸ هسته‌های لوله‌ای بر حسب موقعیت قرارگیری آنها درون سازه نشان داده شده است. در دو ردیف بالا، ۹ هسته با قطر ۱۲ میلی‌متر (آزمایش‌های ۱۱ و ۱۲) و در ردیف‌های میانی هسته‌های مربوط به سازه‌های ۵ لوله‌ای به ترتیب با قطر خارجی ۱۲ و ۱۶ میلی‌متر مشاهده می‌شوند. در آزمایش‌های تجربی بیشترین تغییر شکل در اثر لهدیگی در هسته مرکزی بوجود آمده است و به همین دلیل کار پلاستیک بیشتری در این هسته نسبت به سایر هسته‌ها انجام می‌شود. همچنین تا شدن (چین خوردگی) کامل در هیچ یک از هسته‌ها رخ نداده است. میزان چین خوردگی هسته‌های لوله‌ای در بالا و پایین آنها تقریباً یکسان و متقارن است. در لوله‌های با قطر ۱۶ میلی‌متر، طول بازوی چین‌خورده بیشتر از لوله‌های با قطر ۱۲ میلی‌متر است. در قسمت‌های بالایی هسته‌های جانبی به دلیل اصطکاک بین ورق فوقانی و سطح مقطع بالای هسته‌ها، خمش قابل توجهی رخ داده است اما در قسمت‌های پایینی هسته‌ها، خمش ناچیز است. در هسته‌های جانبی که خمش در آنها بوجود آمده، تغییر طول کمتری مشاهده می‌شود.

نمودار ۵ مقادیر جابجایی عرضی در سازه‌ها را بر حسب تعداد هسته‌های لوله‌ای به روش تجربی و عددی نشان می‌دهد. بررسی نمودار ۵ برای آزمایش (۴۱) با ۹ عدد هسته لوله‌ای با قطر خارجی ۱۶ میلی‌متر و آزمایش (۴۲) با ۵ عدد هسته لوله‌ای با قطر خارجی ۱۶ میلی‌متر نشان می‌دهد، مقدار جابجایی عرضی در آزمایش (۴۲) تحت تاثیر تعداد هسته‌های لوله‌ای، ۴ درصد بیشتر است. در

در بررسی به عمل آمده به روش عددی که توسط نمودار ۳ نشان داده شده است، اختلاف بیشینه جابجایی عرضی آزمایش (۱۱) با ۹ عدد هسته آلومینیومی نسبت به آزمایش (۱۲) که تعداد هسته آن ۵ عدد است تقریباً ۰/۵ میلی‌متر است. تفاوت جابجایی عرضی در مرکز ورق تحتانی در آزمایش‌های (۳۱) و (۳۲) نیز به همین صورت است. منحنی تغییر شکل در آزمایش (۱۲) نسبت به آزمایش (۱۱) یکنواخت‌تر است. همچنین در آزمایش‌های (۱۲)، (۳۱) و (۳۲) در فاصله ۰/۲۵- از مرکز ورق، تغییر منحنی مشاهده می‌شود. با توجه به اختلاف جابجایی‌های عرضی در آزمایش‌های (۱۱) و (۱۲) در مرکز سازه و شعاع ۰/۲۵- متر از مرکز، به دلیل اختلاف سرعت حرکت ورق در مرکز ورق و نواحی میانی سطح آن، غیریکنواختی در منحنی تغییر شکل ایجاد شده است.

**نمودار ۳) خیز ورق تحتانی بر حسب فاصله از مرکز سازه به روش عددی**

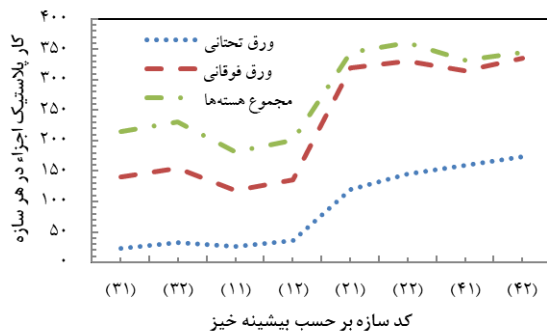
در خصوص آزمایش‌های انجام شده با ورق ضخامت ۱/۲ میلی‌متر، بیشترین خیز مربوط به آزمایش (۴۱) با ۹ عدد هسته با قطر خارجی ۱۶ میلی‌متر است که نسبت به آزمایش (۲۱) با ۹ عدد هسته با قطر خارجی ۱۲ میلی‌متر تقریباً بیش از ۲- میلی‌متر است. مقادیر تجربی در نمودار ۴ نیز نتیجه مشابهی ارائه می‌دهند. در نمودار ۴ نیز منحنی جابجایی عرضی ایجاد شده در آزمایش‌های (۴۱) و (۲۲) در مرکز سازه تا شعاع ۰/۲۵- میلی‌متر بر هم منطبق هستند. اختلاف موجود بین نتایج، به همگن بودن خواص ورق، یکنواختی ضخامت ورق، خواص لوله‌های هسته و اصطکاک موجود بین سطح مقطع هسته و ورق فولادی برمی‌گردد.



مطابق با جدول ۳ مقادیر مربوط به نمودار انرژی-زمان درمدل اجزای محدود برای هر آزمایش استخراج گردید. همچنین مقادیر کار پلاستیک به دست آمده از این شبیه‌سازی‌ها به تفکیک اجزای سازه ارائه شده است. داده‌های به دست آمده از نمودارهای انرژی-زمان نشان می‌دهد که مجموع انرژی‌های فرآیند مطابق با رابطه (۴) مقداری ثابت (تقریباً برابر با صفر) است. مقایسه بین کار انجام شده و انرژی مصرف شده در اثر کرنش پلاستیک، بیان می‌کند که مقدار زیادی از کار انجام شده حاصل از موج انفجار با کرنش‌های پلاستیکی ایجاد شده در سازه مصرف می‌شود. مقدار انرژی کرنش‌های پلاستیک، انرژی داخلی و میزان کار پلاستیک انجام شده، نشان دهنده عملکرد سازه در برابر ضربه ناشی از انفجار است.

کد آزمایش	WK				WK <sub>all</sub>	FD <sub>all</sub>	IE <sub>all</sub>	KE <sub>all</sub>	PD <sub>all</sub>	SE <sub>all</sub>	ET <sub>all</sub>	VD <sub>all</sub>
	مجموع هسته‌ها	ورق فوقانی	ورق تحتانی	AE <sub>all</sub>								
(۱۱)	۱۸۲	۲۷	۱۱۸	۱۲۵	۳۳۳	۰	۳۳۳	۲۶۵	۱۸۳	۲۷	۰	۰
(۱۲)	۳۶۳	۳۵	۱۳۵	۱۳۸	۳۵۵	۰	۳۵۵	۲۸۲	۱۷۳	۳۶	۰	۰
(۲۱)	۸۱۲	۱۲۰	۳۲۰	۲۲۳	۸۲۰	۰	۸۲۰	۶۸۲	۵۶۰	۴۱	۰	۰
(۲۲)	۸۳۵	۱۴۵	۳۳۰	۲۱۲	۸۴۰	۰	۸۴۰	۷۶۰	۵۹۰	۴۶	۰	۰
(۳۱)	۳۸۰	۲۳	۱۴۱	۱۵۱	۳۸۰	۰	۳۸۰	۳۸۳	۲۰۵	۲۵	۰	۰
(۳۲)	۳۹۸	۲۲	۱۵۴	۱۵۵	۳۹۰	۰	۳۹۰	۳۶۰	۲۰۸	۳۸	۰	۰
(۴۱)	۸۲۵	۱۶۰	۳۱۵	۲۳۰	۸۲۰	۰	۸۲۰	۷۲۰	۵۶۰	۳۸	۰	۰
(۴۲)	۸۵۰	۱۷۴	۳۳۵	۲۳۶	۸۵۰	۰	۸۵۰	۷۸۰	۵۸۵	۴۵	۰	۰
(۵۱)	۲۱۰	۰	۲۱۰	۵۰	۲۲۰	۰	۲۲۰	۱۹۵	۱۶۰	۱۰	۰	۰

مطابق میزان انرژی تغییرشکل برای سازه‌های مورد آزمایش به صورت عددی در مقایسه با مقادیر تجربی حاصل از رابطه (۷)، برای سازه‌های با ضخامت ورق ۲ میلیمتر ۷۵-۷۰ درصد و برای سازه‌های با ضخامت ورق ۱/۲ میلیمتر ۹۶-۹۰ درصد استخراج شده است. نمودار ۶ میزان کار پلاستیک هسته سازه‌های ساندویچی بر حسب بیشینه اجزای عرضی در آنها را نشان می‌دهد. بیشتر انرژی حاصل از انفجار، بترتیب توسط هسته‌های آلومینیومی، ورق فوقانی و ورق تحتانی در سازه‌ها جذب شده و بصورت کار پلاستیک در این اجزا مستهلک شده است. در آزمایش‌های انجام شده با ورق ضخامت ۱/۲ میلیمتری اختلاف کمی بین مقادیر کار پلاستیک هسته‌ها و ورق‌های فوقانی مشاهده می‌شود. میزان انرژی جذب شده توسط سازه‌های (۲۲) و (۴۲) بیشتر از دیگر سازه‌ها است.

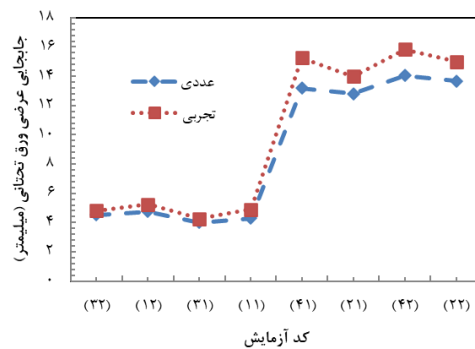


نمودار ۶) کار پلاستیک اجزا-بیشینه خیز عددی در هر سازه

آزمایش (۳۱) و (۳۲) که به ترتیب با ۹ و ۵ عدد هسته آلومینیومی انجام شده است، میزان اختلاف در جابجایی عرضی بوجود آمده در روش تجربی ۱۲ درصد و در روش عددی ۹ درصد است. مطابق با بررسی انجام شده در سازه‌های با ورق به ضخامت ۲ میلیمتر، اثر تعداد هسته‌ها در جابجایی نقطه مرکزی ورق تحتانی به روش تجربی ۴-۷ درصد و در سازه‌های با ضخامت ورق ۱/۲ میلیمتر بطور میانگین ۷ درصد است. بنابراین با توجه به یکسان بودن مقدار ماده منفجره و سایر مشخصات بکار رفته در انجام آزمایش‌ها، میزان تاثیر تعداد هسته‌ها در تغییر شکل بوجود آمده در سازه‌های یکسان (از نظر ضخامت ورق و قطر خارجی لوله‌ها) تقریباً یکسان است. با توجه به تماس سطوح ورق‌های سازه با سطح مقطع هسته‌ها و وجود اصطکاک بین آنها، کاهش تعداد هسته‌ها در سرعت حرکت ورق‌ها در بالا و پایین سازه‌ها موثر است. همچنین با افزایش قطر هسته‌های لوله‌ای میزان اصطکاک بوجود آمده بین سطوح فوق نیز بیشتر است. اثر اصطکاک در لوله‌های جانبی بصورت خمش در بالا و پایین هسته لوله‌ها مشاهده می‌شود و بنابراین درصد بسیار کمی از میزان انرژی جذب شده در این هسته‌ها از طریق لهیدگی هسته صورت می‌گیرد.



شکل ۸) تغییر شکل هسته‌های سازه پس از بارگذاری



نمودار ۵) خیز ورق تحتانی بر حسب تعداد هسته لوله‌ای در هر سازه

آلومینیومی، مقادیر له‌شدگی لوله‌های هسته در نقاط مختلف سازه‌ها نشان‌دهنده نقش کم هسته‌های بیرونی در جذب انرژی بود، درحالی‌که بیشتر انرژی انفجار از طریق هسته مرکزی و هسته‌های میانی جذب شد. همچنین مشخص شد که با افزایش تعداد لوله‌های هسته، حداکثر خیز در رویه فوقانی کاهش می‌یابد و در نتیجه اثر آن در جابجایی عرضی ورق تحتانی کمتر می‌شود. اثر افزایش قطر هسته در برآمدگی‌های ناشی از تماس هسته با ورق، به استحکام خمشی ورق و ضخامت آن وابسته بود. در حالی که، افزایش تعداد لوله‌ها میزان خیز ورق در همه سازه‌ها را کاهش داد، سازه‌هایی که تعداد هسته و ضخامت ورق کمتری داشتند، جذب انرژی بیشتری از خود نشان دادند. با توجه به مقادیر جابجایی عرضی، سازه‌های ۲۲ و ۴۲ با نسبت جرمی کمتر نسبت به دیگر سازه‌ها، بدون پدیده کرنش ضخامت در لبه گیردار و واماندگی ماده، عملکرد بهتری از نظر ظرفیت جذب انرژی نشان دادند.

**تشکر و قدردانی:** از آقای دکتر مجتبی ضیا شمامی، مدیر آزمایشگاه ضربه و انفجار دانشگاه امام حسین (ع) به جهت کمک در انجام آزمایش‌ها قدردانی می‌شود.

**تاییدیه اخلاقی:** محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان بوده و صحت نتایج آن نیز بر عهده ایشان است.

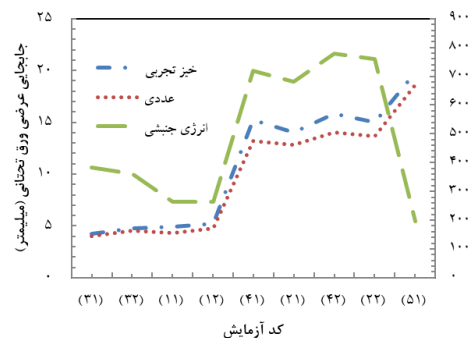
**تعارض منافع:** مقاله حاضر با هیچ شخص یا سازمانی تعارض منافع ندارد.

**منابع مالی:** تمامی منابع مالی این پژوهش توسط نویسندگان تأمین شده است.

#### منابع

- 1- Ashby MF, Evans T, Fleck NA, Hutchinson JW, Wadley HN, Gibson LJ. Metal foams: a design guide. Elsevier; 2000 Jul 30.
- 2- Theobald MD, Nurick GN. Numerical investigation of the response of sandwich-type panels using thin-walled tubes subject to blast loads. International Journal of Impact Engineering. 2007 Jan 1;34(1):134-56.
- 3- Liu J, Wang Z, Hui D. Blast resistance and parametric study of sandwich structure consisting of honeycomb core filled with circular metallic tubes. Composites Part B: Engineering. 2018 Jul 15;145:261-9.
- 4- Maheswari KU. Numerical Investigations on Blast Protection System with Metallic Tube Core Sandwich Panels.
- 5- Ghamarizadeh M, Khodarahmi H. Dynamic response of circular metal sandwich panels with tubular cores under blast load. Modares Mechanical Engineering. 2021 Oct 10;21(10):673-83.
- 6- Sabzevari S, Shahabian F. Optimum Selection of Corrugated Sandwich Panels Shape and Materials Subjected to Blast Loading. Persian, Journal of

نمودار ۷ میزان انرژی جنبشی برای مدل سازه برحسب جابجایی عرضی ورق تحتانی در آزمایش‌های عددی را نشان می‌دهد. در سازه‌هایی با ورق به ضخامت ۲ میلیمتری، سطح انرژی جنبشی در کل سازه، در محدوده ۲۶۰ تا ۳۸۰ ژول است. در حالیکه در سازه‌های (۲۱)، (۲۲)، (۳۱) و (۳۲)، سطح انرژی جنبشی در محدوده ۶۸۰ تا ۷۸۰ ژول می‌باشد. با توجه به مقدار جابجایی عرضی ۴/۵۱ میلیمتری ایجاد شده در آزمایش (۳۲) (با لوله‌های با قطر خارجی ۱۶ میلیمتر) نسبت به جابجایی عرضی ۴/۷۶ میلیمتر در آزمایش (۱۲) (با لوله‌های با قطر خارجی ۱۲ میلیمتر)، سطح انرژی جنبشی در این سازه ۳۶۰ و در سازه (۱۲)، ۲۸۲ ژول است. در این دو سازه ورق با ضخامت ۲ میلیمتر و ۹ عدد لوله بکار رفته است. اختلاف سطح انرژی در این دو نمونه مربوط به تفاوت قطر هسته‌ها و سطح تماس ورق تحتانی با مقطع هسته و همچنین میزان ماده بکار گرفته شده در هسته‌های لوله‌ای با قطر خارجی ۱۶ میلیمتر است. همچنین با مقایسه سازه (۲۱) با جابجایی ۱۲/۸ میلیمتر و سازه (۴۱) با جابجایی ۱۳/۱۷ میلیمتر، اختلاف سطح انرژی کمتری در مقایسه با اختلاف انرژی بین سازه‌های (۳۲) و (۱۲) ایجاد شده است.



نمودار ۷) خیز ورق تحتانی بر حسب انرژی جنبشی کل در هر سازه

#### ۶- نتیجه‌گیری

ضمن بررسی میزان جابجایی و جذب انرژی ناشی از موج انفجار توسط سازه ساندویچی با هسته لوله عمودی به روش عددی و تجربی، پارامترهای ضخامت ورق، تعداد و قطر لوله هسته به عنوان متغیرهای موثر در نظر گرفته شدند. معیارهای مورد نظر برای برآورد کارایی سازه در برابر موج ناشی از انفجار، جابجایی نقطه میانی سازه و مقدار انرژی جذب شده توسط اجزای آن بود. داده‌های به دست آمده از روش عددی با مقادیر حاصل از آزمایش تجربی مربوطه مقایسه شد و تطابق خوبی بین داده‌های عددی و تجربی مشاهده شد. در هیچ یک از آزمایش‌ها واماندگی در ماده رخ نداد. در سازه ساندویچی بدون هسته، هیچگونه جابجایی عرضی در ورق تحتانی رخ نداد و انرژی حاصل از برخورد موج انفجار با سازه، توسط ورق فوقانی جذب. در سازه‌هایی با هسته

- 21- Johnson GR. A Constitutive Model and Date for Metals Subject to Large Strains, High Strain Rate and High Temperatures. InProc. of 7th Int. Symp. on Ballistics, The Hague 1983.
- 22- Johnson GR, Cook WH. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. Engineering fracture mechanics. 1985 Jan 1;21(1):31-48.
- 23- Motamedi MA, Hashemi R. Evaluation of Temperature Effects on Forming Limit Diagrams of AA6061-T6 Considering the Marciniak and Kuczynski Model. Journal of Testing and Evaluation. 2021 Mar 1;49(2):854-65.
- 24- Kingery CN, Bulmash G. Airblast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical surface burst. US Army Armament and Development Center, Ballistic Research Laboratory; 1984.
- 25- Hutov I, Ganey R, Petkov Y. BLAST LOADING ON STRUCTURES FROM THE EXPLOSIONS NEAR THE GROUND SURFACE. Machines. Technologies. Materials.. 2015;9(12):84-7.
- 26- Systèmes D. Abaqus 6.9 Documentation, Dassault Systèmes Simulia Corp, Providence, RI, USA.
- 27- Rezasefat M, Mostofi TM, Ozbakkaloglu T. Repeated localized impulsive loading on monolithic and multi-layered metallic plates. Thin-Walled Structures. 2019 Nov 1;144:106332.
- 28- Farahani A, Hadianfard MA. Blast Loading and Evaluation of Nonlinear Response of Structural Buildings. Ferdowsi Civil Engineering. 2015 Jan 21;26(1):121-32.
- 29- Zaera R, Arias A, Navarro C. Analytical modelling of metallic circular plates subjected to impulsive loads. International journal of solids and structures. 2002 Feb 1;39(3):659-72.
- Structural and Construction Engineering. 2018 Sep 21;5(2):39-52.
- 7- Olson MD. Efficient modelling of blast loaded stiffened plate and cylindrical shell structures. Computers & Structures. 1991 Jan 1;40(5):1139-49.
- 8- Teeling-Smith RG, Nurick GN. The deformation and tearing of thin circular plates subjected to impulsive loads. International Journal of Impact Engineering. 1991 Jan 1;11(1):77-91.
- 9- Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M. The influence of gas mixture detonation loads on large plastic deformation of thin quadrangular plates: Experimental investigation and empirical modelling. Thin-Walled Structures. 2017 Sep 1;118:1-1.
- 10- Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Alitavoli M. Experimental and theoretical study on large ductile transverse deformations of rectangular plates subjected to shock load due to gas mixture detonation. Strain. 2017 Aug;53(4):e12235.
- 11- Raja SC, Rajasankar J, Jawahar JG. Blast Response Studies on Metallic Tube Core Sandwich Panels. SSRG International Journal of Civil Engineering. 2015;2(6):25-31.
- 12- Babaei H, Darvizeh A. Investigation into the response of fully clamped circular steel, copper, and aluminum plates subjected to shock loading. Mechanics Based Design of Structures and Machines. 2011 Oct 1;39(4):507-26.
- 13- Zamani J, Goudarzi M. Experimental and numerical investigation of the maximum deflection of circular aluminum plate subjected to free air explosion. Modares Mechanical Engineering. 2015 Mar 10;15(1):219-26.
- 14- Sayah Badkhor M, Mirzababaie Mostofi T, Babaei H. The Influence of Uniform and Localized Blast Loading on the Response of Single-Layered Circular Plates: Experimental Study and Regression Analysis Using Response Surface Methodology. Modares Mechanical Engineering. 2020 Aug 10;20(8):2045-60.
- 15- Yuen SC, Cunliffe G, Du Plessis MC. Blast response of cladding sandwich panels with tubular cores. International Journal of Impact Engineering. 2017 Dec 1;110:266-78.
- 16- Xia Z, Wang X, Fan H, Li Y, Jin F. Blast resistance of metallic tube-core sandwich panels. International Journal of Impact Engineering. 2016 Nov 1;97:10-28.
- 17- Zhou X, Jing L. Deflection analysis of clamped square sandwich panels with layered-gradient foam cores under blast loading. Thin-Walled Structures. 2020 Dec 1;157:107141.
- 18- Li X, Kang R, Li C, Zhang Z, Zhao Z, Lu TJ. Dynamic responses of ultralight all-metallic honeycomb sandwich panels under fully confined blast loading. Composite Structures. 2023 May 1;311:116791.
- 19- Cerik BC. Damage assessment of marine grade aluminium alloy-plated structures due to air blast and explosive loads. Thin-Walled Structures. 2017 Jan 1;110:123-32.
- 20- Johnson GR. A Constitutive Model and Date for Metals Subject to Large Strains, High Strain Rate and High Temperatures. InProc. of 7th Int. Symp. on Ballistics, The Hague 1983.