

Experimental and Analytical Study of the Dynamic Response of Sandwich Structure with Grooved Vertical Tube Cores under Free Blast Load

Seyed Mahmood Farmani^{1*}, Hashem Babaei¹, Mojtaba Zia Shamami²

¹ Mechanical Engineering Faculty, University of Guilan, Rasht, Iran.

² Mechanical Engineering Faculty, Imam Hossein University, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Article History

Received: April 28, 2025

Revised: June 05, 2025

Accepted: July 01, 2025

ePublished: August 23, 2025

ABSTRACT

The strength of sandwich structures against explosive loads has been investigated in various studies. In this study, tubular cores with a circular circumferential groove have been used in the sandwich structure. In the experimental part, the sandwich structure consisting of 2 mm thick steel plates and five aluminum tube cores with a height of 30, inner and outer diameters of 10 and 12 mm, respectively, and with three circular circumferential grooves with a diameter of 0.7 mm was subjected to an explosive load of 20g of explosive. The cores were placed in a crosswise arrangement and vertically between the top and bottom surfaces of the structure. The deformation in the cores was investigated by measuring the geometric dimensions of the deformed groove with CMM equipment, and the displacement values in the surfaces were determined. In the analytical method, after determining the plastic hinge work of the grooves in the cores, the dynamic response of the structure is extracted using the sum of the plastic work of all its components, and the relationship between the average crushing force of the grooves is presented. The results show that the presence of grooved cores reduces the rigidity of the structure and reduces the role of the bottom plate in energy absorption. In the thin-walled part of the core, energy absorption is faster, and in the other part of the core, more energy is transferred. The average difference between the results of the methods is less than 15 percent.

Keywords: Circular Sandwich Structure; Grooved Tubular Core; Dynamic Response; Plastic Hinge; Groove Crushing Force; Blast Load

How to cite this article

Farmani S.M, Babaei H, Zia Shamami M, Experimental and Analytical Study of the Dynamic Response of Sandwich Structure with Grooved Vertical Tube Cores under Free Blast Load. Modares Mechanical Engineering; 2025;25(06):345-357.

*Corresponding author's email: Farmani.mahmood@yahoo.com

*Corresponding ORCID ID: 0009-0000-6675-5535



Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



مطالعه تجربی و تحلیلی پاسخ دینامیکی سازه ساندویچی با هسته لوله عمودی شیاردار تحت بار انفجاری آزاد

سید محمود فرمانی^{۱*}، هاشم بابایی^۱، مجتبی ضیا شمامی^۲

^۱ گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

^۲ گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران

چکیده

استحکام سازه‌های ساندویچی در برابر بار انفجاری در تحقیقات مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه، از هسته‌های لوله‌ای با شیار محیطی مقطع دایروی در سازه ساندویچی استفاده شده است. در بخش تجربی، سازه ساندویچی متشکل از ورق‌های فولادی به ضخامت ۲ میلی‌متر و پنج هسته لوله آلومینیومی با ارتفاع ۳۰، قطر داخلی و خارجی به ترتیب ۱۰ و ۱۲ میلی‌متر و با ۳ شیار محیطی مقطع دایروی به قطر ۰/۷ میلی‌متر تحت بار انفجاری حاصل از ۲۰ گرم ماده منفجره قرار گرفته است. هسته‌ها با چیدمان متقاطع و به صورت عمودی بین رویه‌های فوقانی و تحتانی سازه، قرار گرفته‌اند. تغییر شکل در هسته‌ها با اندازه‌گیری ابعاد هندسی شیار تغییر شکل یافته با تجهیز CMM بررسی شده و مقادیر جابجایی در رویه‌ها تعیین شده است. در روش تحلیلی پس از تعیین کار لولای پلاستیک شیارها در هسته‌ها، پاسخ دینامیکی سازه با استفاده از جمع کار پلاستیک همه اجزاء آن استخراج شده و رابطه میانگین نیروی لهیدگی شیارها ارائه شده است نتایج نشان می‌دهند، وجود هسته‌های شیاردار صلبیت سازه را کاهش داده و نقش ورق تحتانی در جذب انرژی را کاهش می‌دهد. در بخش جدارنازک هسته جذب انرژی سریعتر و در بخش دیگر هسته، انتقال بیشتر انرژی انجام می‌گیرد. میانگین اختلاف بین نتایج روش‌ها کمتر از ۱۵ درصد است.

کلیدواژه‌ها: سازه ساندویچی دایروی، هسته لوله‌ای شیاردار، پاسخ دینامیکی، لولای پلاستیک، نیروی لهیدگی شیار، بار انفجاری

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۸

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۱۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۰

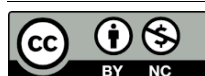
ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۶/۰۱

نحوه ارجاع به این مقاله

فرمانی سید محمود، بابایی هاشم، ضیا شمامی مجتبی، مطالعه تجربی و تحلیلی پاسخ دینامیکی سازه ساندویچی با هسته لوله عمودی شیاردار تحت بار انفجاری آزاد، مهندسی مکانیک مدرس. ۳۵۷-۳۴۵(۰۶):۲۵۰۴؛۱۴۰۴

*پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Farmani.mahmood@yahoo.com

*شناسه ارکید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ۰۰۰۹-۰۰۰۰-۶۶۷۵-۵۵۳۵



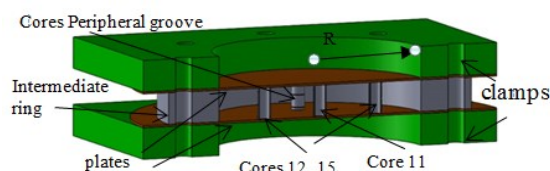
Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

۱- مقدمه

یکی از شاخص‌های مهم در ساخت سازه ساندویچی، کاهش جرم سازه و افزایش قابلیت جذب انرژی آن در برابر بارهای اعمالی تا مرحله تخریب است. یائو و همکاران [1] مدل تحلیلی لوله دایره‌ای با شیارهای محیطی خارجی را تحت لهیدگی محوری ارائه نموده‌اند. در این مقاله، یک مدل تحلیلی جدید از لوله شیاردار نوع B با در نظر گرفتن انحنای لولای پلاستیکی پیشنهاد شده است. همچنین معادله برازش حداکثر جابجایی زاویه‌ای یک مقطع جدار نازک نیز ارائه شده است. در روش نظری نشان داده شده که کل انرژی جذب شده و همچنین نیروی لهیدگی میانگین به نسبت‌های هندسی R/h و h/t بستگی دارد. بر اساس فرض تقارن محوری، یک مدل عددی ایجاد شده و نتایج مربوطه توسط یک تحقیق قبلی تایید شده است. این مقاله نشان می‌دهد که تحلیل ارائه شده در آن برای پیش‌بینی جذب انرژی و میانگین نیروی لهیدگی لوله شیاردار نوع B در شرایط شبه استاتیکی نسبت به روش‌های دیگر دقیق‌تر است. پاتل و همکاران [2] به بررسی پاسخ له‌شوندگی سازه‌های لوله‌ای شکل پذیر پرداخته‌اند. مطالعات بمنظور تعیین و تجزیه و تحلیل پاسخ له‌شوندگی سازه‌های لوله‌ای به دلیل ارتباط آنها با ایمنی، از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. جنبه‌های مختلفی از ساختارهای لوله‌ای مانند هندسه، مواد، پیکربندی و ساختار ترکیبی به عنوان معیارهای ارزیابی استفاده شده است. در این بررسی یک تحلیل جامع از یافته‌های مهم تحقیقات مختلف در مورد درک پاسخ لهیدگی ساختارهای لوله‌ای دیواره نازک ارائه شده است. سازه در این مطالعه شامل یک ویژگی غیرخطی از یک ماده شکل پذیر انتخاب شده است و صفحات فوقانی و تحتانی صلب در نظر گرفته می‌شوند. الکساندر [3] یک مدل نظری برای یک لوله دایره‌ای که به صورت متقارن یا متحدالمرکز با چین‌خوردگی به داخل تغییر شکل می‌دهد را ارائه نموده است. پس از آن، آبراموویچ و جونز [4] برای تعیین ظرفیت جذب انرژی، عبارتی را برای همان حالت تغییر شکل با چین‌خوردگی درونی و بیرونی استخراج کردند. نویسندگان دو شکل انرژی را در نظر گرفته‌اند: یکی با لولاهای پلاستیکی در طول تشکیل یک لوب و دیگری مرتبط با نیروهای محیطی. جونز [5] پارامتری به نام فاکتور اثربخشی جذب انرژی را برای ارزیابی یک جزء در جذب انرژی ضربه معرفی کرده است. که به صورت نسبت کل انرژی جذب شده توسط جزء به انرژی جذب شده تا نقطه شکست توسط همان حجم ماده تعریف می‌شود. نتایج نشان می‌دهند از روش‌های تجربی و عددی و بر اساس نتایج بدست آمده از نمودار بار-جابجایی سازه‌های لوله‌ای تحت بارگذاری فشاری می‌توان جذب انرژی را پیش‌بینی کرد. لو و همکاران [6] پاسخ روش شناسی سطحی برای معرفی یک عبارت درجه دوم که نتایج بهتری نسبت

به متغیر منفرد ارائه می‌دهد را بصورت عددی بررسی کرده‌اند. در بحث سازه‌های یکپارچه، لوله‌های استوانه‌ای و مخروطی با مقاطع متفاوت، عمدتاً دایره، مربع و مستطیل، برای بررسی جذب انرژی در آنها استفاده شده است. این بخش پاسخ سازه‌های لوله‌ای متداول را با اشاره به مواد و شرایط بارگذاری (شبه استاتیکی و دینامیکی) خلاصه می‌کند. لوله‌های با مقطع دایره‌ای استوانه‌ای به عنوان جاذب، به دلیل ساخت آسان آنها در مقایسه با سایر مقاطع عرضی به طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. پارامترهای اصلی که رفتار سازه‌های لوله دایره‌ای را تعیین می‌کنند عبارتند از قطر، ارتفاع، ضخامت و مواد. سینگاس و همکاران [7] یک پارامتر ضریب انحراف را ارائه داده‌اند و مقدار آن را با یافته‌های تجربی مقایسه نموده‌اند. چندین تکنیک اصلاح مانند ارائه برش‌ها، حلقه‌ها در پیرامون سازه‌ها و اعمال گرما توسط بسیاری از محققان اتخاذ شده که یک حالت تغییر شکل پایدار ارائه می‌دهد. گوپتا و گوپتا [8] اثرات انیل کردن و برش‌ها را بر سازه‌ها اجرا نموده و نشان داده‌اند که استفاده از تکنیک برش می‌تواند از کمناش سراسری غالب در لوله‌های بلند جلوگیری کند. جونز و همکاران [9] اثر نرخ کرنش را بر پاسخ لهیدگی لوله‌ها تحت شرایط هندسی و مرزی متفاوت لوله‌ها همراه با سرعت ضربه زدن مورد مطالعه قرار داده‌اند. میانگین بار لهیدگی بدست آمده با استفاده از راه حل نظری اصلاح شده الکساندر [3] که شامل ضریب حساسیت نرخ کرنش بود به خوبی پیش‌بینی شده است. فرمانی و همکاران به بررسی عددی و تجربی تغییر شکل صفحات ساندویچی مدور با هسته لوله عمودی فلزی تحت بار انفجار آزاد پرداخته‌اند. در این مطالعه بیشینه مقدار تغییر شکل سازه‌های ساندویچی به هر دو روش مقایسه گردیده است. رابطه میزان توازن انرژی در تغییر شکل برای سازه‌های مورد آزمایش بکار گرفته شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش تعداد لوله‌های هسته سازه، حداکثر خیز در رویه فوقانی کاهش می‌یابد و در نتیجه اثر آن در جابجایی عرضی ورق تحتانی کمتر می‌شود [10]. ون و ردی به بررسی رفتار ورق دایروی گیردار تحت انفجار مطابق با یک روش شبه استاتیکی پرداخته‌اند. بررسی تجزیه غیرالاستیک دینامیکی و شکست ورق‌های دایروی گیردار تحت بارهای ایمپالس بصورت یکنواخت مورد نظر واقع شده است. بر اساس اصل بقای انرژی و فرض کار معادل انجام شده، مسئله صفحه دایروی گیردار با بارگذاری ضربه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه نشان داده شده که حل‌های تحلیلی و داده‌های تجربی برای صفحات دایروی گیردار از نظر حداکثر جابجایی‌های عرضی دائمی نتایج مشابهی ارائه نموده‌اند و حالت‌های شکست و بارهای اعمالی بحرانی به دست آمده باعث شکست صفحه به دلیل پارگی کششی یا برش عرضی می‌شود [11]. فرمانی و همکاران [12] خیز رویه‌های ساندویچ پنل دایروی تحت بارگذاری انفجاری به روش تجربی مورد بررسی قرار داده‌اند.

ساندویچی مدور استفاده شده و اثر شیارها در رفتار سازه تحت بار انفجاری آزاد مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از انجام این تحقیق، بهینه‌سازی سازه‌های موجود نسبت به تحقیقات پیشین با کاهش خیز عرضی در رویه تحتانی سازه و یا به حداقل رساندن آن با استفاده از ایجاد شیار روی هسته‌های سازه می‌باشد. در کار حاضر سازه ساندویچی متشکل از دو رویه در بالا و پایین و هندسه هسته لوله به صورت شیاردار با شیار محیطی و مقطع دایروی که در شکل (۱) ارائه شده، در نظر گرفته شده است.



شکل ۱ طرح واره برش خورده سازه ساندویچی مونتاژ شده با هسته لوله عمودی شیاردار

Fig.1 Diagram of an assembled sandwich structure with a grooved vertical tube core

۲- بررسی تجربی

مطابق شکل (۱) در این مطالعه اجزای سازه ساندویچی بین دو کلمپ فولادی قرار داده شده است. با استفاده از مشخصات مکانیکی [۱۵] و [۱۶] برای ورق و لوله مورد نظر، پارامترهای مورد نیاز استخراج می‌شود. آزمایش تجربی بر روی نمونه‌های تعریف شده در جدول (۱) انجام شده است.

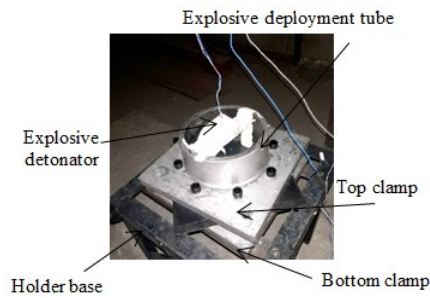
جدول ۱ مشخصات ابعادی گروه‌های آزمایشی

Table 1 Dimensional characteristics of the experimental groups

Grp	Structure Mass (kg)	Plate thickness (mm)	Tube Dimension (mm)	Groove dimension (mm) n	Num of Tubes
1	1.015	2	12*φ10*30 φ	φ0.7	5
2	0.98	2	-	-	-

به این منظور، دو گیره (فیکسچر) فولادی هر یک بابعاد ۳۵۰×۳۵۰ میلیمتر با ضخامت ۲۵ میلیمتر دارای یک سوراخ با قطر داخلی ۲۰۰ میلیمتر (قطر سطح مواجهه)، ۸ سوراخ به قطر ۱۶ میلیمتر در قطر ۲۷۰ میلیمتری روی گیره‌ها برای مونتاژ ورق‌ها و اتصال به پایه نگهدارنده استفاده شده‌اند. به این ترتیب، گیره پایینی توسط ۴ عدد پیچ بر روی پایه تکیه‌گاه نصب می‌شود. سپس ورق تحتانی با تطبیق سوراخ‌های اطراف بر روی گیره تحتانی قرار می‌گیرد. در مرحله بعد، رینگ دایره‌ای واسطه (با قطر داخلی ۲۰۰ میلیمتر و قطر خارجی ۳۰۰ میلیمتر با ضخامت ۳۰ میلیمتر به منظور جلوگیری از له‌شدن هسته‌ها) در سطح بالایی ورق تحتانی و با تطبیق سوراخ‌های محیطی نصب می‌شود. لوله‌های آلومینیومی سوراخدار Al 7۰7۱ با چیدمان متقاطع (×) به طوری که یک عدد در مرکز با شماره ۱۱، ۴ عدد در شعاع ۵۵ میلیمتری از

در این تحقیق با استفاده از تابع شکل بسل و کسر کار پلاستیک اجزای هسته و دیگر تغییر شکل‌ها از انرژی جنبشی کل داده شده به سازه، رابطه پیش‌بینی مقدار خیز رویه‌ها ارائه شده است. نتایج حاصل از روش‌های این تحقیق با ارائه بیشینه مقدار جابجایی عرضی و بر حسب فاصله از مرکز سازه و میزان تغییر طول برای هر یک از هسته‌های سازه بیان شده است. اثر نسبت جابجایی به ضخامت رویه و نسبت لهیدگی هسته‌ها به حجم آنها در تغییر شکل سازه بررسی شده است. مشخص شده که لزوماً با افزایش حجم هسته‌ها در سازه ساندویچی، صلبیت سازه در برابر بار اعمالی معین افزایش نمی‌یابد. افزایش جرم سازه، میزان تغییر شکل و جذب انرژی را کاهش می‌دهد. در بررسی برخی سازه‌ها، اثر مقدار لهیدگی هسته‌ها بر جابجایی عرضی تقریباً برابر با اثر ضخامت رویه است. گرمی و همکاران [۱۳]، به بررسی تاثیر پیکربندی لایه‌های چوب پنبه‌ای به عنوان هسته بر رفتار ضربه‌ای ساختار ساندویچی با رویه‌های شیشه/ اپوکسی پرداخته‌اند. در این مطالعه نمونه‌های مختلفی از مواد با و بدون هسته چوب پنبه‌ای با ضخامت‌های مختلف و با تعداد لایه متفاوت تحت بار ضربه‌ای واقع شده‌اند. با توجه به توزیع یکنواخت لایه‌های چوب پنبه‌ای، جذب انرژی بیشتری توسط این نوع سازه ساندویچی نشان داده شده است. نتایج تحقیق در طراحی و ساخت سازه‌های مقاوم و سبک در برابر ضربه در صنایع هوافضا حائز اهمیت است. خدائی‌پور و همکاران [۱۴] به بررسی آسیب در زره چند نقطه‌ای تحت بار انفجاری تماسی زیر آب پرداخته‌اند. مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم افزار اتوداین انجام شده و آزمایش‌های تجربی برای اعتبار سنجی شبیه‌سازی بکارگرفته شده است. نتایج نشان می‌دهند ساختارهای با محیط واسطه هوا - آب در صورت بهره‌گیری از لایه میانی فولاد ۳۷ st پارگی در لایه آخر تجربه نمی‌کنند. در تحقیقات پیشین به بررسی تغییر شکل و لولای پلاستیک ایجاد شده در لوله‌های شیاردار (با مقطع چهارگوش) و یا کنگره‌دار که در جداره نازک آنها و از بالا به پایین و بصورت متقارن، محوری و یا غیر متقارن رخ داده، پرداخته شده است. برش طولی مقطع این لولاها نشان می‌دهد که غالباً به شکل مثلثی بوده و در سمت بیرون لوله تشکیل می‌شود. همچنین در بخش‌های تحلیلی مطالعات پیشین طول بازوی لهیدگی در بالا و پایین لولای ایجاد شده یکسان و خطی است. کمانش ایجاد شده در لوله‌ها نیز در اثر بار خارج از مرکز اعمالی به لوله‌ها و یا تماس سطح مقطع لوله‌ها با ورق رویه‌ها و حرکت رویه‌ها به طرف مرکز سازه بوجود آمده است. همچنین تغییر شکل تحت بارگذاری استاتیکی طی زمان و تحت بار ثابت انجام پذیرفته است. در حالیکه بارگذاری دینامیکی حالتی است که فرآیند تغییر شکل در زمان بسیار کوتاه رخ می‌دهد. ضمناً در فرآیند بارگذاری انفجاری از تنش دینامیکی استفاده می‌شود. از اینرو در مطالعه حاضر، از هسته‌های لوله‌ای شیاردار (شیار با مقطع دایروی) در سازه



شکل ۳ نمونه آماده سازی شده در اتاق انفجار

Fig. 3 Sample prepared in the explosion chamber



شکل ۴ ورق‌های فوقانی و تحتانی متناظر در سازه‌ها (بترتیب از بالا) مربوط به آزمایش‌های تجربی انجام شده

Fig. 4 Corresponding top and bottom plates in the structures (from top to bottom) related to the experimental tests performed



شکل ۵ بیشینه جابجایی مرکز ورق فوقانی در آزمایش (۳)

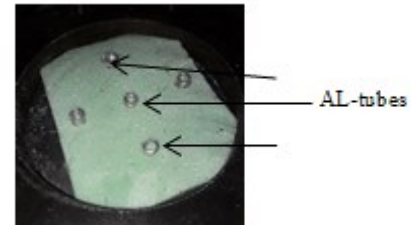
Fig. 5 Maximum displacement of the center of the top plate in test (3)



شکل ۶ جابجایی عرضی ورق‌های فوقانی و تحتانی سازه آزمایش (۲) راست به چپ

Fig. 6 Transverse displacement of the top and bottom plates of the test structure (2) right to left

مرکز با شماره‌های ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵ داخل اسفنج قرار داده شده است (شکل ۲). در ادامه، ورق فوقانی سازه بر سطح مقطع لوله‌ها و رینگ فاصله‌انداز 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 محکم بسته می‌شوند (شکل ۳).



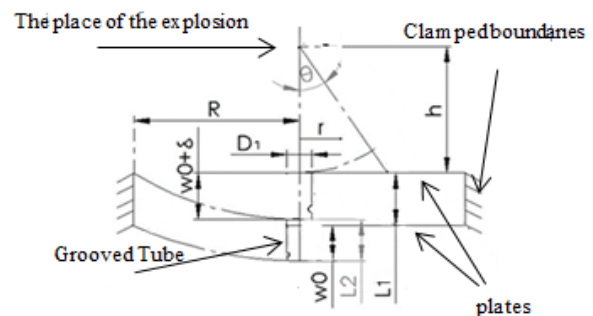
شکل ۲ قرارگیری لوله‌های هسته درون سازه ساندویچی

Fig. 2 Placement of core tubes within the sandwich structure

با استفاده از داده‌های روش عددی برای ورق دایروی [10] و با در نظرگیری پارامترهای ورودی هندسی مانند سطح مواجهه و ضخامت ورق و... بکمک روش سطح پاسخ، میزان بهینه جرم ماده منفجره برای تغییر شکل انتخاب شده است. بنابراین چاشنی بر روی ۲۰ گرم ماده منفجره (C_4) که بوسیله فوم و در فاصله تقریباً باندازه شعاع سازه از سطح ورق فوقانی قرار داده شده نصب می‌شود تا فرآیند انفجار انجام شود. از رابطه تجربی $I = (5760)w^{\frac{1}{3}}\left(\frac{w^{\frac{1}{3}}}{s}\right)^{0.891}$ ، مقدار پارامتر فاصله مقیاس شده z ، ایمپالس حاصل از انفجار I بر حسب پاسکال-ثانیه در محاسبات استفاده شده است [17]. پارامترهای مختلف فاز مثبت انفجار آزاد بر مبنای ماده انفجاری (TNT) در نظر گرفته شده است. زمان فرآیند تا رسیدن به مقدار بیشینه فشار حاصل از انفجار مطابق با رابطه $I = P_0 \tau$ تعریف شده است [18]. در شکل (۴) ورق‌های فوقانی و تحتانی مربوط به آزمایش‌های تجربی انجام شده در دو ستون و متناظر با هم نشان داده شده است. اثر فرو رفتگی ناچیز هسته‌ها روی ورق‌های تحتانی (در پایین تصویر) و برآمدگی روی ورق فوقانی (در بالای تصویر) مشاهده می‌شود. جابجایی عرضی ورق‌های فوقانی و تحتانی به دو شیوه تقریبی و دقیق اندازه‌گیری شده است. شکل (۵) روش اندازه‌گیری دقیق بیشینه جابجایی در ورق‌های برش خورده سازه را با مهار کردن دو سمت ناحیه تغییر شکل یافته نشان می‌دهد. همچنین مقادیر تقریبی خیز سازه‌ها در مرکز و محل قرارگیری هسته‌ها برای ورق‌های فوقانی و تحتانی برای آزمایش‌ها در شکل (۶) نشان داده شده است.

۳- بررسی تحلیلی

در این مرحله، بررسی تحلیلی مطابق با هندسه سازه در قبل و پس از بارگذاری (شکل ۷)، ابعاد اندازه‌گیری شده اجزای سازه در آزمون تجربی و بر مبنای روش انرژی و جابجایی نقاط هندسی در هسته‌های لوله‌ای و ورق‌ها انجام شده است. مقاومت سازه در برابر نیروی اعمالی با در نظرگیری فشار حاصل از مقدار ماده انفجاری و بر حسب پارامتر Z و سطح مواجهه سازه A محاسبه می‌شود. تنش تسلیم سازه وابسته به مشخصات مکانیکی مواد سازه (آلومینیوم و فولاد)، سختی خمشی ورق‌ها و هسته‌ها (برگرفته از تعداد هسته، ارتفاع هسته و ممان اینرسی و...) است که در فرآیند انفجار بصورت تنش دینامیکی در محاسبات لحاظ می‌شود. لازم بذکر است کار پلاستیک رویه‌ها، کماتش هسته‌ها، برآمدگی و فرورفتگی رویه‌ها مطابق با مطالعات پیشین می‌باشد. روابط مربوط به تغییر شکل و تشکیل لولای پلاستیک در شیار هسته‌ها و محاسبات مربوط به میانگین نیروها و راندمان نیز در پژوهش حاضر ارائه شده‌اند.



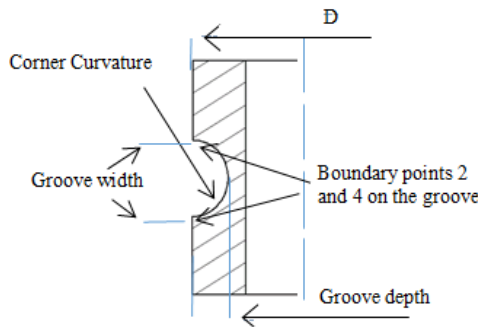
شکل ۷ هندسه سازه ساندویچی با هسته شیاردار و مرزگیردار قبل از بارگذاری (سمت راست) و بعد از بارگذاری (سمت چپ) محور تقارن

Fig. 7 Geometry of sandwich structure with grooved and bounded core before loading (right side) and after loading (left side) of the axis of symmetry

بررسی شهودی هسته‌ها نشان می‌دهند کار پلاستیک داخلی هسته‌ها شامل کار پلاستیک ناشی از خم شدن و له شدن شیارهای لوله‌های کناری سازه و لهیدگی لوله مرکزی می‌باشد.

۳-۱- کار پلاستیک هسته‌های لوله‌ای

در این مطالعه رفتار هسته لوله آلومینیومی شیاردار با مقطع دایروی به قطر $d_1 = 7/4$ و عمق $d_1/2 = 7/8$ درون ساختار سازه ساندویچی تحت بار انفجار آزاد مورد بررسی قرار گرفته و روابط هندسه تغییر شکل مربوط به هسته لوله آلومینیومی به صورت پارامتری استخراج شده است (شکل ۸).



شکل ۸ مشخصات کلی هندسه شیار روی هسته لوله‌ای

Fig. 8 General characteristics of the groove geometry on the tubular core

۳-۱-۱- بررسی تحلیلی هندسه هسته با شیار مقطع دایروی پس از تغییر شکل

شکل (۹) بررسی ابعادی قسمت‌های مختلف لوله تغییر شکل یافته را توسط دستگاه CMM مدل LHI08 نشان می‌دهد. براین اساس، پارامترهای روش تحلیلی مطابق با ابعاد الگوی هندسه تغییر شکل یافته در شکل ۱۰-الف، و شکل ۱۰-ب (توسط نرم افزارهای Metrosoft Quartis و گروه CAD ارائه شده است. شیار مقطع دایروی به دلیل وجود انحناء در گوشه‌های عرض شیار، نوع لهیدگی (B) [19] قرار می‌گیرد. مطابق بررسی‌های تجربی، لولای پلاستیک درون هسته‌های لوله‌ای ایجاد می‌شوند و تشکیل لولای پلاستیک درون لوله نقش اصلی در جذب انرژی توسط هسته را ایفا می‌کند. افزایش عمق شیارهای عرضی، نقاط بیرونی روی شیارها را در فاز نهائی کرنش پلاستیک به روی هم می‌نشانند. در واقع افزایش بارگذاری سبب تماس سطح به سطح دقیق و کامل انحنای (بازوی) فوقانی شیار و انحنای (بازوی) تحتانی شیار نمی‌شود. این مکانیزم، از انتقال بار و نیروی فشرده‌گی به سطح بوجود آمده بزرگتر در اثر چین‌خوردگی (که در شیارهای مستطیلی متداول است) به شیارهای پایین‌تر جلوگیری می‌کند (سطح جذب انرژی توسط بدنه لوله افزایش و رفتار صلب گونه آن را کاهش می‌دهد). بنابراین فرض می‌شود که در زمان تغییر شکل در شیارها، (ابتدا کار پلاستیک خمش در لولاها و سپس کشیدگی در بازوها) رخ می‌دهد که در ادامه برای هسته لوله‌ای تشریح شده‌است.

۳-۱-۱-۱- انرژی جذب شده بازای فشرده‌گی بازوهای شیار عرضی در مکانیزم لوله شیاردار با مقطع عرضی دایروی، به دلیل وجود انحناء در گوشه‌ها، بازوهای منحنی شکل شیار دچار فشرده‌گی می‌شوند. از طول منحنی شکل ایجاد شده در عرض شیار ثانویه u_2 نسبت به منحنی عرض شیار اولیه u_1 ، میزان کرنش فشرده‌گی در انحنای شیار استخراج می‌شود.

ترتیب که در شیارهای با مقطع مستطیلی قبل از تشکیل لولای پلاستیک، حتماً باید شرایط کماتش در عرض شیار به وجود آید. مطابق با مطلب فوق مقدار رابطه W_c در این مکانیزم کاهش می یابد و انرژی از طریق تشکیل لولاهای پلاستیک مستهلک می شود.

۳-۱-۲- انرژی جذب شده در لولاهای پلاستیک بازای واحد طول

برآمدگی ایجاد شده درون لوله با تشکیل دو لولای پلاستیک در بالا و پایین برآمدگی با شعاع R_3 و یک لولا در راس برآمدگی روی محور هرشیار عرضی همراه می باشد. تغییرات طول هسته نیز متأثر از مقدار و تعداد چین خوردگی هاست که در روابط کار پلاستیک لولاهای آنها پرداخته شده است.

الف: کار پلاستیک در لولاهای فوقانی و تحتانی شماره ۱ و ۳ در قسمت برآمدگی داخل لوله بصورت رابطه (۳) محاسبه شده است:

$$w_{B1,3} = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} 2\pi R_1 M_P d\phi_2 = 2M_P \pi^2 R_1 \quad (3)$$

ب: انرژی جذب شده در لولای پلاستیک میانی: مطابق با هندسه دهانه شیار حین تغییر شکل و با فرض جابجایی متقارن خطی δ نسبت به محور شیار عرضی (جابجایی نقاط مرزی ۲ و ۴ روی شیار)، تغییرات زوایای ϕ_3 و ϕ_1 حین تغییر شکل و همچنین اصل ثبات حجم ماده (حجم ماده جابجا شده در عمق شیار روی محور افقی آن برابر با حجم برآمدگی داخل لوله)، کار پلاستیک لولای میانی به صورت رابطه (۴) محاسبه شده است:

$$w_{B2} = 2 \int_0^{\frac{\pi}{4}} 2\pi \left(R_1 - \frac{\sqrt{2}}{2} d_1 \sin \phi_1 \right) M_P d\phi_3 = 2\pi M_P \left(R_1 \frac{\pi}{4} - 0.2 d_1 \right) \quad (4)$$

در رابطه فوق عبارت $\frac{\sqrt{2}}{2} d_1 \sin \phi_1$ معادل با δ در نظر گرفته شده است. همچنین از معیار فون میسز گشتاور پلاستیک از رابطه (۵) محاسبه شده است.

$$M_P = \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right) \sigma_0 \left(\frac{t^2}{4} \right) \quad (5)$$

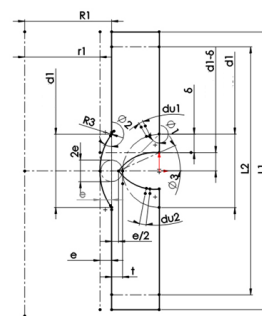
ج: کار پلاستیک لولاهای در چین خوردگی کامل هسته مرکزی جذب انرژی در ۳ لولای پلاستیک روی قطر خارجی هسته و برای یک چین خوردگی کامل در شکل (۱۱) به صورت رابطه (۶) و بر حسب واحد طول در محیط چین خوردگی محاسبه شده است [21].



شکل ۹ اندازه گیری ابعاد هندسی هسته برش خورده پس از تغییر شکل توسط دستگاه CMM

Fig. 9 Measurement of geometric dimensions of the cut core after deformation by CMM

از هندسه قبل و بعد از تغییر شکل لوله و با در نظرگیری $e \approx \delta$ و با استفاده از پارامترهای شعاع بزرگ و کوچک $a_1 = \frac{d_1}{2} + \frac{e}{2}$ و $b_1 = \frac{d_1}{2} - \delta$ در شکل، نسبت $\frac{u_2}{u_1} = \left(1 - \frac{2\delta}{d_1} \right)$ با در نظرگیری تعداد بازوها در مقطع حاصل شده است. بنابراین با استفاده از مقادیر کرنش حقیقی و تنش دینامیکی کوپر-سیمونز σ_d [20] میزان کار پلاستیک فشردگی شیار با رابطه (۱) تعریف شده است:



شکل ۱۰-الف بخشی از مقطع هندسی هسته شیاردار در فرآیند تغییر شکل

Fig. 10-b Dimensional geometry of the core in terms of the experimental sample

Fig. 10-A Part of the geometric cross-section of the grooved core during the deformation process.

$$w_c = 2 \int_0^{\frac{d_1}{2}} 2\pi R_1 t \sigma_d \ln \left(1 - \frac{2\delta}{d_1} \right) d\delta = 0.7\pi R_1 t \sigma_d d_1 \quad (1)$$

بر حسب δ ایجاد شده بازای کرنش عرضی شیار:

$$\ln \left(\frac{u_2}{u_1} \right) = \ln \left(1 - \frac{2\delta}{d_1} \right) \approx 0.7 \frac{2\delta}{d_1} \quad (2)$$

که در اینجا $u_1 = \pi \frac{d_1}{4}$ و $u_2 = \pi \frac{(a_1+b_1)}{4}$ در نظر گرفته شده است. در این مکانیزم سرعت تشکیل لولای پلاستیکی بسیار بالاست بدین

Σ مجموع کار پلاستیک و انرژی جذب شده در این لوله ها است. $k_1 \dots k_3$ ضرایب تاثیر تعداد لولا، تعداد فشردگی بازای تعداد چین خوردگی و کمانش تعریف شده است.

$$W_T = \sum k_1 \cdot W_{B1,3} + k_2 \cdot W_{B2} + k_3 \cdot W_C + W_{buck} \quad (10)$$

۳-۲- کار پلاستیک ناشی از اثر لوله ها روی ورق ها

اثر برآمدگی و فرورفتگی لوله های هسته در نقاط تماس با صفحات بالا و پایین از رابطه کار پلاستیک انجام شده در واحد حجم $w = \int_0^{\bar{\epsilon}} \bar{\sigma} d\bar{\epsilon}$ و با استفاده از رابطه تنش- کرنش موثر برای این ماده $\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n$ ، کار انجام شده از معادله $w_{p-st} = \frac{K\bar{\epsilon}^{n+1}}{n+1}$ محاسبه می شود [23].

۳-۳- کار پلاستیک رویه ها

بطور کلی کار پلاستیک انجام شده W_p در طول تغییر شکل رویه های سازه ساندویچی بصورت رابطه (۱۱) تعریف می شود:

$$W_p = \int \sigma(\epsilon_r + \epsilon_\theta) dv = \int_0^R \int_{-\frac{H}{2}}^{+\frac{H}{2}} \sigma_d(\epsilon_r + \epsilon_\theta) 2\pi r dr dz$$

که با استفاده از تابع شکل $W(r) = (w_0)J_0\left(\frac{a \cdot r}{R}\right)$ برای رویه ها و با بکارگیری روابط کرنش-جابجایی (ϵ_θ و ϵ_r) بترتیب کرنش شعاعی و کرنش محیطی) برای تغییر شکل بزرگ ورق های خم شده بیان می شوند [24]. بنابراین با استفاده از معادله فوق، کار پلاستیک رویه فوقانی به صورتی که در معادله (۱۲) نشان داده شده است، تعیین می شود [23].

$$(12)$$

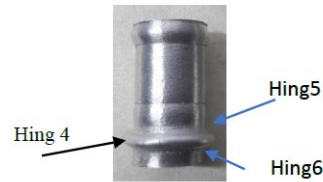
$$W_{bt} = \frac{1}{2} \pi \sigma_d (a^4 (W_0 + \delta)^2 J_1^2 H + a^2 (W_0 + \delta) J_1 H^2)$$

همچنین کار پلاستیک رویه تحتانی با حاصلضرب اجزای کرنش در تنش دینامیکی به صورت معادله (۱۳) به دست می آید.

$$W_{bb} = \frac{1}{2} \pi \sigma_d (a^4 (W_0)^2 J_1^2 H + a^2 (W_0) J_1 H^2) \quad (13)$$

۳-۴- پاسخ دینامیکی سازه

پاسخ سازه از برابری انرژی جنبشی و کار پلاستیک انجام شده توسط اجزای سازه $E_k = \frac{1}{2} m V_0^2 = \frac{I^2}{2m} = W_p$ در فرآیند جذب انرژی به دست می آید [25]. جرم سازه به صورت مجموع جرم صفحات و لوله ها با توجه به رابطه $m = 2\rho_1 \pi R^2 H + n d_m \pi L_1 \rho_2 t$ تعریف می شود. کار پلاستیک انجام شده توسط تمام اجزای سازه در فرآیند جذب انرژی به دست می آید که در معادله (۱۶) نشان داده شده است. N در رابطه ذیل ضریب تاثیر تعداد لوله در نظر گرفته شده است. از تقسیم عبارت طرف راست رابطه (۱۶) بر جرم سازه، مقدار نهایی انرژی جذب شده در تغییر شکل پلاستیک اجزای سازه *specific energy absorption* (با در نظرگیری تعداد اجزاء



شکل ۱۱ چین خوردگی کامل هسته مرکزی

Fig.11 Complete folding of the central core

$$W_{B4-6} = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} 2\pi R_1 M_p d\phi + 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} 2\pi \left(R_1 + \frac{\gamma}{2} \sin \phi \right) M_p d\phi = 2\pi M_p (2\pi R_1 + \gamma) \quad (6)$$

د: کار پلاستیک کشیدگی بازوها در چین خوردگی کامل هسته مرکزی

همچنین انرژی جذب شده در کشیدگی بین لولاها بصورت رابطه (۷) ارائه شده است [21].

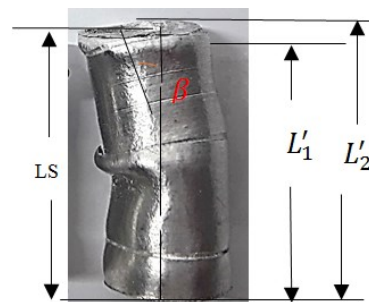
$$w_s = 2 \int_0^{\frac{\gamma}{2}} 2\pi R_1 t \sigma_d \ln \left(R_1 + \frac{R_1 + x \sin \phi}{R} \right) dx = \pi t \sigma_d \frac{\gamma^2}{2} \quad (7)$$

ر: کار پلاستیک ناشی از کمانش لوله های جانبی در سازه:

کمانش در قسمت جدار نازک لوله رخ می دهد. بنابراین در بحث کمانش لوله فرض می شود قطر لوله در تمام طول لوله با قسمت جدار نازک برابر است. با توجه به هندسه شکل (۱۲) و صرف نظر از تغییرات جزئی در مقطع لوله پس از کمانش، زاویه ایجاد شده در لولای پلاستیک نسبت به محور لوله مطابق معادله (۸) تعریف شده است. قطر لوله در اینجا $D_1 = 2R_1 + 2t$ تعریف شده است. با استفاده از زاویه خمش β و ممان پلاستیک (M_p) در محل لولا [22]، کار پلاستیک کمانش توسط معادله (۹) محاسبه گردید.

$$\beta = \frac{L'_2 - L'_1}{D_1} \quad (8)$$

$$W_{buck} = \sigma_0 \frac{1}{4} \left(\frac{D_1^3 - (2R_1)^3}{1} \right) \cdot \beta \quad (9)$$



شکل ۱۲ هندسه کمانش لوله های جانبی در سازه

Fig.12 Buckling geometry of lateral tubes in the structure

$$\frac{F}{M_p} = \frac{0.7\pi R_1 d_1 t \sigma_d + 2\pi M_p \left[\frac{5}{4} \pi R_1 - 0.2 d_1 \right]}{\sqrt{2} d_1 \sin \phi_1} \quad (22)$$

$$\sigma_0 \frac{1}{4} \left(\frac{D_1^3 - (2R_1)^3}{1} \right)$$

۴- بحث و نتایج

جدول (۲)، بیشینه جابجایی عرضی ورق‌های فوقانی و تحتانی بر اساس نتایج تجربی در سازه‌های دارای هسته لوله آلومینیومی شیاردار و سازه بدون هسته لوله‌ای را نشان می‌دهد. بیشترین خیز در سازه‌های مذکور مربوط به آزمایش (۲) است. مقایسه مقادیر جابجایی عرضی در آزمون (۳) با آزمایش‌های (۱) و (۲) بیان می‌کند که اختلاف جابجایی عرضی در مرکز ورق فوقانی حداقل ۴/۳ میلی‌متر است و حداکثر ۳/۶ 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 کد آزمایش نشان می‌دهد. مقایسه آزمایش‌های (۱) و (۲) با قطر هسته‌های ۱۲ میلی‌متری نشان می‌دهد، اختلاف ۰/۷ تا ۰/۸ میلی‌متری در مقدار له‌شدگی هسته‌ها وجود دارد. اثر هسته‌ها در مقدار جابجایی عرضی در سازه‌ها در ورق فوقانی با هسته شیاردار ۲۲-۱۸ درصد نسبت به سازه بدون هسته است.

جدول ۲ مقادیر بیشینه جابجایی عرضی و تغییر طول هسته‌ها در سازه به روش تجربی

Table 2 Max values of transverse displacement and change in length of cores in the structure by experimental method

Grp	Test code	Transverse displacement of the structure (mm)			Secondary length of cores (mm)	
		Average force (KN)	Bottom plate	Top plate	Cores Num(exp)	
1	(1)	325.5	-3.8	-15.5	19.5	21
	(2)		-4.2	-16.2	18.8	20/2
2	(3)	340.2	0	-19.8	-	-

به طور کلی در تمامی سازه‌ها بیشترین میزان تغییر ارتفاع در هسته‌های مرکزی (شماره ۱۱) رخ داده است. با توجه به مقادیر، تغییر در ارتفاع هسته‌های سازه شماره (۲) بیشتر از سازه مشابه شماره (۱) است. میزان انرژی جذب شده در هر هسته در مواضع مختلف قرارگیری درون سازه ساندویچی، با خمش و لهیدگی هسته سنجیده شده است. شکل (۱۳) مقدار زاویه ایجاد شده در خمش هسته مربوط به لوله‌های جانبی است. با توجه به ابعاد هندسی برابر برای هسته‌ها در هر دو سازه، اثر شیار بر میزان فرم خمش و لهیدگی هسته‌ها موثر بوده و تغییرات قابل توجهی در خیز سازه‌های (۱) و (۲) در مقایسه با سازه (۳) را نشان

محاسبه می‌شود. بنابراین انرژی جذب شده ویژه سازه از رابطه $SEA = \frac{w_p}{m}$ حاصل می‌شود.

$$E_k = \frac{I^2}{2} (\pi [2\rho_1 R^2 H + n d_m L_1 \rho_2 t])^{-1} \quad (16)$$

$$= \frac{1}{2} \pi \sigma_d (a^4 (W_0 + \delta)^2 J_1^2 H + a^2 (W_0 + \delta) J_1 H^2) + \frac{1}{2} \pi \sigma_d (a^4 (W_0)^2 J_1^2 H + a^2 (W_0) J_1 H^2) \pm \sum_1^{k_n} k_5 \frac{K \varepsilon^{n+1}}{n+1} \cdot v + N_4 \sum_1^{k_n} \beta \sigma_0 \frac{1}{4} \left(\frac{D_1^3 - (2R_1)^3}{1} \right) + N_3 \sum_1^{k_n} k_3 0.7 \pi R_1 t \sigma_d d_1 + N_2 \sum_1^{k_n} k_2 2 \pi M_p \left(R_1 \frac{\pi}{4} - 0.2 d_1 \right) + N_1 \sum_1^{k_n} k_1 2 M_p \pi^2 R_1 + N_0 \sum_1^{k_n} k_0 (2 \pi M_p (2 \pi R_1 + \gamma) + \pi t \sigma_d \frac{\gamma^2}{2})$$

۳-۵- محاسبه میانگین نیروی لهیدگی در هر شیار لوله

در این مطالعه میزان لهیدگی بازای عرض هر شیار مطابق با رابطه (۱۷) محاسبه شده است.

$$\delta = (\sqrt{2} d_1 \sin \phi_1) \quad (17)$$

با در نظرگیری رابطه $W_{TC} = F \cdot \delta$ و از برابری کار انجام شده در تغییر شکل پلاستیک W_D و کار خارجی W_{TC} مقدار نیروی لهیدگی بازای طول واحد لهیدگی در یک شیار لوله حاصل می‌شود رابطه (۱۸).

$$W_{TC} = 0.7 \pi R_1 t \sigma_d d_1 + 2 M_p \pi^2 R_1 + 2 \pi M_p \left(R_1 \frac{\pi}{4} - 0.2 d_1 \right) \quad (18)$$

پس از ساده سازی، مقدار میانگین نیروی لهیدگی بصورت رابطه (۱۹) بدست می‌آید:

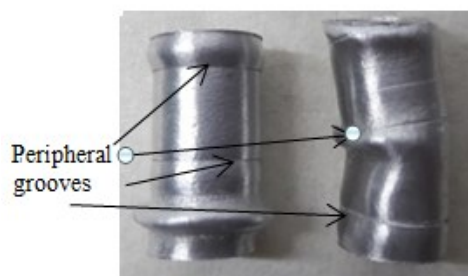
$$F = \frac{0.7 \pi R_1 d_1 t \sigma_d + 2 \pi M_p \left[\frac{5}{4} \pi R_1 - 0.2 d_1 \right]}{\sqrt{2} d_1 \sin \phi_1} \quad (19)$$

راندمان شیار در هسته‌ها به صورت نسبتی از لهیدگی شیار لوله‌ها به طول اولیه لوله تعریف شده است

$$S_E = \frac{\delta_T}{L_1} = \frac{N \sum K (\sqrt{2} d_1 \sin \phi_1)}{L_1} \quad (21)$$

میانگین نیروی لهیدگی نرمال n امین بخش دیواره نازک را می‌توان به دست آورد [26,27]. همچنین لهیدگی ایجاد شده در هسته‌ها δ_T نسبت به انرژی جنبشی داده شده از طریق رابطه $S_K = \frac{\delta_T}{E_{KT}}$ (با کسر میزان انرژی‌های کار پلاستیک مربوط به رویه‌ها از انرژی جنبشی کل) محاسبه شده که انرژی مجموع هسته‌ها نیز برابر با $E_{KT} = \frac{I_T^2}{2 n d_m \pi L_1 \rho_2 t}$ تعریف شده است.

می‌دهد. میزان چین خوردگی هسته‌های لوله‌ای در بالا و پایین آنها یکسان نیست. چین خوردگی در بالا و پایین هسته مرکزی کاملاً متقارن و در مجاورت شیار محیطی رخ داده است.



شکل ۱۳ تغییر شکل هسته‌های شیاردار (مرکزی و جانبی) سازه پس از بارگذاری

Fig. 13 Maximum values of transverse displacement and change in length of cores in the structure by experimental method

مقادیر مربوط به تغییر زاویه و خمش ایجاد شده در هسته‌های آلومینیومی به روش تجربی بر حسب قرارگیری درون سازه در جدول (۳) ارائه شده است. با استفاده از اختلاف بیشینه و کمینه ارتفاع در لوله‌های جانبی و قطر هسته‌ها، میزان خمش ایجاد شده محاسبه شده است. وجود شیارهای محیطی، سرعت کمایش هسته‌ها در این ناحیه را افزایش داده و میزان استهلاک انرژی از طریق لهیدگی و تغییر طول هسته‌های جانبی را کاهش می‌دهد. جدول (۴) بیانگر مقادیر جابجایی عرضی در هر سازه را برای ورق‌های فوقانی و تحتانی در هر آزمایش نشان می‌دهد.

جدول ۳ میزان خمش هسته‌های سازه به روش تجربی پس از تغییر شکل (میلیمتر)

Table 3 Experimental bending of cores after deformation (mm)

Lateral core			
Test cod	Max height	Min height	Bending angle (Deg)
(1)	21	19.2	8.53
(2)	20.2	18.5	8.1

مقادیر این جداول بیانگر تغییرات منحنی بر حسب فاصله شعاعی از مرکز می‌باشد. در روش تجربی با استفاده از رابطه $E_{def} = \frac{\pi^2 H^2 \sigma_0 w_0}{4} + \frac{1}{16} (\pi^3 H \sigma_0 w_0^2)$ انرژی حاصل از انفجار معادل با انرژی تغییر شکل در نظر گرفته شده است [28]. همچنین اصل پایداری نرخ تغییرات انرژی $\dot{W}_e(t) = \dot{E}_c(t) + \dot{W}_p(t)$ در روش تجربی لحاظ شده است [29] [30].

جدول ۴ مقادیر جابجایی عرضی ورق فوقانی (میلیمتر) - فاصله از مرکز (متر)

Table 4 Transverse displacement values of the top plate (mm) - distance from the center (meter)

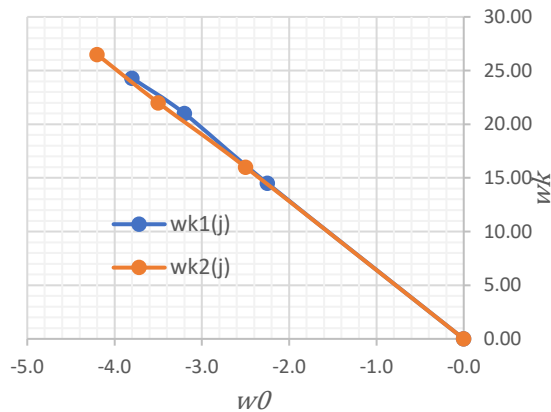
Distance from the center of the Plate	Test 1	Test 2
0.1	0	0
0.075	-12.00	-12.5
0.05	-14.5	-15.0
0	-15.5	-16.20

مقادیر جابجایی عرضی ورق تحتانی (میلیمتر) - فاصله از مرکز (متر)

Bottom plate transverse displacement values (mm) - distance from center (meters)

Distance from the center of the Plate	Test 1	Test 2
0.1	0	0
0.075	-2.25	-2.5
0.05	-3.2	-3.5
0	-3.8	-4.2

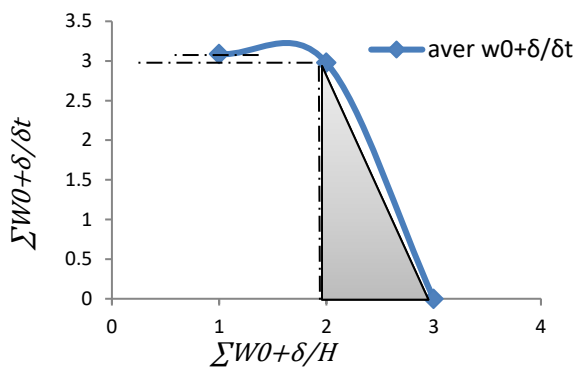
اختلاف جابجایی در رویه‌های فوقانی و تحتانی در فاصله از مرکز r متناظر حداقل ۱۰ میلیمتر می‌باشد. اثر لهیدگی شیارها و چین خوردگی در مقادیر بدست آمده بر تغییر شکل ورق تحتانی مشهود است. نمودار (۱)، کار پلاستیک ورق‌های تحتانی نمونه‌های تجربی بر حسب میزان جابجایی عرضی ورق - فاصله از مرکز r را ارائه می‌دهد. بیشینه جابجایی عرضی آزمایش تجربی (۱) با مقدار کار پلاستیک ۲۴ ژول همراه است که این مقدار در آزمایش (۲) به ۲۷ ژول می‌رسد. از طرفی کار پلاستیک آزمایش (۱) در شعاع ۰/۰۵۵ متری ورق دایروی، ۲۱ ژول و در آزمایش (۲) ۲۳ ژول را نشان می‌دهد. نمودار انرژی نسبت به جابجایی عرضی از مرکز ورق تا فاصله ۰/۰۷۵ متر از مرکز ورق همگرا شده و سپس تا شرط مرزی گیردار بتدریج کاهش و در نهایت به صفر میل می‌کند. تغییرات هر دو نمودار (جابجایی عرضی و انرژی) در فاصله ۰/۰۷۵ تا مرز گیردار بصورت خطی می‌باشند. منحنی جابجایی نشان می‌دهد کشش و جابجایی ماده از شعاع ۰/۰۷۵ متر تا مرکز ورق با سرعت بیشتری همراه است. رفتار ماده در مرز گیردار به دلیل عدم جابجایی عرضی با کشش همراه است. شیب منحنی کار پلاستیک در پیرامون ورق نسبت به قسمت‌های میانی آن، بیانگر انرژی صرف شده در کشیدگی ورق است. اختلاف انرژی صرف شده در محدوده لبه گیردار تا شعاع ۰/۰۷۵ متر نسبت به مرکز ورق تا نقطه تلاقی ۰/۰۷۵ متر ۵ ژول می‌باشد. اثر وجود هسته‌ها و انرژی جذب شده توسط آنها بر مقدار جابجایی میانه سازه با در نظرگیری شیب ایجاد شده در طرفین نقطه تلاقی مشهود است.



نمودار ۲ میزان کارپلاستیک - جابجایی عرضی ورق تحتانی

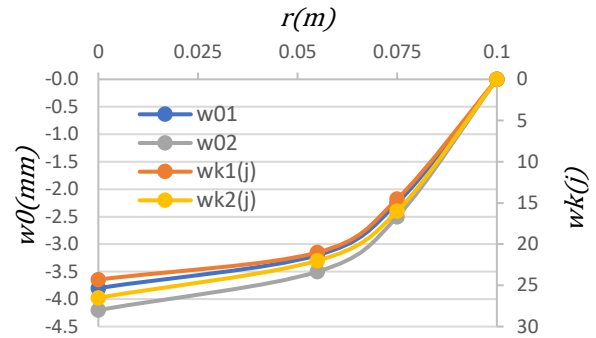
Diagram 2 Amount of plastic work - Transverse displacement of the bottom plate

در آزمایش ۳) بارموثر انفجار صرفاً از طریق خمش و کشیدگی در ورق جذب می‌شود و در سازه ساندویچی نسبت جذب انرژی انقباض لوله به ضخامت ورق $2/3$ افزایش می‌یابد. کسر سطح ناحیه مثلی از سطح کلی زیر منحنی تا خط شاخص عمود، کاهش اثر ضخامت ورق و کیفیت عملکرد هسته‌های لوله‌ای را بیان می‌کند.



نمودار ۳ نسبت جابجایی عرضی به لهیدگی هسته - جابجایی عرضی به ضخامت ورق (بر حسب شماره آزمایش)

Diagram 3 Ratio of transverse displacement to core crushing - transverse displacement to plate thickness (according to test number)



نمودار ۱ کار پلاستیک متناظر با جابجایی عرضی و فاصله از مرکز

Diagram 1 Plastic work corresponding to transverse displacement and center distance

در نمودار ۲) منحنی کارپلاستیک - جابجایی بمنظور تعیین ضریب اسکالر تناسب $d_\lambda = \frac{w_0 \partial \sigma_{ij}}{\partial w_k(\sigma_{ij})}$ با تعریف چگالی انرژی کرنشی u و با در نظرگیری سطح زیرمنحنی ارائه شده است.

از بیشینه جابجایی در مرکز ورق و تنش تسلیم، نسبت $d_\lambda > 0$ حاصل می‌شود که شرط نمو کرنش پلاستیک $j_2 = k^2$ و تداوم تغییر شکل پلاستیک است [31]. بنابراین شرایط پایدار این منحنی تا حالت لهیدگی کامل شیارها و جذب انرژی در بارگذاری و جابجایی بیشتر، استمرار دارد. از طرفی داده‌های کار پلاستیک مشتمل بر مقادیر جابجایی عرضی است که در واقع نمودار ۲) تغییرات طی نیروی اعمالی را در نقاط دور از شرط مرزی ارائه می‌دهد.

مقادیر کارپلاستیک مربوط به سازه‌ها در جدول (۵) به روش تحلیلی و تجربی برای اجزای آنها مقایسه شده است. در نمودار شکل (۳) نسبت کل جابجایی عرضی رویه فوقانی به میزان له‌شدگی در فواصل معین از مرکز سازه $\Sigma \frac{W_0+\delta}{\delta_t}$ با نسبت جابجایی عرضی رویه فوقانی به ضخامت صفحه $\Sigma \frac{W_0+\delta}{H}$ به صورت تجربی مقایسه شده است. نسبت اثر کار پلاستیک انقباض لوله‌ها به ضخامت ورق بر جابجایی با کوچک بودن مقدار اسکالر رابطه $\Sigma \frac{W_0+\delta}{\delta_t}$ سنجیده می‌شود.

جدول ۵ مقایسه مقادیر کار پلاستیک در روش‌های تجربی و تحلیلی (ژول)

Table 5 Comparison of plastic work values in experimental and analytical methods (Joules)

Grp	Test code	Plastic work of plates					Plastic plate of cores				
		Bottom plate		Top plate		Energy level difference (%)	Cores Number				
		Exp	Analyt	Exp	Analyt		Total core (Analyt)	11		12..15	
								Exp	Analyt	Exp	Analyt
	(1)	28.0	24.3	168.1	144.44	14.0	281.8	69.0	63.8	240	218
1	(2)	31.1	26.5	175.0	151.0	15.0	278.4	71.0	65.3	234	213.1
2	(3)	0	0	210.1	183	13	0	-	-	-	-

۵- نتیجه گیری

در این مقاله پاسخ دینامیکی سازه ساندویچی با هسته لوله عمودی با شیار محیطی تحت بار انفجار بررسی شد. در روش تحلیلی، روابط مورد نظر بر اساس هندسه اجزاء در آزمون‌های تجربی تعریف شده‌اند.

داده‌های به دست آمده از روش تحلیلی با مقادیر به دست آمده از آزمون‌های تجربی مربوطه مقایسه گردید. انطباق مناسبی در میزان انرژی جذب شده توسط روش تحلیلی و روش تجربی برای سازه با هسته لوله عمودی شیاردار مشاهده گردید. مشخص شد که فشردگی و جذب انرژی توسط هسته‌ها در سازه با هسته لوله عمودی شیاردار نسبت به سازه بدون هسته قابل توجه بوده و جابجایی ایجاد شده در رویه فوقانی تا ۲۰ درصد کاهش یافته است. اثر هسته‌های شیاردار در جرم کلی سازه تاثیر چندانی ندارند در حالیکه افزایش مقاومت سازه را به همراه دارند. همچنین وجود هسته‌های شیاردار صلبیت سازه را نسبت به نتایج سازه با لوله عمودی بدون شیار در تحقیقات پیشین کاهش داده و نقش کمتر ورق تحتانی در جذب انرژی را بدنبال دارد. در بخش جدارنازک هسته جذب انرژی سریعتر و در بخش دیگر هسته، انتقال بیشتر انرژی انجام می‌گیرد. برآمدگی و فرورفتگی‌های مختصر در سطوح رویه‌ها، بیانگر مقاومت کمتر لوله‌ها نسبت به رویه‌ها در برابر بار اعمال شده می‌باشد. حال آنکه متغیرهای تناسب تعداد، قطر، ارتفاع و ضخامت لوله‌ها می‌تواند در این میزان جذب انرژی موثر باشد.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: تعارض منافی برای اظهار وجود ندارد.

فهرست علائم

σ_0	تنش تسلیم ورق
H	ضخامت ورق
$\dot{W}_e$	نرخ کار خارجی انجام شده در لحظه t
$\dot{E}_c$	نرخ تغییرات انرژی جنبشی در لحظه t
$\dot{W}_p$	نرخ کار ناشی از تغییر شکل پلاستیک (یا انرژی کرنشی پلاستیک)
q	ثابت ماده
D	ثابت ماده
$\dot{\epsilon}_m$	نرخ کرنش میانگین
n	سختی (۰/۲۵)
K	ضریب مقاومت (۵۸۰)
D_1	قطر خارجی لوله‌ها
w	جرم ماده منفجره (کیلوگرم)
s	فاصله از ماده منفجره (متر)
J_0	تابع بسل مرتبه صفر نوع اول
R	به ترتیب جابجایی عرضی ورق

δ	میزان لهیدگی هسته فلزی
t	زمان فرآیند (sec)
E	انرژی جنبشی (ژول)
L_1	طول هسته‌های لوله‌ای
I	ایمپالس حاصل از انفجار
V_0	سرعت اولیه
p_0	فشار ناشی از انفجار
j_2	تغییر ناپذیر دوم تنش انحرافی
k^2	تنش برشی

منابع

- [1] Ru-Yang .Yao, Wen-Qian .Hao, Guan-Sheng .Yin , Bei. Zhang, "Analytical model of circular tube with wide external circumferential grooves under axial crushing," International Journal of Crashworthiness. doi: 10.1080/13588265.2019.1617096.
- [2] Vivek. P, Gaurav. T, Ravikumar. D , "Review of the crushing response of collapsible tubular structures," Front. Mech. Eng. 2020, 15(3): 438-474 doi:10.1007/s11465-019-0579-1.
- [3] Alexander. J.M, "An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading," Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, 1960, 13(1): 10-15. doi: 10.1093/qjmam/13.1.10
- [4] Abramowicz .W, Jones. N, " Dynamic axial crushing of circular tubes," International Journal of Impact Engineering. 1984, 2(3): 263-281. doi: 10.1016/0734-743X(84)90010-1
- [5] Jones. N, " Energy-absorbing effectiveness factor," International Journal of Impact Engineering. 2010, 37(6): 754-765 . doi:10.1016/j.ijimpeng.2009.01.008
- [6] Luo. X, Xu. J, Zhu. J, " A new method to investigate the energy absorption characteristics of thin-walled metal circular tube using finite element analysis," Thin-Walled Structures. 2015, 95: 24-30. doi: 10.1016/j.tws.2015.06.001
- [7] Singace .A. A, Elsobky. H, Reddy .T .Y, " On the eccentricity factor in the progressive crushing of tubes," International Journal of Solids and Structures. 1995, 32(24): 3589-3602. doi:10.1016/0020-7683(95)00020-B
- [8] Gupta. N, Gupta. S, " Effect of annealing, size and cut-outs on axial collapse behavior of circular tubes," International Journal of Mechanical Sciences. 1993, 35(7): 597-613. doi: 10.1016/0020-7403(93)90004-E
- [9] Karagiozova.D, Jones. N, " Dynamic effects on buckling and energy absorption of cylindrical shells under axial impact," Thin-Walled Structures, 2001, 39(7): 583-610 . doi:10.1016/S0263-8231(01)00015-5.
- [10] Farmani .S .M , Babaei. H, Alitavoli. M, Haghgoo . M, " Numerical and Experimental Investigation of Deformation of Circular Sandwich Plates with Vertical Metal Tube Core Under Free Blast Load," Modares

- Vol. 14, No. 6, December 2009, 601–611. doi: [10.1080/13588260902896466](https://doi.org/10.1080/13588260902896466).
- [22]- Jones. N, " Structural impact, " Cambridge university press; 2011 Dec 26.
- [23] Farmani .S .M, Alitavoli. M, Babaei .H , "Investigation of dynamic response of circular sandwich plates with metal vertical tubes core under blast load, " J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.2024 ;46, 150 doi: [10.1007/s40430-024-04707-2](https://doi.org/10.1007/s40430-024-04707-2)
- [24] Darvizeh.A,Gharababaei .H, " Experimental and Analytical Investigation of Large Deformation of Thin Circular Plates Subjected to Localized and Uniform Impulsive Loading, " Mechanics Based Design of Structure and Machines: An International Journal, 38:2, 171-189. doi: [10.1080/15397730903554633](https://doi.org/10.1080/15397730903554633)
- [25] Mirzababaei. M.T, Babaei H, Alitavoli M, " Theoretical analysis on the effect of uniform and localized impulsive loading on the dynamic plastic behavior of fully clamped thin quadrangular plates, " Thin-Walled Struct. 109 (2016),PP. 367–376. doi: [10.1016/j.tws.2016.10.009](https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.10.009)Get rights and content
- [26] Hanssen .A.G, Langseth. M, Hopperstad OS, "Static and dynamic crushing of square aluminium extrusions with aluminium foam filler, " Int. J. Impact Eng. 24 (5) (1999) 475–507. doi:[10.1016/S0734-743X\(99\)00170-0](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(99)00170-0)
- [27] Zhang. X, Leng. K, Zhang .H, " Axial crushing of embedded multi-cell tubes, " Int. J.Mech. Sci. 131–132 (2017) 459–470. doi:[10.1016/j.ijmecsci.2017.07.019](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.07.019)
- [28] P.s.Westine and W.E. Baker , " Energy solution for predicting deformation in blast loaded structures, " proc.19 th Explosive safety seminar, Hollywood Beach,Florida,U.S.A, PP.849-879(1974).
- [29] Zaera . R, Arias. A, Navarro C, " Analytical Modeling of Metallic Circular Plates to Impulsive Loads, " Int. J. Solids and Structures. 2002; Vol. 39, PP 659-672. doi:[10.1016/S0020-7683\(01\)00101-9](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(01)00101-9)
- [30] Liaghat .G, Azad S. Z , " Analysis of explosive and moldless forming of two-layer circular plate with Using the principle of energy conservation , "Journal of Algorithms and Computation. Modares Mechanical Engineering. 1387;42(1):1862. doi: [10.22059/JAC.2013.7734](https://doi.org/10.22059/JAC.2013.7734)
- [31] Wai. Fah. C, " Plasticity for Structural Engineers, " Springer; 1st edition (1988).
- Mechanical Engineering. 2023;23(12):673-683 doi:[10.48311/MME.23.12.673](https://doi.org/10.48311/MME.23.12.673)
- [11] H. M.Wen a , T. X. Yu a , Reddy T.Y, " A Note on Clamped Circular Plates under Impulsive Loading, " Mechanics of Structures and Machines: An International Journal. 2007. doi:[10.1080/08905459508905241](https://doi.org/10.1080/08905459508905241).
- [12] farmani .M, Shamami .M. Z, Alitavoli .M, " Experimental and analytical study of transverse displacement of plates in a circular sandwich structure with vertical metal tube cores under free blast load, " Modares Mechanical Engineering.
- [13] Gerami. A,Vahidi. H,Ahmadi , Liaghat .G, " Experimental Analysis of Impact Loading on Sandwich Panels with Glass/Epoxy Composite Faces and Cork Core, " Modares Mechanical Engineering. 2025;25(01):55-63.
- [14] Khodaeipour. B, Khodarahmi. H ,SadeghYazdi .M, Ziya-Shamami .M, " Numerical and Experimental Study of Damage in Multi-Compartment Armor due to UNDEX," Modares Mechanical Engineering. 2024;24(08):499-509.
- [15] Motamedi. M.A , Hashemi R, " Evaluation of Temperature Effects on Forming Limit Diagrams of AA6061-T6 Considering the Marciniak and Kuczynski Model, " Journal of Testing and Evaluation. 2019 Jun 28;49(2),PP.854-65. doi:[10.1520/JTE2019001](https://doi.org/10.1520/JTE2019001)
- [16] Corbett.b.m, " Numerical simulations of target hole diameters for hypervelocity impacts into elevated and room temperature bumpers, " International Journal of Impact Engineering. 33 (2006) 431–440. doi:[10.1016/j.ijimpeng.2006.09.086](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2006.09.086)
- [17] Farahani . A and Hadianfard .M. A, " Blast Loading and Evaluation of Nonlinear Response of Structural Buildings, " Ferdowsi Journal of Civil Engineering. 2013;26,1. doi:[10.1016/j.ijimpeng.2006.09.086](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2006.09.086)
- [18] Unified Facilities Criteria (UFC), " Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, U. S. Army Corps of Engineers, " Naval Facilities Engineering Command, Air Force Civil Engineer Support Agency, UFC 3-340-02, 5 December (2008).
- [19] Abramowicz .W, Jones. N, " Dynamic axial crushing of square tubes, " International Journal of Impact Engineering. 1984, 2(2): 179–208. doi: [10.1016/0734-743X\(84\)90005-8](https://doi.org/10.1016/0734-743X(84)90005-8)
- [20] Darvizeh.A,Gharababaei.H, Darvizeh. M, " Analytical and experimental studies for deformation of circular plates subjected to blast loading, " Journal of Mechanical Science and Technology .24 (9) (2010) 1855~1864. doi: [10.1007/s12206-010-0602-2](https://doi.org/10.1007/s12206-010-0602-2).
- [21] Mokhtarnezhada.F, Salehghaffaria.S and Tajdari.M , "Improving the crashworthiness characteristics of cylindrical tubes subjected to axial compression by cutting wide grooves from their outer surface , " International Journal of Crashworthiness.