



# Dynamic Response of Circular Metal Sandwich Panels with Tubular Cores Under Blast Load

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Ghamrizadeh M.<sup>1</sup>,  
Khodarahmi H.<sup>1\*</sup>,  
Mirzababaie Mostofi T.<sup>2</sup>

### How to cite this article

Ghamrizadeh M, Khodarahmi H, Mirzababaie Mostofi T. Dynamic Response of Circular Metal Sandwich Panels with Tubular Cores Under Blast Load. Modares Mechanical Engineering. 2021;21(10):673-683.

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran.

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

### \*Correspondence

Address: Faculty of Engineering, Imam Hossein Comprehensive University, Shahid Babaei Highway, Tehran, Iran.

Phone:

Fax: -

hkhdrhmi@ihu.ac.ir

### Article History

Received: April 23, 2021

Accepted: May 15, 2021

ePublished: 8 August, 2021

## ABSTRACT

Sandwich panels that can be used as an explosion shield are important structures for absorbing explosion energy. Crushing and plastic deformation of the core with the plastic bending of the faces are the main factors in absorbing the explosion energy in this sandwich panel. Structural components undergo permanent deformation after explosion and energy absorption. In this paper, the energy absorption of the structure and the deformation of circular metal sandwich panels with tubular core under explosion load have been investigated analytically, numerically, and experimentally. The tubes are arranged radially and symmetrically in the core constructions. The experiment has been performed by making sandwich panels under free blast load to evaluate and validate analytical and numerical results. The analytical solution is performed using the energy method by balancing the kinetic energy and the plastic work which is done by the different components of the sandwich panels. A numerical solution is performed in finite element software, ABAQUS, and the pressure function is generated by CONWEP method. The amount of energy absorbed by the structure and different parts of it is obtained. There is good agreement between the results in different ways.

**Keywords** Dynamic Response, Explosion Load, Sandwich Panels, Tube Core

## CITATION LINKS

[1] Blast response of cladding sandwich panels with tubular cores. [2] Blast resistance of metallic tube-core sandwich panels. [3] Blast response of sandwich beams with thin-walled tubes as core. [4] Experimental and Analytical Investigation of Large Deformation of Thin Circular Plates Subjected to Localized and Uniform Impulsive Loading. [5] Experimental and numerical analysis of tube-core claddings under blast loads. [6] An investigation of the combined size and rate effects on the mechanical responses of FCC metals. [7] Numerical investigation of the response of sandwich-type panels using thin-walled tubes subject to blast loads. [8] A simplified model of Brazier effect in plastic bending of cylindrical tubes. [9] Structural impact. [10] Airblast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical surface burst. [11] Impulsive loading of a simply supported circular rigid plastic plate. [12] Theoretical analysis on the effect of uniform and localized impulsive loading on the dynamic plastic behaviour of fully clamped thin quadrangular plates. [13] Large transverse deformation of double-layered rectangular plates subjected to gas mixture detonation load. [14] Closed-form analytical analysis on the effect of coupled membrane and bending strains on the dynamic plastic behaviour of fully clamped thin quadrangular plates due to uniform and localized impulsive loading. [15] Repeated localized impulsive loading on monolithic and multi-layered metallic plates. [16] Simulation of St12 guillotine section of steel sheet using Johnson-cook damage model.

## پاسخ دینامیکی ورق‌های ساندویچی مدور فلزی با هسته لوله‌ای تحت بار انفجار

مجتبی قمری زاده

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران.

حسین خدارحمی\*

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران.

توحید میرزابابای مستوفی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ایوان‌کی، ایوان‌کی، ایران.

### چکیده

ورق‌های ساندویچی سازه‌های مورد توجهی برای جذب انرژی انفجار و استفاده به‌عنوان سپر انفجار می‌باشند. لهیدگی و تغییر شکل پلاستیک هسته به همراه خمش پلاستیک رویه‌های ورق ساندویچی مهم‌ترین عوامل جذب انرژی انفجار در این سازه‌ها می‌باشند. اجزا سازه پس از انفجار و جذب انرژی دچار تغییر شکل دائمی می‌شوند. در این مقاله به روش تحلیلی، عددی و تجربی جذب انرژی اجزاء مختلف و تغییر شکل ورق‌های ساندویچی مدور فلزی با هسته لوله‌ای تحت بار انفجار بررسی شده است. چیدمان لوله‌های هسته دارای ترکیب شعاعی غیرهمرس است و به شکل منظمی در هسته تعبیه شده‌اند. آزمایش تجربی با ساخت ورق ساندویچی به روش انفجار آزاد و به‌منظور ارزیابی و صحت سنجی نتایج تحلیلی و عددی انجام شده است. حل تحلیلی به کمک روش انرژی و از تعادل انرژی جنبشی و کار پلاستیک انجام شده به‌وسیله اجزاء مختلف سازه، انجام شده است. حل عددی در نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS انجام شده است و تابع فشار به روش CONWEP تولید شده است. خیز سازه و میزان انرژی جذب شده توسط سازه و بخش‌های مختلف آن به‌دست آمده است. انطباق خوبی بین نتایج به روش‌های مختلف وجود دارد.

**کلیدواژه‌ها:** پاسخ دینامیکی، بار انفجار، ورق ساندویچی، هسته لوله‌ای

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۲۵

\* نویسنده مسئول: hkhdrhmi@ihu.ac.ir

### ۱- مقدمه

سازه‌های ساندویچی از گزینه‌های مورد تأکید برای جذب انرژی انفجار و استفاده به‌عنوان سپر انفجار هستند. ساختار ساندویچی با هسته لوله‌ای متقارن جهت استفاده در سیستم‌هایی پیشنهاد می‌شود که سازه جاذب انرژی دارای ساختاری مدور و متقارن باشند. از موارد کاربرد چنین ساختارهایی می‌توان به استفاده آن‌ها در بدنه موشک‌ها اشاره نمود. برای مثالی در مورد کاربرد سپرهای انفجاری می‌توان به استفاده آن‌ها در سرچنگی دومرحله‌ای در موشک‌ها و راکت‌ها اشاره نمود که برای جلوگیری از آسیب و اثرات نامطلوب انفجار مرحله اول بر مرحله دوم به‌کاربرده می‌شود. تحقیقات زیادی برای بررسی پاسخ دینامیکی ورق‌های ساندویچی مدور فلزی با هسته‌های رایجی مانند لانه‌زنبوری، پروفیل‌های فلزی و فوم‌های فلزی و غیرفلزی انجام شده است. در زمینه سازه‌های ساندویچی با هسته لوله‌ای شعاعی تحقیقاتی انجام نشده است. تحقیقات کمی برای سازه‌های ساندویچی با هسته‌های

لوله‌ای با چیدمان موازی انجام شده است که غالباً به روش تجربی و عددی است و به روش تحلیلی تحقیقاتی در این زمینه انجام نشده است. یوون و همکاران در سال ۲۰۱۷ پاسخ ورق‌های ساندویچی با هسته لوله‌ای آلومینیومی و فولادی در برابر بار انفجار را به روش تجربی مورد بررسی قرار دادند. لوله‌های تشکیل‌دهنده هسته، با و بدون فوم پرکننده پلی‌اورتان هستند و با چیدمان‌های مختلف برای ساختن ۴ نوع سازه مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق ورق‌های ساندویچ با هسته لوله‌ای دارای پرکننده، عملکرد بهتری نسبت به هسته‌های لوله‌ای بدون پرکننده دارند. همچنین پرکننده‌های پلی‌اورتان دارای عملکرد بهتری نسبت به پرکننده‌های پلی‌اتیلن و پلی‌استیلن هستند. هسته‌های با تعداد لوله بیشتر و با فاصله کمتر دارای عملکرد بهتری نسبت به هسته‌های با وزن و تعداد کمتر لوله هستند<sup>[1]</sup>. ژیا و همکاران در سال ۲۰۱۶ مقاومت در برابر انفجار ورق‌های ساندویچی با هسته لوله‌ای را به روش تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش ماده منفجره تغییر شکل ورق ساندویچی افزایش یافته و همچنین با افزایش تعداد لوله‌ها مقاومت در برابر انفجار نیز افزایش می‌یابد<sup>[2]</sup>. ژیانگ و همکاران در سال ۲۰۱۶ به روش تجربی و عددی مقاومت در برابر انفجار تیرهای ساندویچی با هسته ساخته شده از لوله‌های جدار نازک را مورد بررسی قرار دادند. در مطالعه آن‌ها محور لوله‌های هسته عمود بر محور تیر است. آزمایش با جرم‌های مختلف ماده منفجره در فواصل مختلف انجام گرفت. اثر قطر، ضخامت و تعداد لوله‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. مهم‌ترین نتیجه آن‌ها این است که تیرهای ساندویچی با هسته‌های مدور عملکرد بهتری نسبت به تیرهای ساندویچی با هسته مربعی دارند<sup>[3]</sup>. قره‌بابایی و همکاران در سال ۲۰۱۰ به روش تحلیلی و عددی تغییر شکل‌های بزرگ ورق‌های مدور تحت بار انفجاری یکنواخت و موضعی را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها از روش انرژی برای حل تحلیلی خود استفاده نمودند<sup>[4]</sup>. تنوبلد و همکاران در سال ۲۰۱۰ به روش تجربی و عددی<sup>[5]</sup> و در سال ۲۰۰۶ به روش عددی<sup>[7]</sup> پاسخ ورق‌های ساندویچی با هسته‌های ساخته شده از لوله‌های جدار نازک فولادی و آلومینیومی با مقطع مربعی در برابر بار انفجار را مورد مطالعه قرار دادند. در مطالعه آن‌ها جهت لوله‌ها عمود بر سطح رویه‌های ورق ساندویچی است. اثر مقدار ماده منفجره، جنس و تعداد لوله‌های هسته در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است و مقادیر له‌شدگی لوله‌های هسته بر حسب تعداد لوله‌ها به روش‌های تجربی و عددی مورد مقایسه قرار گرفته است. ژئو و همکاران در سال ۲۰۰۷ تأثیر نرخ کرنش را در محاسبه مقدار کار پلاستیک انجام شده در روش‌های تحلیلی مورد مطالعه قرار دادند. لهیدگی و تغییر شکل پلاستیک هسته به همراه خمش پلاستیک رویه‌های ورق ساندویچی مهم‌ترین عامل جذب انرژی انفجار است و سازه پس از انفجار و جذب انرژی دچار تغییر شکل دائمی قابل توجهی می‌شود. لوله‌ها به‌عنوان بخش مهم سازه و تشکیل‌دهنده هسته تحت اثر انفجار علاوه بر خمش دچار لهیدگی نیز می‌شوند. جذب انرژی انفجار توسط لوله‌های هسته توسط

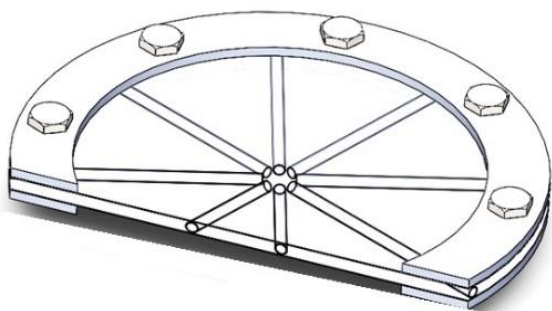
سازه با کار پلاستیک انجام شده به وسیله اجزاء مختلف سازه در فرآیند تغییر شکل و در طی بارگذاری انفجاری به دست می‌آید. انرژی جنبشی برای لحظه‌ای محاسبه می‌شود که هنوز هیچ‌گونه تغییر شکلی در سازه رخ نداده است. کار پلاستیک ناشی از انفجار هم برای لحظه‌ای محاسبه می‌شود که همه انرژی جنبشی وارد به سازه در اثر تغییر شکل‌های رویه‌های تحتانی و فوقانی و همچنین تغییر شکل ناشی از له‌شدگی و خمش لوله‌های هسته مستهلک شده باشد و تغییر مکان نهایی در سازه حاصل شده باشد.

## ۱-۲- بیان مسئله

در این مسئله ورق ساندویچی مورد بررسی قرار می‌گیرد که نمای برش خورده آن مشابه آنچه به‌طور طرح‌واره در شکل ۱ نشان داده شده است بین دو کلمپ فولادی نصب شده است و تحت بارگذاری انفجار آزاد قرار دارد.

در این روش، ابتدا سازوکار حاکم بر تغییر شکل تعریف می‌شود. در این سازوکار مقطع نیمی از هندسه تغییر شکل سازه شامل رویه‌ها و لوله‌های هسته به‌طور طرح‌واره در شکل (۲) نشان داده شده است. رویه‌های سازه بعد از انفجار و تغییر شکل با خط‌چین نشان داده شده است. لوله‌های هسته سازه قبل از تغییر شکل دارای مقطعی دایروی هستند. در این شکل سازه ورق مدور ساندویچی دارای شعاعی برابر  $R$  و لوله‌های هسته دارای قطر خارجی برابر  $D$  هستند. در این شکل، همانطور که در ادامه هم بیان خواهد شد، به دلیل اینکه از کرنش رویه‌های ساندویچ‌پنل در جهت ضخامت صرف نظر شده است، ضخامت در فرآیند تغییر شکل و در فرآیند بارگذاری انفجاری تغییر نمی‌کند و لذا با توجه به ثابت بودن ضخامت بدون آنکه اشکالی در صحت مسئله به‌وجود بیاید، از بیان آن در شکل ۲ چشم‌پوشی شده است.

پس از بارگذاری انفجاری، رویه تحتانی دارای خیز بیشینه‌ای به مقدار  $W_0$  در مرکز سازه می‌شود. لوله‌های هسته هم به‌اندازه  $\delta$  دچار له‌شدگی می‌شوند. همچنین رویه فوقانی هم دارای خیز بیشینه‌ای به مقدار  $W_0 + \delta$  در مرکز سازه می‌شود. لازم به ذکر است در این روش همه شاخصه‌های لازم برای بررسی پاسخ سازه و جذب انرژی برحسب خیز بیشینه رویه تحتانی به مقدار  $W_0$  در مرکز سازه محاسبه خواهد شد.



شکل ۱) نمای برش خورده سازه بین دو کلمپ

سازوکار تشکیل لوله‌های پلاستیک تحت اثر خمش و لهیدگی پلاستیک انجام می‌شود<sup>[6]</sup>. ویرزبکی و همکاران در سال ۱۹۹۷ به روش تحلیلی مدلی را برای بررسی تغییر شکل لوله‌های تحت خمش پلاستیک مورد بررسی قراردادند و میزان له‌شدگی آن را بررسی کردند<sup>[8]</sup>. جونز در سال ۱۹۸۹ به بررسی رفتار پلاستیک لوله‌ها و تشکیل لولای پلاستیک تحت بارگذاری‌های مختلفی پرداخته است و اثر نرخ کرنش را در بارگذاری‌های مختلف مورد مطالعه قرار داده است<sup>[9]</sup>. کینگری و همکاران در سال ۱۹۸۴ شاخصه‌های انفجار آزاد و انفجار کروی ماده منفجره TNT را مورد بررسی قرار داده است و رابطه فشار انفجار برحسب زمان را ارائه نمود. آن‌ها، علاوه بر این، تأثیر مهم نرخ کرنش در محاسبه مقدار کار پلاستیک انجام شده در روش تحلیلی را مورد بررسی قرار دارند<sup>[10]</sup>. جونز و همکاران در سال ۱۹۶۸ رفتار دینامیکی ورق‌های مدور تحت بار انفجاری با شرایط مرزی ساده را مورد مطالعه قراردادند<sup>[11]</sup>.

با مرور مطالعات پیشین و سایر تحقیقات موجود در مراجع<sup>[12-15]</sup> این نتیجه حاصل شد که تحقیقاتی برای پاسخ دینامیکی ورق‌های ساندویچی مدور با هسته لوله‌ای شعاعی وجود ندارد. تحقیقات کمی در مورد پاسخ دینامیکی ورق‌های ساندویچی غیرمدور با هسته لوله‌ای موازی وجود دارد که اغلب به روش تجربی و عددی انجام شده‌اند. مهم‌ترین نوآوری‌های تحقیق حاضر معرفی ساختار و سازوکار جدیدی برای جذب انرژی، بررسی تحلیلی رفتار ورق‌های ساندویچی مدور با هسته لوله‌ای شعاعی غیر هم‌مرس، استخراج معادله حاکم و به دست آوردن مؤلفه‌های پاسخ دینامیکی اجزاء مختلف سازه برحسب یک شاخصه است. تحلیل در بخش عددی نیز، با بهره‌گیری از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس و پس از صحت‌سنجی نتایج عددی به کمک نتایج آزمایشگاهی انجام شده در این تحقیق، انجام شده است. نتایج تحلیلی و عددی برای ساختارهایی با هسته‌های دارای سه چیدمان ۶، ۸ و ۱۰ لوله‌ای شعاعی، سه ضخامت رویه‌های مختلف ۱، ۱/۱ و ۱/۲ میلی‌متر و لوله‌های هسته‌ها با دو مقطع مختلف با قطرهای داخلی ۸ و ۱۰ میلی‌متر و قطرهای متناظر خارجی ۱۰ و ۱۲ میلی‌متر تحت بار انفجاری انجام شده است و نتایج با هم مقایسه شده‌اند.

## ۲- روش تحلیلی

در این مقاله از روش انرژی برای حل تحلیلی پاسخ دینامیکی سازه استفاده شده است. مهم‌ترین مزیت استفاده از روش انرژی استقلال آن از مسیر است. در این روش مقدار انرژی در ایستگاه‌های موردنیاز محاسبه می‌شود و مسیر طی شده بین ایستگاه‌ها برای حل مسائل اهمیتی پیدا نمی‌کند. دو ایستگاه محاسباتی در این مسئله شامل لحظه سرعت گرفتن سازه قبل از تغییر شکل و لحظه توقف کامل سازه پس از تغییر شکل نهایی کل سازه است. مزیت استقلال روش انرژی از مسیر، کمک شایانی به حل مسائلی می‌کند که دارای هندسه‌ها و بارگذاری پیچیده هستند و حل آن‌ها با روش‌های تحلیلی دیگر با چالش‌هایی مواجه است. در این روش پاسخ سازه از برابر قرار دادن انرژی جنبشی وارد به

$$W_p = \int_V \sigma_d(\varepsilon_r + \varepsilon_\theta) dV = \int_0^R \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \sigma_d(\varepsilon_r + \varepsilon_\theta) 2\pi r dz dr \quad (۴)$$

از جایگزینی مؤلفه‌های کرنش (۳) در رابطه کار پلاستیک (۴) و با انتگرال‌گیری دوگانه روی شعاع و ضخامت و پس از انجام محاسبات ریاضی، نهایتاً کار پلاستیک رویه تحتانی به صورت رابطه (۵) برحسب ضخامت رویه، تنش تسلیم دینامیکی، پارامتر  $a_1$  و خیز بیشینه رویه تحتانی به دست می‌آید.

$$W_b = \frac{1}{2} \pi \sigma_d a_1 (HW_0^2 + H^2 W_0) \quad (۵)$$

### ۲-۲-۲- محاسبه کار پلاستیک رویه فوقانی

مطابق روش تعیین مقدار کار پلاستیک رویه تحتانی، برای محاسبه کار پلاستیک رویه فوقانی تغییر مکان رویه فوقانی هم به صورت زیر پیشنهاد می‌شود. این تابع نیز باید شرایط مرزی و تکیه‌گاهی را ارضا نماید و اکسترمم‌های آن در مرکز و تکیه‌گاه‌ها با فیزیک مسئله انطباق داشته باشد. این تابع با رابطه (۶) پیشنهاد شده است [11].

$$w_b(r) = (W_0 + \delta) \left( 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{a_2} \right) \quad 0 \leq r \leq R \quad (۶)$$

$a_2$  هم مشابه  $a_1$  برای تغییر مکان حاکم بر این رویه تعیین خواهد شد. برای تعیین کار پلاستیک در این رویه نیز لازم است کرنش‌های این رویه محاسبه شود. به طور مشابه رویه تحتانی، کرنش شعاعی  $\varepsilon_r$  و کرنش محیطی  $\varepsilon_\theta$  در نظر گرفته می‌شود و از کرنش‌های در جهت ضخامت چشم‌پوشی می‌شود. رابطه کرنش‌ها با تغییر مکان از روابط (۲) و (۶) عبارت‌اند از:

$$\varepsilon_r = (W_0 + \delta) a_2 \frac{r^{a_2-2}}{R^{a_2}} \left( (W_0 + \delta) a_2 \frac{r^{a_2}}{2R^{a_2}} + z(a_2 - 1) \right) \quad (۷)$$

$$\varepsilon_\theta = (W_0 + \delta) a_2 \frac{r^{a_2-2}}{R^{a_2}} z$$

کار پلاستیک رویه با انتگرال‌گیری از حاصل ضرب مؤلفه‌های کرنش در تنش دینامیکی روی حجم، به صورت رابطه (۸) به دست می‌آید.

$$W_p = \int_V \sigma_d(\varepsilon_r + \varepsilon_\theta) dV = \int_0^R \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \sigma_d(\varepsilon_r + \varepsilon_\theta) 2\pi r dz dr \quad (۸)$$

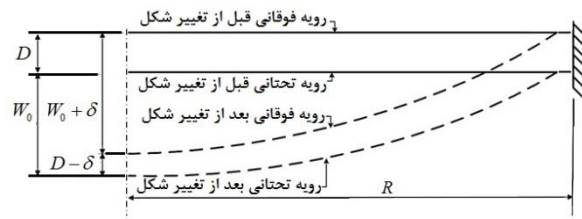
نهایتاً کار پلاستیک رویه فوقانی عبارت است از:

$$W_f = \frac{1}{2} \pi \sigma_d a_2 (H(W_0 + \delta)^2 + H^2(W_0 + \delta)) \quad (۹)$$

با تعریف  $\delta = \frac{\delta}{2R_m}$  میزان له‌شدگی هسته با استفاده از نظریه بیضوی شدن مقطع مدور هسته تحت اثر بار خمشی وارد بر سازه برای  $0.5 < \delta$  عبارت است از [8]:

$$\delta = 0.533 R_m^2 \kappa / H \quad (۱۰)$$

برای محاسبه میزان له‌شدگی لازم است مطابق رابطه (۱۰) ابتدا میزان شعاع انحنای  $\Gamma$  و سپس مقدار انحنای  $\delta$  به دست آید. لذا برای محاسبه شعاع انحنای سازه پس از تغییر شکل فرض می‌شود سازه



شکل ۲) هندسه نیمی از مقطع سازه قبل و بعد از تغییر شکل

انرژی جنبشی که ناشی از انفجار در سازه به وجود می‌آید به وسیله کار پلاستیک انجام شده در اجزا مختلف سازه مستهلک می‌گردد. کار پلاستیک در رویه‌های تحتانی، فوقانی و هسته سازه انجام می‌شود.

### ۲-۲-۲- محاسبه کار پلاستیک رویه‌ها

برای حل تحلیلی لازم است کار پلاستیک همه اجزاء سازه مانند رویه‌های تحتانی و فوقانی ورق سازه ساندویچی محاسبه شود. در ادامه با پیشنهاد توابعی برای تغییر مکان رویه‌های فوقانی و تحتانی مقدار کار پلاستیک رویه‌ها محاسبه می‌شوند.

### ۲-۲-۱- محاسبه کار پلاستیک رویه تحتانی

برای محاسبه کار پلاستیک رویه تحتانی تابعی به عنوان تابع تغییر مکان ناشی از بار انفجار رویه پیشنهاد می‌شود که به واقعیت و فیزیک مسئله نزدیک باشد و بتواند شرایط مرزی و تکیه‌گاهی را ارضا نماید. همچنین اکسترمم‌های تابع هم در مرکز و هم در تکیه‌گاه‌ها با فیزیک مسئله انطباق داشته باشد. این تابع با رابطه (۱) پیشنهاد شده است.

$$w_b(r) = W_0 \left( 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{a_1} \right) \quad 0 \leq r \leq R \quad (۱)$$

که در این رابطه  $a_1$  برای تغییر مکان حاکم بر این رویه تحتانی این مسئله تعیین خواهد شد.

برای تعیین کار پلاستیک لازم است کرنش‌های رویه محاسبه شود. در رویه کرنش شعاعی  $\varepsilon_r$  و کرنش محیطی  $\varepsilon_\theta$  در نظر گرفته می‌شود و از کرنش‌های در جهت ضخامت به دلیل کم بودن چشم‌پوشی شده است. رابطه کرنش شعاعی  $\varepsilon_r$  و کرنش محیطی  $\varepsilon_\theta$  با تغییر مکان به ترتیب عبارت است از [11]:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 - z \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \quad (۲)$$

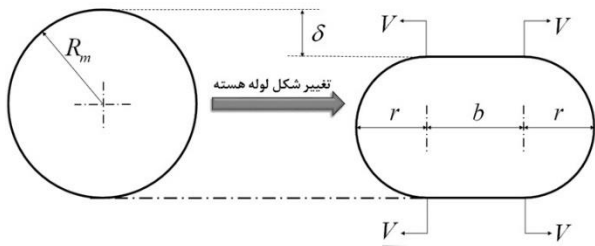
$$\varepsilon_\theta = -z \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r}$$

لذا از روابط (۱) و (۲) مقدار کرنش‌های شعاعی و محیطی به ترتیب عبارت‌اند از:

$$\varepsilon_r = W_0 a_1 \frac{r^{a_1-2}}{R^{a_1}} \left( W_0 a_1 \frac{r^{a_1}}{2R^{a_1}} + z(a_1 - 1) \right) \quad (۳)$$

$$\varepsilon_\theta = W_0 a_1 \frac{r^{a_1-2}}{R^{a_1}} z$$

با انتگرال‌گیری از حاصل ضرب مؤلفه‌های کرنش در تنش دینامیکی روی حجم، کار پلاستیک رویه به صورت رابطه (۴) به دست می‌آید.



**شکل ۳** مکانیزم تغییر شکل مقطع لوله از دایروی به بیضوی از شکل (۳) روابط هندسی زیر بین پارامترهای مختلف مقطع لوله قابل استخراج است.

$$2b + 2\pi r = 2\pi R_m \quad (14)$$

$$\delta = 2R_m - 2r$$

از این روابط مقدار  $r = R_m - \frac{\delta}{2}$  و سپس  $b = \frac{\pi}{2} \delta$  به دست می‌آید. به کمک این روابط و با توجه به شکل (۳) سرعت لولای پلاستیک به سمت چپ یا راست عبارت است از:

$$V = \frac{b}{2} = \frac{\pi}{4} \delta = -\frac{\pi}{2} \dot{r} \quad (15)$$

برای محاسبه کار پلاستیک ناشی از له‌شدگی هسته از تئوری حاکم بر فرآیند بیضوی شدن مقطع هسته تحت بار خمشی استفاده می‌شود. در لوله‌ای با رفتار صلب کاملاً پلاستیک به طول  $l \approx R$  که شعاع سازه ساندویچی است، نرخ کار پلاستیک ناشی از له‌شدگی هسته عبارت است از [8].

$$\dot{W}_{plasticwork} = \int_S (M_{ij} \dot{K}_{ij} + N_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}) dS + \sum_{k=1}^m \int_{L_k} M_n^{(k)} \dot{\psi}^{(k)} dL_k \quad (16)$$

که در این رابطه مؤلفه‌های گشتاورهای داخلی،  $N_{ij}$  مؤلفه‌های نیروهای داخلی  $\dot{K}_{ij}$  مؤلفه‌های نرخ انحنای،  $\dot{\epsilon}_{ij}$  مؤلفه‌های نرخ کرنش گشتاور خمشی بر واحد طول و عمود بر خط لولای  $n$  ام،  $\dot{\psi}$  نرخ چرخش  $M_n$  نسبی لولاهای پلاستیک  $k$  ام،  $L_k$  طول لولاهای پلاستیک  $k$  ام و  $m$  تعداد لولاهای پلاستیک تشکیل شده در فرآیند له‌شدگی است.

در مجموع ۳ مؤلفه برای نرخ کرنش‌های  $\dot{\epsilon}_{ij}$  شامل  $\dot{\epsilon}_{xx}$ ،  $\dot{\epsilon}_{x\theta}$ ،  $\dot{\epsilon}_{\theta\theta}$  و ۳ مؤلفه برای نرخ انحنای  $\dot{K}_{ij}$  شامل  $\dot{K}_{xx}$ ،  $\dot{K}_{x\theta}$  و  $\dot{K}_{\theta\theta}$  وجود دارد. با این فرض که از تغییر شکل برشی و پیچشی اجزای پوسته در لوله چشم‌پوشی می‌شود، لذا  $\dot{K}_{x\theta} = \dot{\epsilon}_{x\theta} = 0$  می‌شود. همچنین مبتنی بر مشاهدات تجربی فرض می‌شود که تغییر طول محیطی در مقطع لوله ایجاد نمی‌شود و بنابراین مقدار  $\dot{\epsilon}_{\theta\theta} = 0$  است. با توجه به ابعاد و هندسه تغییر شکل، انحنای در جهت طولی خیلی کوچک‌تر از انحنای محیطی است، لذا از مقدار  $\dot{K}_{xx}$  در مقایسه با  $\dot{K}_{\theta\theta}$  چشم‌پوشی می‌شود. همچنین با فرض اینکه نظریه کیرشهف در این مسئله صادق است، مقدار  $\dot{\epsilon}_{xx} = \dot{K}_z$  در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه بعد از اعمال فرضیات فوق بر رابطه نرخ کار پلاستیک

بخشی از یک منحنی مدور است که از نقطه  $(0, 0)$ ،  $(W_0, R)$  و  $(W_0, -R)$  عبور کرده است. با تعیین منحنی تغییر شکل، رابطه مقدار شعاع انحنای  $\Gamma$  و انحنای  $\kappa$  برحسب مشخصات هندسی و تغییر شکل سازه به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\frac{(R^2 + W_0^2)}{(2W_0)} = \Gamma = \frac{1}{\kappa} \quad (11)$$

بنابراین بیشینه میزان له‌شدگی هسته عبارت است از:

$$\delta = 0.2665 \frac{D_{average}^3}{H} \left( \frac{W_0}{R^2 + W_0^2} \right) \quad (12)$$

که  $D_{average}$  قطر میانگین لوله و برابر میانگین قطر داخلی و خارجی لوله‌های هسته است.

### ۲-۳- محاسبه کار پلاستیک هسته

برای آنالیز تحلیلی لازم است کار پلاستیک داخلی همه اجزاء سازه محاسبه شود. هسته سازه ورق ساندویچی از تعدادی لوله شعاعی منظم و غیرهمرس تشکیل شده است. کار داخلی پلاستیک هسته دارای دو بخش کار پلاستیک ناشی از خمش و کار پلاستیک ناشی از له‌شدگی است. در ادامه به روش تحلیلی کار پلاستیک ناشی از خمش و له‌شدگی هسته به طور مجزا محاسبه می‌شود.

### ۲-۳-۱- محاسبه کار پلاستیک خمش هسته

برای محاسبه کار پلاستیک ناشی از خمش لازم است زاویه به وجود آمده در محل لولای پلاستیک  $\theta_y$  و گشتاور خمشی پلاستیک کامل مقطع هسته به صورت رابطه (۱۳) مورد استفاده قرار گیرد و کار پلاستیک محاسبه شود [9].

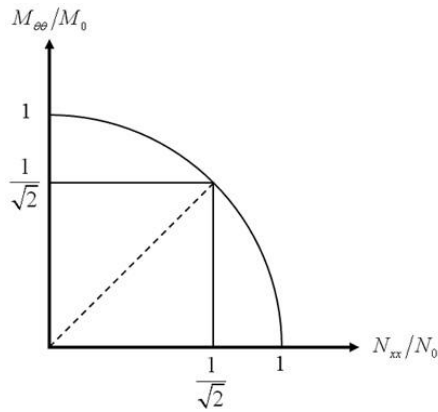
$$W_{bend} = M_y \theta_y = \left( \sigma_0 \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \left( \frac{D^3 - d^3}{\pi(D^2 - d^2)} \right) \right) (R^{-1} W_0) \quad (13)$$

$$= \left( \sigma_0 \frac{1}{4} (D^3 - d^3) \right) (R^{-1} W_0) = \frac{\sigma_0 W_0}{4R} (D^3 - d^3)$$

که  $\sigma_0$  تنش تسلیم در آزمون کشش ساده است. برای راحتی محاسبات بعدی و راحتی یافتن پاسخ سازه و محاسبه انرژی جذب‌شده، کار پلاستیک ناشی از خمش هسته هم برحسب خیز بیشینه رویه تحتانی محاسبه شده است.

### ۲-۳-۲- محاسبه کار پلاستیک له‌شدگی هسته

لوله‌های هسته که قبل از بارگذاری و تغییر شکل دارای مقطع دایروی شکلی هستند، پس از بارگذاری علاوه بر آنکه دچار خمش می‌شوند، دچار تغییر شکل یا اعوجاج و به بیان ساده‌تر دچار پدیده بیضوی شدن مقطع مدور خود نیز می‌شوند. برای محاسبه میزان له‌شدگی لوله‌های هسته، لوله‌ای در نظر گرفته می‌شود که قبل از بارگذاری دارای مقطع دایروی است و طول آن برابر  $l$  می‌باشد. تغییر شکل مقطع لوله ناشی از بارگذاری مطابق شکل (۳) فرض می‌شود.



شکل ۴) منحنی دقیق تسلیم و مربع حد پایین تسلیم محیط در آن

(۲۳) در نظر گرفته می‌شود. در واقع این نقطه بر حد پایین منحنی تسلیم واقع است.

$$\frac{\sigma_{\theta\theta}}{\sigma_0} = \frac{M_{\theta\theta}}{M_0} = \frac{\sigma_{xx}}{\sigma_0} = \frac{N_{xx}}{N_0} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (۲۳)$$

از شرایط تسلیم فرض شده در رابطه (۲۳) و با اعمال  $\frac{\sigma_{\theta\theta}}{\sigma_0} = \frac{1}{\sqrt{2}}$  بر رابطه نرخ کار پلاستیک داخلی ناشی از له‌شدگی (۲۱)، عبارت نهایی نرخ کار پلاستیک داخلی ناشی از له‌شدگی به صورت رابطه (۲۴) بیان می‌گردد.

$$\dot{W}_{crushing} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\pi t l}{4 R_m^2} M_0 \frac{\dot{\delta}}{1 - \delta} \quad (۲۴)$$

که در این رابطه  $l = R$  است. پس از جایگزینی شاخصه‌های لازم در رابطه (۲۴) و انجام محاسبات ریاضی و نهایتاً انتگرال‌گیری نسبت به زمان، کار پلاستیک ناشی از له‌شدگی هسته به صورت رابطه (۲۵) به دست می‌آید.

$$W_{crush} = - \frac{\pi t R}{4 \sqrt{2} \left( \frac{0.5D + 0.5d}{2} \right)^2} M_0 \ln \left( 1 - \frac{\delta}{2R_m} \right) \quad (۲۵)$$

که در این رابطه مقدار گشتاور کاملاً پلاستیک مقطع لوله قبل از تغییر شکل  $M_0$  عبارت است از:

$$M_0 = 4 \sigma_0 \left( \frac{D_{average}}{2} \right)^2 t = 4 \sigma_0 \left( \frac{D + d}{2} \right)^2 t \quad (۲۶)$$

#### ۲-۴- پاسخ سازه

در روش انرژی به کار گرفته شده در این مقاله، پاسخ سازه از برابری انرژی جنبشی و کار پلاستیک انجام شده توسط همه اجزاء سازه در فرآیند جذب انرژی به دست می‌آید.

انرژی جنبشی برای لحظه‌ای محاسبه خواهد شد که هیچ‌گونه تغییر شکلی در سازه رخ نداده است و کار پلاستیک سازه برای لحظه‌ای محاسبه خواهد شد که هیچ‌گونه حرکتی در سازه باقی نمانده باشد و سازه به وضعیت تغییر شکل نهایی خود رسیده باشد. مقدار انرژی جنبشی عبارت است از:

$$E_K = \frac{1}{2} m V_0^2 \quad (۲۷)$$

که  $m$  جرم کل سازه است.

داخلی (۱۶) عبارت (۱۷) برای بیان نرخ کار پلاستیک داخلی به دست می‌آید.

$$\dot{W}_{plasticwork} = \int_S \dot{N}_{xx} K z dS + \int_S M_{\theta\theta} \dot{K}_{\theta\theta} dS + 4 M_n l \dot{\psi} \quad (۱۷)$$

که عبارت اول مبین نرخ کار پلاستیک ناشی از خمش و عبارت‌های دوم و سوم مبین نرخ کار پلاستیک ناشی از له‌شدگی هستند. با توجه به شکل (۳) و مبتنی بر مشاهدات تجربی تعداد ۴ عدد لولای پلاستیک طولی مشابه در لوله به وجود می‌آید. ضریب ۴ در عبارت سوم رابطه (۱۷) مبین همین تعداد لولای پلاستیک تشکیل شده در فرآیند له‌شدگی هر لوله از لوله‌های هسته است. بنابراین با توجه به اینکه  $M_{\theta\theta} = \sigma_{\theta\theta} \left( \frac{t^2}{4} \right)$  است، پس از انتگرال‌گیری از عبارت دوم رابطه (۱۷) روی سطح لوله و جمع آن با عبارت سوم همین رابطه، نرخ کار پلاستیک ناشی از له‌شدگی لوله‌های هسته ورق ساندویچی به دست می‌آید:

$$\dot{W}_{crushing} = \dot{K}_{\theta\theta} 2 \pi r l M_{\theta\theta} + 4 M_n l \dot{\psi} \quad (۱۸)$$

با توجه به پارامترهای هندسی مقطع تغییر شکل یافته که از شکل (۳) و با استفاده از رابطه (۱۵) برای سرعت حرکت لولای پلاستیک به سمت چپ و راست، عبارت‌های زیر به ترتیب برای نرخ انحنا و نرخ چرخش نسبی طرفین لولای پلاستیک محاسبه می‌شود. این روابط برای طی فرآیند حل مسئله و ساده‌سازی آن مورد استفاده قرار می‌گیرند.

$$\begin{aligned} \dot{K}_{\theta\theta} &= - \frac{\dot{r}}{r^2} \\ \dot{\psi} &= - \frac{\pi \dot{r}}{2r} \end{aligned} \quad (۱۹)$$

با استفاده از روابط (۱۹) و با فرض اینکه گشتاور عمود بر لولای پلاستیک با گشتاور محیطی برابر است یعنی  $M_{\theta\theta} = M_n$  مقدار نرخ کار پلاستیک داخلی ناشی از له‌شدگی به صورت رابطه (۲۰) بیان می‌گردد.

$$\dot{W}_{crushing} = 4 \pi M_{\theta\theta} l \frac{\dot{\delta}}{1 - \delta} \quad (۲۰)$$

با توجه به اینکه  $M_{\theta\theta} = \sigma_{\theta\theta} \left( \frac{t^2}{4} \right)$  است و از طرفی  $M_0 = 4 \sigma_0 R_m^2 t$  است، لذا مقدار نرخ کار پلاستیک داخلی ناشی از له‌شدگی به صورت رابطه (۲۱) بیان می‌گردد.

$$\dot{W}_{crushing} = \frac{\pi t l}{4 R_m^2} M_0 \frac{\dot{\delta}}{1 - \delta} \left( \frac{\sigma_{\theta\theta}}{\sigma_0} \right) \quad (۲۱)$$

شرایط حاکم بر تسلیم به صورت کوپل بین تنش‌های محیطی و طولی به صورت رابطه (۲۲) در نظر گرفته می‌شود.

$$\left( \frac{M_{\theta\theta}}{M_0} \right)^2 + \left( \frac{N_{xx}}{N_0} \right)^2 = 1 \quad (۲۲)$$

برای سادگی معادلات حاصل از تحلیل، یک نقطه از منحنی تسلیم نشان داده شده در شکل (۴) به عنوان معیار تسلیم به صورت رابطه

می‌شود و سپس مدل مادی مواد تعریف می‌شود. با اعمال شرایط مرزی و بارگذاری انفجاری شبیه‌سازی عددی انجام و نتایج ثبت می‌گردد.

در این مقاله ۳ گروه به تفکیک تعداد لوله‌های هسته برحسب ضخامت رویه برای هسته‌ای با لوله‌هایی با مقطع ثابت و به ترتیب با قطر خارجی و داخلی ۱۲ و ۱۰ میلی‌متر مطابق جدول ۱ برای بررسی در نظر گرفته شده است. نتایج به روش‌های مختلف مطابق این گروه‌بندی ارائه خواهند شد.

### ۳-۱- مدل مادی

جهت ارزیابی اثر بارگذاری انفجار بر سازه‌ها، مشخصه‌های مکانیکی و حرارتی مواد نقش مهمی بر پاسخ نهایی دارند و تأثیر این پارامترها بر دقت نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی بسیار زیاد است؛ لذا در پژوهش حاضر، برای انجام شبیه‌سازی‌ها از مدل الاستو ویسکو-پلاستیک و شکست جانسون-کوک که پیش‌تر در سال ۱۹۸۵ میلادی ارائه شده، استفاده شده است که اثر نرخ کرنش و همچنین تغییرات دمایی را روی تنش تسلیم در نظر می‌گیرد. مدل الاستو ویسکو-پلاستیک جانسون-کوک شامل اثر تنش تسلیم، جریان پلاستیک، سخت‌شوندگی نرخ کرنش، ترموالاستیسیته خطی و نرم شدن به دلیل گرمایش آدیاباتیک است. این مدل با رابطه (۳۳) بیان می‌شود.

$$\sigma_y = [A + B\dot{\epsilon}_p^n][1 + C \ln(\dot{\epsilon}^*)][1 - (T^*)^m] \quad (33)$$

که:

$$\dot{\epsilon}^* = \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0} \text{ and } T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (34)$$

در این مدل  $A$  تنش تسلیم اولیه،  $B$  ضریب کرنش سختی،  $n$  توان کرنش سختی،  $\dot{\epsilon}_p$  کرنش پلاستیک مؤثر،  $\dot{\epsilon}_p$  نرخ کرنش پلاستیک مؤثر،  $\dot{\epsilon}_0$  نرخ کرنش مرجع و  $C$  ضریب نرخ کرنش است. این معادله نشان می‌دهد که مدل تسلیم از دمای اتاق  $T_r$  تا دمای ذوب  $T_m$  معتبر است. ضرایب مدل مادی جانسون-کوک که با رابطه (۳۳) تعریف شده است، برای فولاد st12 مورد استفاده در این مدل در جدول ۲ ارائه شده است [16].

جدول ۱) گروه‌بندی مدل‌های مورد مطالعه

گروه	تعداد لوله	ضخامت رویه‌ها (mm)
۱	۴	۱
		۱/۲۵
۲	۶	۱
		۱/۲۵
۳	۸	۱
		۱/۲۵
۴	۱۰	۱
		۱/۲۵

بر اساس قانون بقا اندازه حرکت، سرعت اولیه ناشی از انفجار برای محاسبه انرژی جنبشی سازه عبارت است از:

$$V_0 = \frac{I}{m} \quad (28)$$

که  $I$  شدت انفجار یا ایمپالس وارد بر سازه و  $m$  جرم کل سازه شامل رویه‌های تحتانی، فوقانی و لوله‌های هسته است.

نهایتاً پس از محاسبه جرم سازه، انرژی جنبشی ناشی از انفجار با استفاده از روابط (۲۷) و (۲۸) عبارت است از:

$$E_K = \frac{1}{2} I^2 \left( \rho \pi R \left( 2RH + n \left( \frac{D^2 - d^2}{4} \right) \right) \right)^{-1} \quad (29)$$

کار پلاستیک شامل مجموع کار پلاستیک انجام شده به وسیله رویه تحتانی  $W_b$ ، رویه فوقانی  $W_f$ ، خمش لوله هسته  $W_{bend}$  و لهیدگی لوله هسته  $W_{crush}$  در فرآیند تغییر شکل است. این کار پلاستیک در فرآیند تغییر شکل مستهلک می‌شود.

$$W_p = W_b + W_f + nW_{bend} + nW_{crush} \quad (30)$$

کار پلاستیک هسته با ضرب کار پلاستیک خمشی و کار پلاستیک له‌شدگی هر لوله در تعداد لوله‌های هسته ( $n$ ) به دست می‌آید. معادله حاکم بر پاسخ نهایی سازه عبارت است از:

$$E_K = \frac{1}{2} I^2 \left( \rho \pi R \left( 2RH + n \left( \frac{D^2 - d^2}{4} \right) \right) \right)^{-1} \\ = \frac{1}{2} \pi \sigma_a a_1 [HW_0^2 + H^2 W_0] \\ + \frac{1}{2} \pi \sigma_a a_2 [H(W_0 + \delta)]^2 \\ + H^2 (W_0 + \delta) + \frac{n \sigma_0 W_0}{4R} (D^3 - d^3) \\ - \frac{n \pi t^2 R \sigma_0}{\sqrt{2}} \ln \left( 1 - \frac{\delta}{D + d} \right) \quad (31)$$

عبارت داخل پرانتز لگاریتم طبیعی، عددی بین صفر و یک است، لذا مقدار لگاریتم طبیعی آن عددی منفی خواهد بود که با ضرب در علامت منفی در پشت عبارت چهارم مقداری مثبت حاصل خواهد شد.  $\delta$  با رابطه (۱۲) و تنش تسلیم دینامیکی با  $\sigma_a = \lambda \sigma_0$  بیان می‌شود. در رابطه تنش تسلیم دینامیکی ضریب  $\lambda$  از رابطه کوپر-سیمندز با رابطه (۳۲) بیان می‌شود.

$$\lambda = 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{\frac{1}{q}} \quad (32)$$

پارامترهای  $D$  و  $q$  ثابت‌های ماده هستند و مقادیر آن‌ها برای فولاد با نرخ کرنش متناسب با پدیده انفجار به ترتیب برابر ۴/۰ و ۵ می‌باشد [9].

### ۳- شبیه‌سازی عددی

برای شبیه‌سازی و تحلیل به روش عددی از کد ABAQUS استفاده شده است. در این روش مدل‌سازی هندسی سازه ورق ساندویچی متشکل از اجزاء مختلف آن انجام می‌شود. مدل شبکه‌بندی

جدول ۲) خواص فولاد st12

مدل مواد				
A(MPa)	B(MPa)	C	n	m
۲۲۱/۱۴	۴۶۹/۳۵	۰/۰۱۱۳	۰/۶۸۹۵	۱

### ۲-۳- بارگذاری انفجاری

مطالعه حاضر بر تغییر شکل پلاستیک و پاسخ دینامیکی ورق‌های ساندویچی با هسته لوله‌ای شعاعی تحت بارگذاری انفجاری با توزیع یکنواخت متمرکز شده است. مؤثرترین روش برای توصیف بار انفجار روی سازه می‌تواند تبدیل انفجار به فشار سطحی باشد. با این حال، برای مواردی که بار انفجاری در فاصله‌های بزرگ‌تر از شعاع ورق منفجر شود، برای اعمال بار روی صفحه باید از معادلات فضای اویلری-لاگرانژی و روابط کانوپ<sup>[10]</sup> استفاده کرد. در روش اول، محیط اویلری از محصولات منفجره و هوا تشکیل شده و از فرمول‌های اویلری استفاده می‌کند در حالی که نقاط مش ساختاری توسط فرمولاسیون لاگرانژی تعریف شده‌اند. این روش زمان محاسبه‌ها را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد؛ بنابراین، در این پژوهش به منظور کوتاه کردن زمان فرآیند انجام بارگذاری روی مدل‌های عددی فرض می‌شود که برای شبیه‌سازی بارگذاری انفجار آزاد وارد بر سازه از تابع فشار CONWEP برای مدل‌سازی بارگذاری استفاده شده است. در تابع فشار CONWEP که با رابطه (۳۵) تعریف می‌شود، تابع فشار وابسته به زمان است و بر رویه فوقانی ورق ساندویچی اعمال می‌شود<sup>[10]</sup>.

$$P(t) = P_r \cos^2 \theta + P_i(1 + \cos^2 \theta - 2 \cos \theta) \quad (35)$$

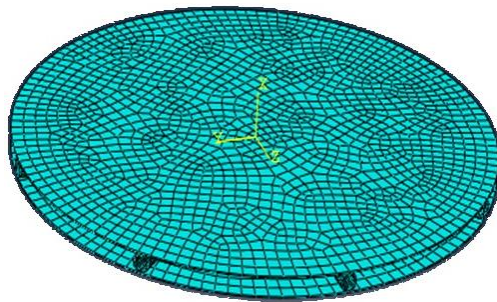
که  $P_r$  و  $P_i$  ترتیب فشار انعکاسی و فشار مواجهه و  $\theta$  زاویه مواجهه می‌باشد.

### ۳-۳- هندسه و شرایط مرزی

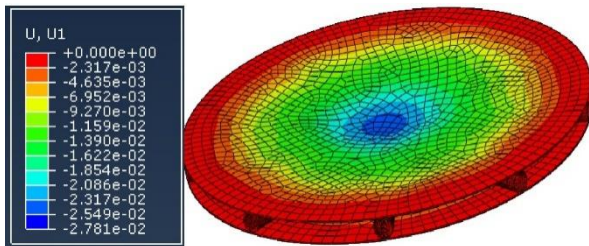
در این پژوهش، مدل‌های سه‌بعدی ورق‌های ساندویچی با هسته لوله‌ای شعاعی در مقیاس کامل با استفاده از نرم‌افزار آباکوس توسعه داده شده است. شرایط مرزی برای همه سطح پیرامونی ورق ساندویچی شامل رویه‌ها و مقاطع لوله‌ای هسته به صورت گیردار تعریف شده است. ابعاد، سطح بارگذاری، تولید مش و شرایط مرزی برای یک ورق‌های ساندویچی با هسته لوله‌ای شعاعی در شکل ۵ نشان داده شده است.

### ۴-۳- صحت سنجی

برای بررسی نتایج شبیه‌سازی از نتایج تحلیلی بخش ۲ و آزمایش تجربی همین مقاله استفاده شده است. با توجه به انطباق خوب نتایج شبیه‌سازی با نتایج تحلیلی و تجربی مقدار ضریب مقیاسی که لازم است برای بارگذاری استفاده شود، برابر واحد در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۶ مقطع برش خورده تغییر مکان سازه ناشی از بارگذاری انفجاری نشان داده شده است. در این تحلیل به منظور بررسی همگرایی نتایج، استقلال نتایج از شبکه بررسی شده است.



شکل ۵) مدل اجزای محدود سازه



شکل ۶) تغییر مکان ناشی از بارگذاری انفجاری سازه

### ۴- بررسی نتایج

در این مقاله به روش تحلیلی و عددی مقدار خیز پلاستیک بیشینه در نقطه میانی سازه که در رویه تحتانی ایجاد می‌شود، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج برای ۴ نوع چیدمان لوله‌های هسته شامل چیدمان ۴، ۶، ۸ و ۱۰ عددی و ۳ نوع رویه به ضخامت‌های ۱، ۱/۲۵ و ۱/۵ میلی‌متر با مقطع لوله‌های هسته به قطر داخلی ۸ و قطر خارجی ۱۰ میلی‌متر مطابق جدول ۳ ارائه شده است. آزمایش برای نمونه شماره ۱۰ انجام شده است و مقدار خیز بیشینه در این نمونه ۳۸ میلی‌متر به دست آمده است. همچنین از این آزمون برای تخمین تابع تغییر مکان رویه‌های فوقانی و تحتانی استفاده شده است و مقادیر  $a_1$  و  $a_2$  به ترتیب برابر ۱/۳۵ و ۱/۸ به دست آمده است. مقایسه مقدار خیز بیشینه منتج از آزمایش این نمونه (۳۸ میلی‌متر) با نتایج تحلیلی و عددی که به ترتیب برابر ۳۳/۲۵ و ۳۹/۵ میلی‌متر است، نشان از انطباق خوب نتایج تحلیلی و عددی با نتیجه تجربی دارد. ملاحظه می‌شود که نتیجه آزمون انجام شده بیشتر از حل تحلیلی و کمتر از حل عددی است. در شکل ۷ تغییر شکل رویه تحتانی و مقدار خیز بیشینه آن در آزمایش تجربی نشان داده شده است.

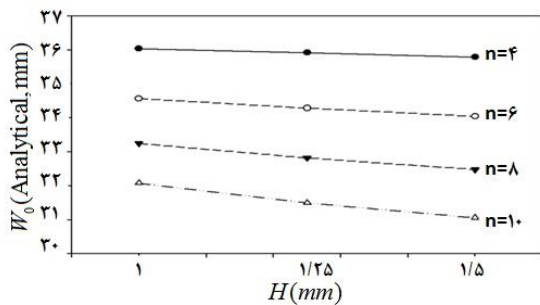
در جدول ۳ نتایج حل معادلات تحلیلی ارائه شده است و مقدار  $w_0$  به روش تحلیلی در مقایسه با روش عددی برای ۱۸ نمونه با مشخصه‌های هندسی مختلف ارائه شده است. همچنین در این



شکل ۷) تغییر شکل رویه تحتانی و مقدار خیز ماکزیمم در آزمایش تجربی

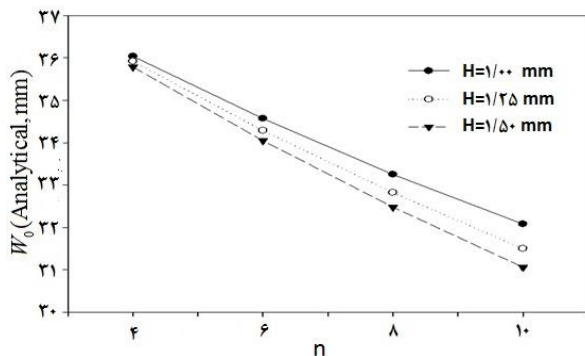


نمونه	تعداد لوله (n)	ضخامت H(mm)	w <sub>0</sub> (mm) خیز ماکزیمم		انرژی جذب شده (J)			
			تحلیلی	FE	رویه تحتانی	هسته	رویه فوقانی	کل سازه
۱		۱	۳۶/۰۴	۳۴/۸	۲۳۱۴	۳۰۵۴	۳۲۷۹	۸۶۴۷
۲	۴	۱/۲۵	۳۵/۹۲	۳۰/۲	۲۲۹۹	۳۰۴۳	۳۲۵۸	۸۶۰۰
۳		۱/۵	۳۵/۷۹	۲۸/۵	۲۲۸۳	۳۰۳۲	۳۲۳۴	۸۵۴۹
۴		۱	۳۴/۵۷	۳۰/۸	۲۱۳۲	۲۹۲۸	۳۰۲۲	۸۰۸۲
۵	۶	۱/۲۵	۳۴/۲۹	۳۰/۵	۲۰۹۸	۲۹۰۵	۲۹۷۴	۷۹۷۷
۶		۱/۵	۳۴/۰۵	۲۸/۴	۲۰۷۰	۲۸۸۴	۲۹۳۳	۷۸۸۷
۷		۱	۳۳/۲۵	۳۹/۵	۱۹۷۵	۲۸۱۶	۲۷۹۹	۷۵۹۰
۸	۸	۱/۲۵	۸۲/۳۲	۳۲۳۲	۱۹۲۵	۲۷۷۹	۲۷۲۹	۷۴۳۳
۹		۱/۵	۳۲/۴۸	۲۷/۳	۱۸۸۶	۲۷۵۰	۲۶۷۳	۷۳۰۹
۱۰		۱	۳۲/۰۸	۳۸	۱۸۴۱	۲۷۱۶	۲۶۰۹	۷۱۶۶
۱۱	۱۰	۱/۲۵	۳۱/۵۰	۳۲/۳	۱۷۷۶	۲۶۶۷	۲۵۱۷	۶۹۶۰
۱۲		۱/۵	۳۱/۰۶	۲۷/۶	۱۷۲۸	۲۶۲۹	۲۴۴۹	۸۶۰۶



شکل ۹) خیز سازه به تفکیک تعداد لوله‌ها برحسب ضخامت رویه‌های ورق ساندویچی

مقدار خیز نمونه‌ها به تفکیک ضخامت رویه‌ها برحسب تعداد لوله‌های هسته ورق ساندویچی به روش تحلیلی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت از ۱ به ۱/۲۵ و ۱/۵ میلی‌متر برحسب تعداد لوله‌ها، مقدار خیز کاهش می‌یابد. با افزایش ضخامت رویه‌ها از ۱ به ۱/۲۵ و ۱/۵ میلی‌متر، مقدار خیز در ورق ساندویچی با هسته‌های ۴، ۶، ۸ و ۱۰ عددی به ترتیب ۰/۷، ۱/۵، ۲/۳ و ۳/۱۸ درصد کاهش یافته است.



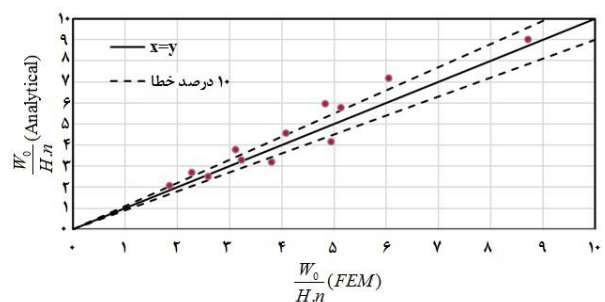
شکل ۱۰) خیز سازه به تفکیک ضخامت رویه‌ها برحسب تعداد لوله‌های هسته

جدول به روش تحلیلی مقدار انرژی جذب شده در سازه و اجزاء مختلف آن شامل رویه‌ها و لوله‌های هسته محاسبه و ارائه شده است.

برای همه نمونه‌ها، نتایج به دست آمده برای خیز سازه به روش تحلیلی و عددی، مطابق جدول ۳ به دست آمده است. مقایسه نتایج عددی و تحلیلی در شکل ۸ نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد خطا نزدیک به محدوده ۱۰ درصد است.

پس از مقایسه نتایج عددی و تحلیلی، برای همه نمونه‌های مندرج در جدول ۳ مقدار خیز نمونه‌ها به تفکیک تعداد لوله‌ها برحسب ضخامت رویه‌های ورق ساندویچی به روش تحلیلی به دست آمده است. مقایسه این نتایج در شکل ۹ نشان داده شده است. بر اساس این نتایج مشاهده می‌شود با افزایش تعداد لوله‌ها از ۴ به ۶، ۸ و ۱۰ عدد، مقدار خیز در همه ضخامت‌ها کاهش می‌یابد. با افزایش تعداد لوله‌ها از ۴ به ۱۰ عدد، مقدار خیز در ضخامت‌های ۱، ۱/۲۵ و ۱/۵ میلی‌متر به ترتیب ۱۱، ۱۲/۲۵ و ۱۳/۲ درصد کاهش یافته است.

همچنین بیشترین نرخ کاهش خیز با افزایش ضخامت از ۱ به ۱/۵ میلی‌متر با هسته‌ای با تعداد لوله ۱۰ عدد به مقدار ۳/۱۸ درصد اتفاق افتاده است.



شکل ۸) مقایسه نتایج عددی و تحلیلی خیز

مستقل از تعداد لوله‌های هسته آن، مقدار خیز کاهش می‌یابد. بیشترین ظرفیت جذب انرژی به وسیله نمونه‌ای حاصل شده است که دارای کمترین تعداد لوله در ساختار هسته و دارای کمترین ضخامت رویه‌ها است. نتایج حاصل از تحلیل به روش‌های مختلف انطباق خوبی با هم دارند.

**تشکر و قدردانی:** نویسندگان مراتب قدردانی خود را از آقای دکتر مجتبی ضیاءشمامی مدیر آزمایشگاه ضربه و انفجار دانشگاه جامع امام حسین (ع) به خاطر همکاری خوب در انجام آزمایش‌ها اعلام می‌دارند. **تاییدیه 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:** مجتبی قمری زاده (نویسنده اول): پژوهشگر اصلی، نگارنده، تحلیلگر به روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی (۵۰٪) حسین خدارحمی (نویسنده دوم): پژوهشگر کمکی (۱۰٪) توحید میرزابابای مستوفی (نویسنده سوم): پژوهشگر کمکی، روش‌شناس (۳۰٪) **منابع مالی:** کلیه هزینه‌ها توسط نویسندگان تأمین شده است.

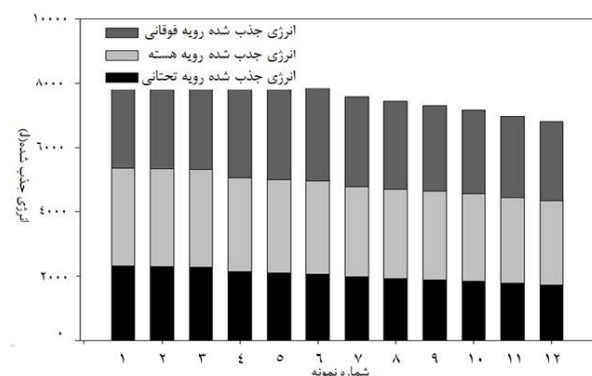
## منابع

- 1- 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.
- 2- 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.
- 3- Xiang XM, Lu G, Ma GW, Li XY, Shu DW. Blast response of sandwich beams with thin-walled tubes as core. *Engineering Structures*. 2016 Nov 15;127:40-8.
- 4- Gharababaei H, Darvizeh A. Experimental and Analytical Investigation of Large Deformation of Thin Circular Plates Subjected to Localized and Uniform Impulsive Loading#. *Mechanics based design of structures and machines*. 2010 Apr 30;38(2):171-89.
- 5- Theobald MD, Nurick GN. Experimental and numerical analysis of tube-core claddings under blast loads. *International Journal of Impact Engineering*. 2010 Mar 1;37(3):333-48.
- 6- Guo Y, Zhuang Z, Li XY, Chen Z. An investigation of the combined size and rate effects on the mechanical responses of FCC metals. *International Journal of Solids and Structures*. 2007 Feb 1;44(3-4):1180-95.
- 7- 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.
- 8- Wierzbicki T, Sinmao MV. A simplified model of Brazier effect in plastic bending of cylindrical tubes. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 1997 Apr 1;71(1):19-28.

توانایی سازه در جذب انرژی به روش تحلیلی برای هسته و رویه‌های همه نمونه‌ها محاسبه شده است. در شکل (۱۱) نمودار جذب انرژی سازه برحسب اجزا مختلف ورق‌های ساندویچی شامل رویه تحتانی، هسته و رویه فوقانی ارائه شده است. ملاحظه می‌شود جذب انرژی با نرخ کندی از نمونه ۱ تا نمونه ۱۲ کاهش می‌یابد. با افزایش تعداد لوله‌های هسته از ۴ به ۱۰ عدد و افزایش ضخامت رویه‌ها از ۱ به ۱/۵ میلی‌متر، مقدار جذب انرژی نمونه ۱۲ نسبت به نمونه ۱ به مقدار ۲۱/۳ درصد کاهش پیدا کرده است. جذب انرژی در لوله‌های هسته ناشی از له‌شدگی خیلی بیشتر از جذب انرژی ناشی از خم‌شدگی است. چون در له‌شدگی حداقل ۴ لولای پلاستیک در طول کل لوله‌ها به وجود می‌آید در حالی که فقط در مقطعی از لوله در نزدیکی تکیه‌گاه خمیدگی پلاستیک به وجود می‌آید. با افزایش تعداد لوله‌های هسته و با وجود اینکه تعداد لوله‌های له شده بیشتر می‌شود اما مقدار له‌شدگی هر لوله کاهش خیلی بیشتری را تجربه می‌کند، نهایتاً نتیجه این خواهد شد که با افزایش تعداد لوله‌ها انرژی جذب شده ناشی از له‌شدگی و خم‌شدگی کاهش می‌یابد. همچنین رویه تحتانی، هسته و رویه فوقانی نمونه ۱۲ با تعداد هسته ۱۰ لوله‌ای و ضخامت رویه ۱/۵ میلی‌متر نسبت به رویه تحتانی، هسته و رویه فوقانی نمونه ۱ با تعداد هسته ۴ لوله‌ای و ضخامت رویه ۱ میلی‌متر به ترتیب ۲۵/۳، ۱۳/۹۱ و ۲۵/۳۲ درصد کاهش جذب انرژی داشته‌اند.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه سازوکار جدیدی از سازه‌های ساندویچی با هسته لوله‌ای شعاعی تحت بار انفجاری مورد مطالعه تحلیلی و عددی قرار گرفته است. در روش تحلیلی همه شاخصه‌های لازم و همچنین همه معادلات حاکم بر تعادل در انرژی سازه برحسب خیز بیشینه رویه تحتانی ورق ساندویچی به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش تعداد لوله‌های هسته، مقدار خیز در همه ضخامت‌ها کاهش می‌یابد. همچنین بیشترین نرخ کاهش خیز در نمونه‌ای با بیشترین افزایش ضخامت و با هسته‌ای با بیشترین تعداد لوله اتفاق می‌افتد. با افزایش ضخامت رویه‌ها در سازه و



شکل ۱۱) مقایسه جذب انرژی رویه‌ها و هسته ورق‌های ساندویچی

- 9- Jones N. Structural impact. Cambridge university press; 2011 Dec 26.
- 10- Kingery CN, Bulmash G. Airblast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical surface burst, ARBRLTR-02555. MD: US Army Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground. 1984 Apr.
- 11- Jones N. Impulsive loading of a simply supported circular rigid plastic plate. *Journal of Applied Mechanics* 1968; 35:59-65.
- 12- Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M. Theoretical analysis on the effect of uniform and localized impulsive loading on the dynamic plastic behaviour of fully clamped thin quadrangular plates. *Thin-Walled Structures*. 2016 Dec 1;109:367-76.
- 13- Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M, Lu G, Ruan D. Large transverse deformation of double-layered rectangular plates subjected to gas mixture detonation load. *International Journal of Impact Engineering*. 2019 Mar 1;125:93-106.
- 14- Mostofi TM, Golbaf A, Mahmoudi A, Alitavoli M, Babaei H. Closed-form analytical analysis on the effect of coupled membrane and bending strains on the dynamic plastic behaviour of fully clamped thin quadrangular plates due to uniform and localized impulsive loading. *Thin-Walled Structures*. 2018 Feb 1;123:48-56.
- 15- 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.
- 16- 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*. 2019 Jun 28;49(2):854-65.