

علمی- پژوهشی

## پاسخ تجربی و تحلیلی ورق‌های ساندویچی مدور فلزی با هسته لوله‌ای تحت بار انفجار

مجتبی قمری‌زاده<sup>۱</sup> حسین خدارحمی<sup>۲</sup> توحید میرزابابای مستوفی<sup>۳</sup>

دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ایوانکی، ایوانکی، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۴)

### چکیده

ورق‌های ساندویچی سازه‌های مورد توجهی برای جذب انرژی انفجار می‌باشند. لهیدگی و تغییرشکل 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 تغییرشکل دائمی قابل توجهی می‌شوند. در سازه‌های مدور که دارای هندسه و بارگذاری متقارن هستند، بیشترین مقدار تغییرشکل در مرکز رویه تحتانی سازه اتفاق می‌افتد. در این مقاله به روش تحلیلی و تجربی رفتار دینامیکی سازه و تغییرشکل ورق‌های ساندویچی مدور فلزی با هسته لوله‌ای تحت بار انفجار بررسی شده است. در این مطالعه برای چیدمان لوله‌های هسته از ترکیب شعاعی غیرهمرس استفاده شده است که ترکیب جدیدی محسوب می‌شود و به شکل منظمی در هسته تعبیه شده‌اند. آزمایش تجربی با ساخت ورق‌های ساندویچی تحت بار انفجار و به روش انفجار آزاد، به‌منظور ارزیابی و صحت سنجی نتایج تحلیلی انجام شده است. حل تحلیلی به کمک روش انرژی و با برقراری تعادل انرژی جنبشی و کار پلاستیک انجام شده به‌وسیله اجزاء مختلف سازه ورق ساندویچی، انجام شده است. خیز بیشینه، میزان له‌شدگی هسته و انرژی جذب‌شده توسط اجزاء مختلف برای چند نمونه مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. انطباق خوبی بین نتایج تحلیلی و تجربی وجود دارد.

**واژه‌های کلیدی:** پاسخ دینامیکی، بار انفجار، ورق ساندویچی، هسته لوله‌ای

## The Experimental and Analytical Response of Circular Metal Sandwich Panels with Tubular Cores under Blast Load

M. Ghamarizadeh<sup>3</sup>

H. Khodarahmi<sup>2</sup>

T. Mirzababae Mostofi<sup>1</sup>

Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran

University of Eyvanekey

(Received: 06/05/2021; Accepted: 14/06/2021)

### ABSTRACT

The sandwich panels are important structures for absorbing the explosion energy. Crushing and plastic deformation of the core along with the plastic bending of the faces are the main factors in absorbing the explosion energy in these structures. Structural components undergo significant permanent deformation after the explosion and its related energy absorption. In circular sandwich panels with symmetrical geometry and loading, the greatest amount of deformation occurs in the center of the back face. 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 studied analytically and experimentally. The tubes are arranged radially and symmetrically in the core constructions, which is a new configuration for the energy-absorbing sandwich panels in the literature. Experiments have been performed by making sandwich panels under free blast load in order to evaluate and validate the analytical 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. Maximum deflection, the amount of core crushing and the amount of energy absorbed by the whole structure and different parts of the structure are studied for different cases. There is a good agreement between analytical and experimental results.

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

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری: m\_ghamari56@yahoo.com

<sup>۲</sup> استاد (نویسنده پاسخگو): hkhdrhmi@ihu.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار: t.m.mostofi@gmail.com

## ۱- مقدمه

سازه‌های ساندویچی از سازه‌های مورد تأکید برای جذب انرژی انفجار و استفاده برای سپر انفجار هستند. ساختار ساندویچی با هسته لوله‌ای متقارن برای استفاده‌هایی پیشنهاد می‌شوند که سازه جاذب انرژی دارای ساختاری مدور و متقارن باشد. 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 سرجنگی دومرحله‌ای در موشک‌ها و راکت‌ها اشاره نمود که برای جلوگیری از آسیب و اثرات نامطلوب انفجار مرحله اول بر مرحله دوم به‌کاربرده می‌شود.

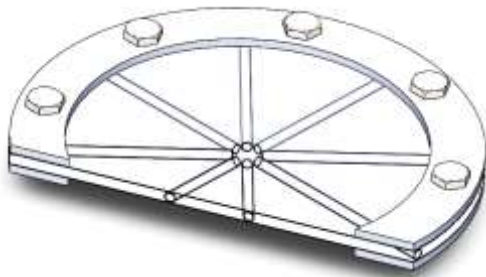
تحقیقات زیادی برای بررسی پاسخ دینامیکی ورق‌های ساندویچی مدور فلزی با هسته‌های رایجی مانند لانه‌زنبوری، پروفیل‌های فلزی و فوم‌های فلزی و غیرفلزی انجام شده است. در زمینه سازه‌های ساندویچی با هسته لوله‌ای شعاعی تحقیقاتی انجام نشده است. تحقیقات کمی برای سازه‌های ساندویچی با هسته‌های لوله‌ای با چیدمان موازی 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 آلومینیمی و فولادی در برابر بار انفجار را به روش تجربی مورد بررسی قرار دادند. لوله‌های تشکیل دهنده 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 [۱]. 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 [۲]. 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 [۳]. 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 [۴]. تئوبلد و همکاران در سال ۲۰۱۰ به روش تجربی و عددی [۵] و در سال ۲۰۰۶ به روش عددی [۶] پاسخ ورق‌های ساندویچی با هسته‌های ساخته شده از لوله‌های جدار نازک فولادی و آلومینیمی 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 به‌همراه 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 تشکیل دهنده هسته تحت اثر انفجار علاوه بر خمش دچار لهیدگی نیز می‌شوند. جذب انرژی انفجار توسط لوله‌های هسته مبتنی بر تشکیل لوله‌های پلاستیک تحت اثر خمش و لهیدگی پلاستیک انجام می‌شود [۷]. ویرزبیک و همکاران در سال ۱۹۹۷ به روش تحلیلی مدلی را برای بررسی تغییر شکل لوله‌های تحت خمش پلاستیک مورد بررسی قرار دادند و میزان له‌شدگی آن را بررسی کردند [۸]. جونز در سال ۱۹۸۹ به بررسی رفتار پلاستیک لوله‌ها و تشکیل لولای پلاستیک تحت بارگذاری‌های مختلفی پرداخته است و اثر

نداده است. کار پلاستیک ناشی از انفجار هم برای لحظه‌ای محاسبه می‌شود که همه انرژی جنبشی وارد به سازه در اثر تغییرشکل‌های رویه‌های تحتانی و فوقانی و همچنین تغییرشکل ناشی از له‌شدگی و خمش لوله‌های هسته مستهلک شده باشد و تغییر مکان نهایی در سازه حاصل شده باشد.

## ۲-۱- بیان مسئله

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



شکل (۱): نمای برش خورده سازه بین دو کلمپ

در این روش، ابتدا نحوه تغییرشکل سازه تعریف می‌شود. مقطع نیمی از هندسه تغییرشکل سازه شامل رویه‌ها و لوله‌های هسته به‌طور شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است. رویه‌های سازه بعد از انفجار و تغییرشکل با خط چین نشان داده شده است. لوله‌های هسته سازه قبل از تغییرشکل 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، به‌دلیل اینکه از کرنش رویه‌های ساندویچ‌پنل در جهت ضخامت صرف‌نظر شده است، ضخامت در فرآیند تغییرشکل و در فرآیند بارگذاری انفجاری تغییر نمی‌کند و لذا با توجه به ثابت بودن ضخامت بدون آنکه اشکالی در صحت مسئله به وجود 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

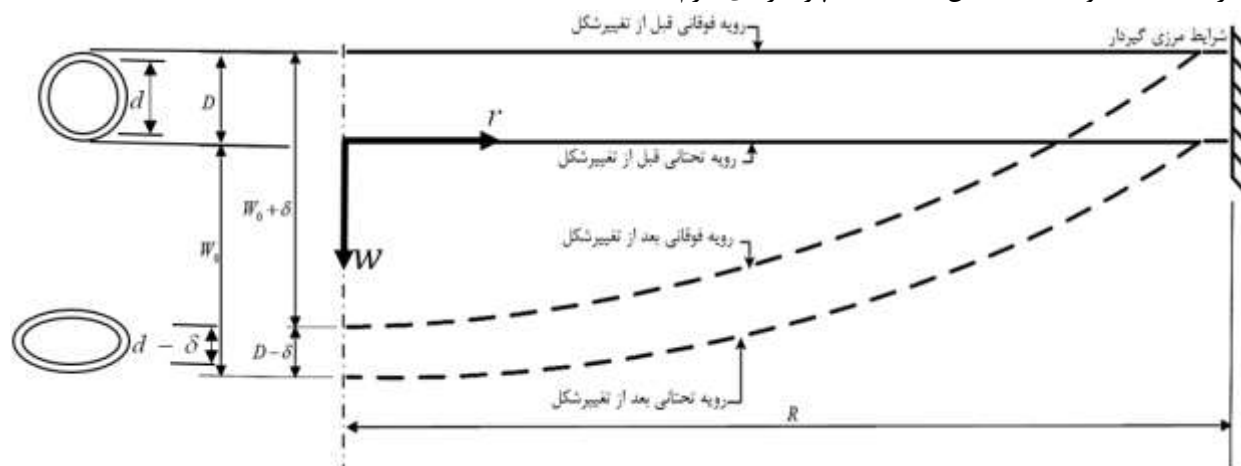
نرخ کرنش را در بارگذاری‌های مختلف مورد مطالعه قرار داده است [۹]. کینگری و همکاران در سال ۱۹۸۴ پارامترهای انفجار آزاد و انفجار کروی ماده منفجره TNT را مورد بررسی قرار داده است و رابطه فشار انفجار برحسب زمان را ارائه نمود. آن‌ها، علاوه بر این، تأثیر مهم نرخ کرنش در محاسبه مقدار کار پلاستیک انجام‌شده در روش تحلیلی را مورد بررسی قرار دارند [۱۰]. جونز و همکاران در سال ۱۹۶۸ رفتار دینامیکی ورق‌های مدور تحت بار انفجاری با شرایط مرزی ساده را مورد مطالعه قرار دادند [۱۱].

با مرور مطالعات پیشین 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 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 اجزا، مختلف سازه برحسب یک پارامتر است.

## 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 تغییرشکل و لحظه توقف کامل سازه پس از تغییرشکل 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 سازه با کار پلاستیک انجام‌شده به‌وسیله اجزاء مختلف سازه در فرآیند تغییرشکل و در طی بارگذاری انفجاری به دست می‌آید. انرژی جنبشی برای لحظه‌ای محاسبه می‌شود که هنوز هیچ‌گونه تغییرشکلی در سازه رخ

برای راحتی حل معادلات حاکم بر تعادل انرژی کل سازه که به طور کلی با رابطه (۲) بیان شده است، هم برحسب همین پارامتر بیان خواهد شد.



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

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  $\epsilon_r$  و کرنش محیطی  $\epsilon_\theta$  در نظر گرفته می‌شود و از کرنش‌های در جهت ضخامت به دلیل کم بودن چشم‌پوشی شده است. رابطه کرنش شعاعی  $\epsilon_r$  و کرنش محیطی  $\epsilon_\theta$  با تغییر مکان به ترتیب عبارت است از [۱۱].

$$\epsilon_r = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 - z \frac{\partial^2 w}{\partial r^2}, \quad \epsilon_\theta = -z \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \quad (2)$$

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

$$\epsilon_r = W_0 a_1 \frac{r^{a_1-2}}{R^{a_1}} \left( W_0 a_1 \frac{r^{a_1}}{2R^{a_1}} + z(a_1 - 1) \right) \quad (3)$$

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

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

$$W_p = \int_V \sigma_d (\epsilon_r + \epsilon_\theta) dV = \int_0^R \int_{-H/2}^{H/2} \sigma_d (\epsilon_r + \epsilon_\theta) 2\pi r dz dr \quad (4)$$

سازه می‌شود. لازم به ذکر است در این روش همه پارامترهای لازم برای بررسی پاسخ سازه و جذب انرژی برحسب خیز بیشینه رویه تحتانی به مقدار  $w_0$  در مرکز سازه محاسبه خواهد شد. ضمن اینکه کلیه پارامترهای لازم

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- 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 برای تغییر مکان رویه ناشی از بار انفجار پیشنهاد شود که به واقعیت و فیزیک مسئله نزدیک باشد و بتواند شرایط مرزی و تکیه‌گاهی را ارضا نماید. همچنین اکستریم‌های تابع در مرکز و تکیه‌گاه‌ها با فیزیک مسئله انطباق داشته باشد. این تابع با رابطه (۱) پیشنهاد شده است.

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

نهایتاً کار پلاستیک رویه فوقانی عبارت است از:

$$W_f = \frac{1}{2} \pi \sigma_d a_2 (H(W_0 + \delta)^2 + H^2(W_0 + \delta)) \quad (9)$$

با تعریف  $\bar{\delta} = \delta/2R_m$  میزان له‌شدگی هسته با استفاده از تئوری بیضوی شدن مقطع مدور هسته تحت اثر بار خمشی وارد بر سازه برای  $\bar{\delta} < 0.5$  عبارت است از [۸].

$$\bar{\delta} = 0.533 R_m^2 \kappa / H \quad (10)$$

برای محاسبه میزان له‌شدگی لازم است مطابق رابطه (۱۰) ابتدا میزان شعاع انحنا  $\Gamma$  و سپس مقدار انحنا  $\kappa$ ، به دست آید. لذا برای محاسبه شعاع انحنا سازه پس از تغییر شکل فرض می‌شود سازه بخشی از یک منحنی مدور است که از ۳ نقطه  $(W_0, R)$ ،  $(0, 0)$  و  $(W_0, -R)$  عبور کرده است. با تعیین منحنی تغییر شکل، رابطه مقدار شعاع انحنا  $\Gamma$  و انحنا  $\kappa$  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.

### ۳-۲- 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.

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

برای محاسبه کار پلاستیک ناشی از خمش لازم است زاویه به وجود آمده در محل لولای پلاستیک  $(\theta_p)$  و گشتار خمشی پلاستیک کامل مقطع هسته به صورت رابطه (۱۳) مورد استفاده قرار گیرد و کار پلاستیک محاسبه شود [۹].

از جایگزینی مؤلفه‌های کرنش (۳) در 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، مقدار  $a_1$  و خیز بیشینه رویه تحتانی به دست می‌آید.

$$W_b = \frac{1}{2} \pi \sigma_d a_1 (HW_0^2 + H^2 W_0) \quad (5)$$

### 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 [۱۱].

$$w_b(r) = (W_0 + \delta) \left( 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{a_2} \right), \quad 0 \leq r \leq R \quad (6)$$

$a_2$  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  $\epsilon_r$  و کرنش محیطی  $\epsilon_\theta$  در نظر گرفته می‌شود و از کرنش‌های در جهت ضخامت چشم‌پوشی می‌شود. رابطه کرنش‌ها با تغییر مکان از روابط (۲) و (۶) عبارت‌اند از:

$$\epsilon_r = (W_0 + \delta) a_2 \frac{r^{a_2-2}}{R^{a_2}} \left( (W_0 + \delta) a_2 \frac{r^{a_2}}{2R^{a_2}} + z(a_2 - 1) \right) \quad (7)$$

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

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

$$W_p = \int_V \sigma_d (\epsilon_r + \epsilon_\theta) dV = \int_0^R \int_{-H/2}^{H/2} \sigma_d (\epsilon_r + \epsilon_\theta) 2\pi r dz dr \quad (8)$$

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 [۸].

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

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

در مجموع ۳ مؤلفه برای نرخ کرنش‌های  $\dot{\epsilon}_{ij}$  شامل  $\dot{\epsilon}_{\theta\theta}$ ،  $\dot{\epsilon}_{x\theta}$ ،  $\dot{\epsilon}_{xx}$  و ۳ مؤلفه برای نرخ انحنای  $\dot{K}_{ij}$  شامل  $\dot{K}_{\theta\theta}$ ،  $\dot{K}_{x\theta}$ ،  $\dot{K}_{xx}$  وجود دارد. با این فرض که از تغییرشکل برشی و پیچشی المان‌های 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 تغییرشکل، انحنا در جهت طولی خیلی کوچک‌تر از انحنا محیطی است، لذا از مقدار  $\dot{K}_{xx}$  در مقایسه با  $\dot{K}_{\theta\theta}$  چشم‌پوشی می‌شود. همچنین با فرض اینکه تئوری کیرشف در این مسئله صادق است، مقدار  $\dot{\epsilon}_{xx} = \dot{K}_{xx}$  در نظر گرفته می‌شود.

در نتیجه بعد از اعمال فرضیات فوق بر رابطه نرخ کار پلاستیک داخلی (۱۶) عبارت (۱۷) برای بیان نرخ کار پلاستیک داخلی به دست می‌آید.

$$\dot{W}_{plasticwork} = \int_S N_{xx} \dot{K}_{xx} dS + \int_S M_{\theta\theta} \dot{K}_{\theta\theta} dS + 4M_n \dot{\psi} \quad (17)$$

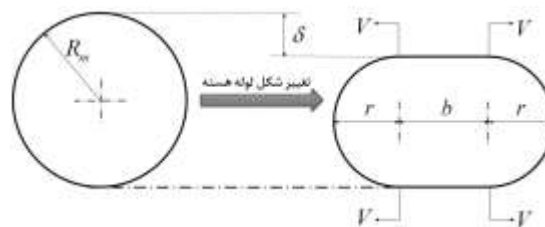
که عبارت اول مبین نرخ کار پلاستیک ناشی از خمش و عبارت‌های دوم و سوم مبین نرخ کار پلاستیک ناشی از له‌شدگی هستند. با توجه به شکل ۳ و مبتنی بر مشاهدات تجربی تعداد ۴ عدد لولای پلاستیک طولی مشابه در لوله به

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

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

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

لوله‌های هسته که قبل از بارگذاری و تغییرشکل دارای مقطع دایروی شکلی هستند، پس از بارگذاری علاوه بر آنکه دچار خمش می‌شوند، دچار تغییرشکل 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. تغییرشکل مقطع لوله ناشی از بارگذاری مطابق شکل ۳ فرض می‌شود.



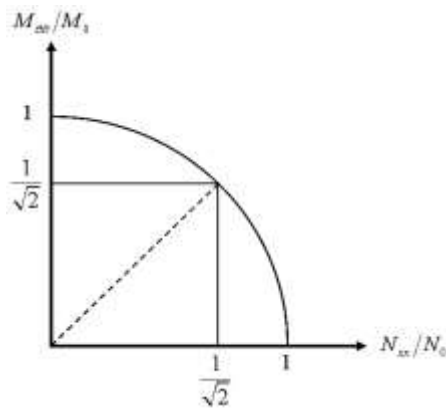
شکل (۳): تغییرشکل و بیضوی شدن مقطع لوله [۸].

از شکل ۳ روابط هندسی زیر بین مقادیر هندسی اجزاء مختلف مقطع لوله شامل له‌شدگی، قطر لوله قبل از تغییرشکل و هندسه لوله بعد از تغییرشکل قابل استخراج است.

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

از این روابط مقادیر  $r = R_m - 0.5\delta$  و  $b = 0.5\pi\delta$  به دست می‌آید. به کمک این روابط و با توجه به شکل ۳ سرعت لولای پلاستیک به سمت چپ یا راست عبارت است از:

$$V = 0.5\dot{b} = 0.25\pi\dot{\delta} = -0.5\pi\dot{r} \quad (15)$$



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

$$\frac{\sigma_{\theta\theta}}{\sigma_0} = \frac{M_{\theta\theta}}{M_0} = \frac{\sigma_{xx}}{\sigma_0} = \frac{N_{xx}}{N_0} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (23)$$

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.

$$\dot{W}_{crushing} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\pi t l}{4 R_m^2} M_0 \frac{\dot{\delta}}{1-\delta} \quad (24)$$

که در این رابطه  $l = R$  است. پس از جایگزینی مقادیر 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.

$$W_{crush} = -\frac{\pi t R}{\sqrt{2} (0.5D + 0.5d)^2} M_0 \ln\left(1 - \frac{\delta}{2R_m}\right) \quad (25)$$

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

$$M_0 = 4\sigma_0 \left(\frac{D_{average}}{2}\right)^2 t = 4\sigma_0 \left(\frac{D+d}{2}\right)^2 t \quad (26)$$

#### 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 تغییرشکلی در سازه رخ نداده است و کار

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  $M_{\theta\theta} = \sigma_{\theta\theta}(t^2/4)$  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:

$$\dot{W}_{crushing} = \dot{K}_{\theta\theta} 2\pi r l M_{\theta\theta} + 4M_n l \dot{\psi} \quad (18)$$

با توجه به پارامترهای هندسی مقطع تغییرشکل 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 می‌گیرد.

$$\dot{K}_{\theta\theta} = -\frac{\dot{r}}{r^2}, \quad \dot{\psi} = -\frac{\pi \dot{r}}{2r} \quad (19)$$

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.

$$\dot{W}_{crushing} = 4\pi M_{\theta\theta} l \frac{\dot{\delta}}{1-\delta} \quad (20)$$

با توجه به اینکه  $M_{\theta\theta} = \sigma_{\theta\theta}(t^2/4)$  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.

$$\dot{W}_{crushing} = \frac{\pi t l}{4 R_m^2} M_0 \frac{\dot{\delta}}{1-\delta} \left(\frac{\sigma_{\theta\theta}}{\sigma_0}\right) \quad (21)$$

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

$$\left(\frac{M_{\theta\theta}}{M_0}\right)^2 + \left(\frac{N_{xx}}{N_0}\right)^2 = 1 \quad (22)$$

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

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 پشت عبارت چهارم، مقداری مثبت حاصل خواهد شد.

$\delta$  با رابطه (۱۲) و تنش تسلیم دینامیکی با  $\sigma_d = \lambda \sigma_0$  بیان می‌شود. در رابطه تنش تسلیم دینامیکی ضریب  $\lambda$  از رابطه کوپر-سیمندز با رابطه (۳۲) بیان می‌شود.

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

در این رابطه  $D$  و  $q$  ثابت‌های ماده هستند و مقادیر آن‌ها برای فولاد با نرخ کرنش متناسب با پدیده انفجار به ترتیب برابر ۴/۴۰ و ۵ می‌باشد [۹].

## ۲-۵- گروه‌بندی نمونه‌های مورد مطالعه

در این مقاله ۴ گروه به تفکیک تعداد لوله‌های هسته، ضخامت رویه‌ها و ابعاد مقاطع لوله‌های هسته برای بررسی به روش تحلیلی مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شده است.

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

$$E_K = \frac{1}{2} m V_0^2 \quad (27)$$

که  $m$  جرم کل سازه است

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 جرم رویه‌های تحتانی، فوقانی و 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 تغییرشکل است. این کار پلاستیک در فرآیند تغییرشکل مستهلک می‌شود.

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

کار پلاستیک هسته با ضرب کارهای پلاستیک خمشی و له‌شدگی هر لوله در تعداد لوله‌های هسته به دست می‌آید. معادله حاکم بر پاسخ نهایی سازه عبارت است از: (رابطه ۳۱).



جدول (۱): گروه‌بندی نمونه‌های مورد مطالعه به‌روش تحلیلی (کلیه ابعاد برحسب mm است)

نمونه	گروه	تعداد لوله	ضخامت رویه‌ها	ابعاد مقطع لوله	نمونه	گروه	تعداد لوله	ضخامت رویه‌ها	ابعاد مقطع لوله				
۱	۱	۴	۱	۸×۱۰	۱۹	۳	۸	۱	۸×۱۰				
۲				۱۱×۱۳	۲۰				۱۱×۱۳				
۳				۱۴×۱۶	۲۱				۱۴×۱۶				
۴			۱/۲۵	۱	۸×۱۰			۲۲	۳	۸	۱/۲۵	۸×۱۰	
۵					۱۱×۱۳			۲۳				۱۱×۱۳	
۶					۱۴×۱۶			۲۴				۱۴×۱۶	
۷			۱/۵	۱	۱			۸×۱۰	۲۵	۳	۸	۱/۵	۸×۱۰
۸								۱۱×۱۳	۲۶				۱۱×۱۳
۹								۱۴×۱۶	۲۷				۱۴×۱۶
۱۰	۲	۶	۱	۸×۱۰	۲۸	۴	۱۰	۱	۸×۱۰				
۱۱				۱۱×۱۳	۲۹				۱۱×۱۳				
۱۲				۱۴×۱۶	۳۰				۱۴×۱۶				
۱۳			۱/۲۵	۱	۱			۸×۱۰	۳۱	۴	۱۰	۱/۲۵	۸×۱۰
۱۴								۱۱×۱۳	۳۲				۱۱×۱۳
۱۵								۱۴×۱۶	۳۳				۱۴×۱۶
۱۶			۱/۵	۱	۱			۸×۱۰	۳۴	۴	۱۰	۱/۵	۸×۱۰
۱۷								۱۱×۱۳	۳۵				۱۱×۱۳
۱۸								۱۴×۱۶	۳۶				۱۴×۱۶

## ۳- روش تجربی

لوله‌ها با مقاطع مختلف مطابق جدول ۲ تهیه شده است و به‌طور منظم در هسته سازه تعبیه می‌شوند. برای آنکه نظم و زوایای لوله‌ها قبل از سفت کردن پیچ‌ها به هم نخورد، از چسبی که ماهیت سازه‌ای نداشته باشند برای نگه‌داشتن لوله‌ها استفاده می‌شود. نمونه‌های تجربی جدول ۲ با نمونه ۱۹ تا ۲۱ گروه‌بندی تحلیلی جدول ۱ مشترک هستند. خرج مورد استفاده در این آزمایش ۱۰۰ gr ماده منفجره C4 است که در فاصله ۲۰ سانتی‌متری رویه فوقانی ورق ساندویچی منفجر می‌شود. شکل خرج از نوع کروی می‌باشد و مرکز خرج محل شروع انفجار می‌باشد.

در ساخت نمونه‌ها فضاهای خالی بین لوله‌ها به‌وسیله پرکننده‌های فولادی به ضخامتی برابر قطر خارجی لوله پر می‌شود. استفاده از این پرکننده‌ها به منظور افزایش اصطکاک و بهبود عملکرد شرایط مرزی نمونه توسط کلمپ‌ها می‌باشد. به دلیل مشابه بخشی از فضای داخلی لوله‌ها نیز که در ناحیه بین کلمپ‌ها قرار دارد به‌وسیله پرکننده‌های فولادی پر می‌شود. با استفاده از این تکنیک بدون آنکه لوله‌های هسته در ناحیه مرزی و در سطح اصطکاک بین کلمپ‌ها با رویه‌ها و هم‌چنین رویه‌ها با لوله‌ها دچار

در این مقاله علاوه بر روش تحلیلی به روش تجربی نیز پاسخ ورق ساندویچی تحت انفجار آزاد برای تعدادی از نمونه‌ها مطابق جدول ۲ مورد مطالعه قرار می‌گیرد. استند مخصوصی برای این آزمایش‌ها طراحی و ساخته شده است. دو کلمپ فولادی به قطر داخلی ۴۰۰ mm و قطر خارجی ۶۰۰ mm و ضخامت ۲۰ mm برای نگه‌داشتن نمونه‌ها و اتصال محکم آن‌ها به استند طراحی و ساخته شده است. نمونه‌ها از طریق ۲۴ عدد پیچ فولادی M12 به کلمپ‌های فولادی و استند مخصوص محکم بسته می‌شوند. رویه‌های مدور از ورق‌های مستطیلی به روش پانچ کردن تولید می‌شوند.

جدول ۲: نمونه‌های تجربی (کلیه ابعاد برحسب mm)

نمونه	تعداد لوله	ضخامت	ابعاد مقطع لوله‌های
۱	۸	۱	۸×۱۰
۲			۱۱×۱۳
۳			۱۴×۱۶

در قسمت (الف) شکل ۵ نمونه آماده انفجاری نشان داده شده است که به وسیله پیچ به روی استند بسته شده است. ۱۰۰ گرم خرج کروی در فاصله ۲۰ سانتی متری آن در امتداد راستای عمود بر مرکز ورق قرار دارد. در قسمت (ب) دستگاه مولد تحریک الکتریکی نشان داده شده است و در قسمت (ج) چاشنی انفجار خرج که به فتیله متصل شده است، نشان داده شده است. ملاحظات ایمنی برای انجام آزمایش انفجار به طور کامل رعایت شده است و فرمان انفجار با فاصله حداقل ۱۰ m اتاقک انفجار صادر و به وسیله فتیله به خرج انفجار انتقال داده شد.

#### ۴- بررسی نتایج

در این مقاله به روش تحلیلی و تجربی پاسخ دینامیکی سازه، مورد مطالعه قرار گرفته است. نمونه های آزمایش تجربی جدول ۲ با نمونه های تحلیلی ۱۹ تا ۲۱ جدول ۱ مشترک است. در شکل ۶ نتایج آزمون های تجربی برای تغییر شکل رویه های تحتانی و الگوی له شدگی مقاطع لوله های هسته برای نمونه های مندرج در جدول ۲ نشان داده شده است. از این آزمون ها برای تخمین تابع تغییر مکان رویه های فوقانی و تحتانی استفاده شده است و مقادیر  $a_1$  و  $a_2$  به ترتیب برابر  $1/35$  و  $1/8$  به دست آمده است.

له شدگی شوند، می توان به اندازه کافی پیچ های اتصال نمونه به کلمپ ها و استند آزمایش را سفت نمود. این پرکننده ها در ناحیه مرزی و اصطکاکی تثبیت شده بین کلمپ ها و رویه ها استفاده می شود و در ناحیه تحت بار انفجار قرار ندارند، لذا استفاده از آن ها تأثیر و مداخله ای در عملکرد و تغییر شکل سازه در فرآیند انفجار ندارند و صرفاً باعث بهبود خیلی زیاد عملکرد شرایط مرزی در آزمایش می شوند.



الف



ج

ب

شکل (۵): (الف) نمونه آماده آزمایش، (ب) دستگاه تولید تحریک الکتریکی (ج) چاشنی و فتیله انفجار



ب



الف



د



ج

شکل (۶): تغییر شکل تجربی و خیز رویه های تحتانی با هسته با لوله هایی به ابعاد الف)  $10 \times 8$  mm (ب)  $13 \times 11$  mm (ج)  $16 \times 14$  mm (د) له شدگی لوله های هسته به ترتیب از راست با قطرهای بیرونی ۱۰، ۱۲ و ۱۶ mm

لوله‌های هسته از شاخه‌های مختلف بریده شده اند، از دلایل وجود این خطا می‌توان به احتمال وجود نواقص اولیه، تفاوت اندک خواص مکانیکی شاخه با هم، اشاره کرد.

پس از صحت سنجی نتایج روش تحلیلی با نتایج آزمایش‌های تجربی که در جدول ۳ ارائه شده است، در جدول ۴ نتایج خیز بیشینه به روش تحلیلی برای ۴ نوع چیدمان لوله‌های هسته شامل چیدمان ۴، ۶، ۸ و ۱۰ عددی و ۳ نوع رویه به ضخامت‌های ۱ mm، ۱/۲۵ mm و ۱/۵ mm با ۳ نوع مقطع لوله هسته به ابعاد ۸×۱۰ mm، ۱۱×۱۳ mm و ۱۴×۱۶ mm مطابق جدول ۱ ارائه شده است.

در جدول ۳ نتایج مقدار خیز بیشینه و له‌شدگی لوله‌های هسته به روش‌های تجربی و تحلیلی برای ورق‌های ساندویچی ارائه شده است، که ابعاد مقاطع لوله‌های هسته آن‌ها با هم متفاوت است و سایر مشخصات آن‌ها شامل تعداد لوله‌های هسته و ضخامت رویه‌های آنها با هم مشابه است. مشاهده می‌شود نتایج خیز بیشینه به روش‌های تجربی و تحلیلی خطای کمی نسبت به هم دارند. بیشترین خطای خیز بیشینه به مقدار ۵/۹۷ درصد برای نمونه‌ای با هسته‌ای به ابعاد ۱۴×۱۶ mm است. همچنین بیشترین خطای مقدار له‌شدگی هسته سازه به روش تحلیلی از روش تجربی به مقدار ۱۵/۵٪ درصد است. با توجه به اینکه

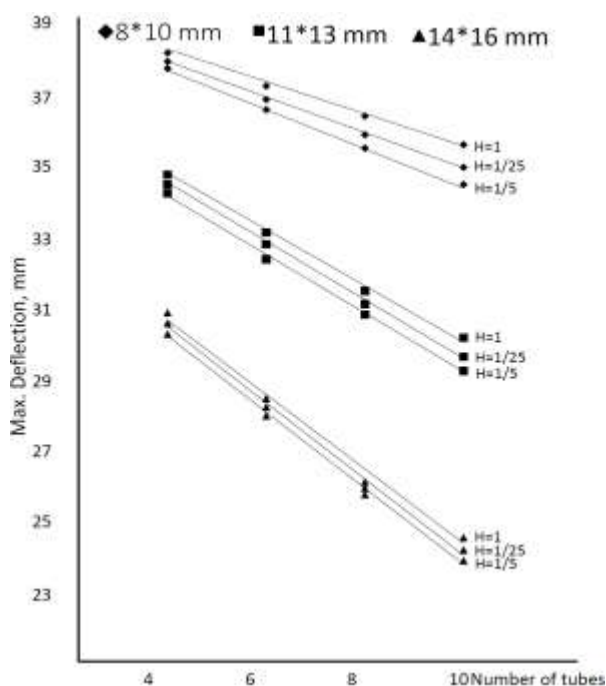
**جدول ۳:** خیز بیشینه و له‌شدگی لوله‌های هسته به روش‌های تجربی و تحلیلی (کلیه ابعاد برحسب mm است)

نمونه	تعداد لوله	ضخامت	ابعاد مقطع لوله‌های هسته	له‌شدگی لوله‌های هسته			خیز بیشینه		
				تجربی	تحلیلی	خطا/٪	تجربی	تحلیلی	خطا/٪
۱	۸	۱	۸×۱۰	۱/۶	۱/۴	۱۲/۵	۳۵/۵	۳۶/۴۲	۲/۵۹
۲			۱۱×۱۳	۲/۵	۲/۳	۸	۳۳/۷	۳۳/۲۵	۱/۳۳
۳			۱۴×۱۶	۳/۸	۴/۵	۱۵/۵	۲۷/۸	۲۶/۱۴	۵/۹۷

**جدول ۴:** خیز بیشینه به روش تحلیلی (کلیه ابعاد برحسب mm است)

نمونه	تعداد لوله	ضخامت رویه	مقطع لوله	خیز بیشینه	نمونه	تعداد لوله	ضخامت رویه	مقطع لوله	خیز بیشینه
۱	۸	۱	۸×۱۰	۳۸/۲	۱۹	۴	۱/۲۵	۸×۱۰	۳۶/۴۲
۲			۱۱×۱۳	۳۴/۷۸	۲۰			۱۱×۱۳	۳۱/۵۱
۳			۱۴×۱۶	۳۰/۴۲	۲۱			۱۴×۱۶	۲۶/۱۴
۴	۸	۱/۲۵	۸×۱۰	۳۷/۹۶	۲۲	۴	۱/۲۵	۸×۱۰	۳۵/۹۰
۵			۱۱×۱۳	۳۴/۷۳	۲۳			۱۱×۱۳	۳۱/۱۴
۶			۱۴×۱۶	۳۰/۶۷	۲۴			۱۴×۱۶	۲۵/۹۷
۷	۸	۱/۵	۸×۱۰	۳۷/۷۶	۲۵	۴	۱/۵	۸×۱۰	۳۵/۵۲
۸			۱۱×۱۳	۳۴/۶۵	۲۶			۱۱×۱۳	۳۰/۸۴
۹			۱۴×۱۶	۳۰/۷۸	۲۷			۱۴×۱۶	۲۵/۷۹
۱۰	۱۰	۱	۸×۱۰	۳۷/۲۷	۲۸	۶	۱/۲۵	۸×۱۰	۳۵/۶۲
۱۱			۱۱×۱۳	۳۳/۰۳	۲۹			۱۱×۱۳	۳۰/۱۹
۱۲			۱۴×۱۶	۲۸/۰۶	۳۰			۱۴×۱۶	۲۴/۵۸
۱۳	۱۰	۱/۲۵	۸×۱۰	۳۶/۸۹	۳۱	۶	۱/۲۵	۸×۱۰	۳۴/۹۸
۱۴			۱۱×۱۳	۳۲/۸۲	۳۲			۱۱×۱۳	۲۹/۶۶
۱۵			۱۴×۱۶	۲۸/۰۷	۳۳			۱۴×۱۶	۲۴/۲۳
۱۶	۱۰	۱/۵	۸×۱۰	۳۶/۶	۳۴	۶	۱/۵	۸×۱۰	۳۴/۵
۱۷			۱۱×۱۳	۳۲/۶۳	۳۵			۱۱×۱۳	۲۹/۲۶
۱۸			۱۴×۱۶	۲۸/۰۴	۳۶			۱۴×۱۶	۲۳/۹۳

مقدار آن در هسته‌هایی با ۴، ۶، ۸ و ۱۰ لوله با افزایش اندازه مقطع لوله‌ها از ۸×۱۰ به ۱۴×۱۶ mm بسته به ضخامت رویه‌ها حداقل ۲۰/۳۶ درصد (در نمونه ۱ از جدول ۴) و حداکثر ۳۲/۸۲ درصد (در نمونه ۲۸ از جدول ۴) کاهش می‌یابد.



شکل (۷): تغییرات خیز بیشینه رویه تحتانی برحسب ضخامت رویه‌ها و تعداد و اندازه مقطع لوله‌های هسته

در شکل ۷ تغییرات خیز بیشینه رویه تحتانی برحسب تعداد لوله‌های هسته برای ضخامت‌های مختلف رویه‌ها و مقاطع مختلف لوله‌ها نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با افزایش تعداد لوله‌های هسته مقدار خیز بیشینه برای ضخامت‌های مختلف رویه و برای همه مقاطع لوله، کاهش می‌یابد. همچنین از این شکل ملاحظه می‌گردد که با افزایش تعداد لوله‌های هسته از ۴ به ۱۰ عدد مقدار خیز بسته به ضخامت رویه ورق و اندازه مقطع لوله آن کاهش می‌یابد. کمترین و بیشترین کاهش خیز بیشینه به ترتیب برابر ۶/۷۵ و ۲۲/۲۵ درصد است که با افزایش تعداد لوله‌ها از ۴ به ۱۰ عدد به ترتیب در نمونه‌های ۱ و ۹ جدول ۴ اتفاق می‌افتد. همچنین برای ورق ساندویچی با هر تعداد لوله در هسته و همچنین با لوله‌های با مقاطع مختلف در هسته آن، با افزایش ضخامت رویه‌ها، مقدار خیز بیشینه کاهش می‌یابد، به طوری که با افزایش ضخامت رویه‌ها از ۱ به ۱/۵ mm برای مقاطع مختلف لوله‌های هسته، بیشینه مقدار کاهش خیز ورق ساندویچی بسته به تعداد لوله‌های هسته آن ۱۴/۳۲ درصد است که با افزایش ضخامت رویه از ۱ به ۱/۵ mm در نمونه شماره ۱۲ جدول ۴ اتفاق می‌افتد.

همچنین در جدول ۵ به روش تحلیلی مقدار انرژی جذب شده در سازه و اجزاء مختلف آن شامل رویه‌ها و لوله‌های هسته محاسبه و ارائه شده است. مقدار خیز بیشینه با بزرگ شدن اندازه مقطع لوله کاهش می‌یابد، به طوری که

جدول (۵): انرژی جذب شده به روش تحلیلی (کلیه ابعاد برحسب mm است)

نمونه	تعداد لوله	ضخامت رویه	مقطع لوله	انرژی جذب شده (J)				
				رویه تحتانی	هسته			
					خمش	له شدگی	رویه فوقانی	
۱	۱	۱	۸×۱۰	۲۱۳۲	۱۴	۱۰۷۸	۳۰۵۷	۶۲۸۱
۲			۱۱×۱۳	۱۹	۱۵۹۵	۲۹۱۶	۶۴۴۸	
۳			۱۴×۱۶	۳۰	۲۷۵۷	۲۵۲۰	۶۶۸۰	
۴	۴	۱/۲۵	۸×۱۰	۲۶۷۳	۱۴	۱۳۲۲	۳۷۷۸	۷۷۸۷
۵			۱۱×۱۳	۱۹	۱۹۳۴	۳۴۵۲	۷۹۰۴	
۶			۱۴×۱۶	۳۰	۳۳۱۲	۳۰۳۶	۸۱۳۶	
۷	۷	۱/۵	۸×۱۰	۳۱۹۵	۱۴	۱۵۶۰	۴۴۷۲	۹۰۴۱
۸			۱۱×۱۳	۱۹	۲۲۷۲	۴۱۸۸	۹۳۵۶	
۹			۱۴×۱۶	۳۰	۳۸۶۹	۳۵۴۶	۹۵۸۷	
۱۰	۱۰	۱	۸×۱۰	۲۰۵۰	۲۰	۱۵۸۵	۲۹۳۹	۶۵۹۴
۱۱			۱۱×۱۳	۲۸	۲۲۸۸	۲۶۸۷	۶۷۷۰	
۱۲			۱۴×۱۶	۴۲	۳۷۶۰	۲۱۵۴	۷۱۲۹	
۱۳	۱۳	۱/۲۵	۸×۱۰	۲۵۲۷	۲۰	۱۹۲۷	۳۵۷۲	۸۰۴۶
۱۴			۱۱×۱۳	۲۷	۲۷۶۴	۳۲۴۳	۸۲۲۳	
۱۵			۱۴×۱۶	۴۲	۴۴۹۵	۲۵۵۳	۸۵۶۸	

ادامه جدول (۵): انرژی جذب‌شده به روش تحلیلی (کلیه ابعاد برحسب mm است)

نمونه	تعداد لوله	ضخامت رویه	مقطع لوله	انرژی جذب‌شده (J)				
				رویه تحتانی	هسته		کل سازه	
					خمش	له‌شدگی		رویه فوقانی
۱۶			۸×۱۰	۳۰۰۵	۲۰	۲۲۶۹	۴۲۰۷	۹۵۰۱
۱۷		۱/۵	۱۱×۱۳	۲۴۰۰	۳۱	۳۷۴۶	۳۵۸۶	۹۷۶۳
۱۸			۱۴×۱۶	۱۷۸۵	۴۲	۵۲۴۰	۲۹۵۷	۱۰۰۲۴
۱۹			۸×۱۰	۱۹۵۸	۲۶	۲۰۶۵	۲۸۰۸	۶۸۵۷
۲۰		۱	۱۱×۱۳	۱۶۳۶	۳۶	۲۹۲۷	۲۴۸۹	۷۰۸۸
۲۱			۱۴×۱۶	۱۰۱۹	۵۲	۴۶۰۹	۱۸۷۲	۷۵۵۲
۲۲			۸×۱۰	۲۳۹۵	۲۶	۲۵۰۱	۳۳۸۶	۸۳۰۸
۲۳	۸	۱/۲۵	۱۱×۱۳	۲۰۰۸	۳۵	۳۵۲۲	۲۹۷۶	۸۵۴۱
۲۴			۱۴×۱۶	۱۲۷۰	۵۱	۵۴۹۳	۲۱۹۳	۹۰۰۷
۲۵			۸×۱۰	۲۸۳۳	۲۵	۲۹۳۶	۳۹۶۵	۹۷۵۹
۲۶		۱/۵	۱۱×۱۳	۲۳۷۹	۳۵	۴۱۱۶	۳۴۶۴	۹۹۹۴
۲۷			۱۴×۱۶	۱۵۱۷	۵۱	۶۳۷۹	۲۵۱۳	۱۰۴۶۰
۲۸			۸×۱۰	۱۸۷۴	۳۲	۲۵۲۴	۲۶۸۸	۷۱۱۸
۲۹		۱	۱۱×۱۳	۱۵۲۵	۴۳	۳۵۲۲	۲۳۱۹	۷۴۰۹
۳۰			۱۴×۱۶	۹۰۳	۶۱	۵۳۶۳	۱۶۶۰	۷۹۸۷
۳۱			۸×۱۰	۲۲۷۶	۳۱	۳۰۴۶	۳۲۱۸	۸۵۷۱
۳۲	۱۰	۱/۲۵	۱۱×۱۳	۱۸۵۳	۴۲	۴۲۱۸	۲۷۴۶	۸۸۵۹
۳۳			۱۴×۱۶	۱۱۰۹	۶۰	۶۳۵۶	۱۹۱۶	۹۴۴۱
۳۴			۸×۱۰	۲۶۷۷	۳۱	۳۵۶۷	۳۷۴۷	۱۰۰۲۲
۳۵		۱/۵	۱۱×۱۳	۲۱۸۰	۴۲	۴۹۱۵	۳۱۷۴	۱۰۳۱۱
۳۶			۱۴×۱۶	۱۳۱۲	۵۹	۷۳۵۲	۲۱۷۳	۱۰۸۹۶

ناشی از خمش لوله‌های هسته در مقایسه با انرژی جذب‌شده ناشی له‌شدگی هسته خیلی کم و حتی قابل‌اغماض است.

با توجه به اینکه جذب انرژی در رویه‌های فوقانی و تحتانی تابعی از خیز آن است و همان‌طور که در شکل ۲ نیز نشان داده‌شده است، خیز رویه فوقانی که به‌اندازه له‌شدگی هسته بزرگ‌تر از خیز رویه تحتانی است، لذا جذب انرژی رویه فوقانی بیشتر از رویه تحتانی 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

توانایی سازه در جذب انرژی به روش تحلیلی برای هسته و رویه‌های همه نمونه‌ها محاسبه‌شده است. در شکل ۸ نمودار میله‌ای جذب انرژی سازه برحسب اجزا مختلف ورق‌های ساندویچی به‌ترتیب از پایین به بالا شامل رویه تحتانی، هسته و رویه فوقانی ارائه‌شده است. مشاهده می‌شود با افزایش تعداد لوله‌های هسته از ۴ به ۱۰ عدد میزان جذب انرژی توسط هسته به‌تدریج و بسته به ضخامت رویه‌ها و اندازه مقطع لوله‌های هسته افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که بیشترین مقدار و همچنین بیشترین درصد جذب انرژی به مقدار ۶۸ درصد توسط هسته در نمونه شماره ۳۶ با ضخامت ۱/۵ mm و با لوله‌های d با اندازه ۱۴×۱۶ mm جذب‌شده است. همچنین انرژی جذب‌شده

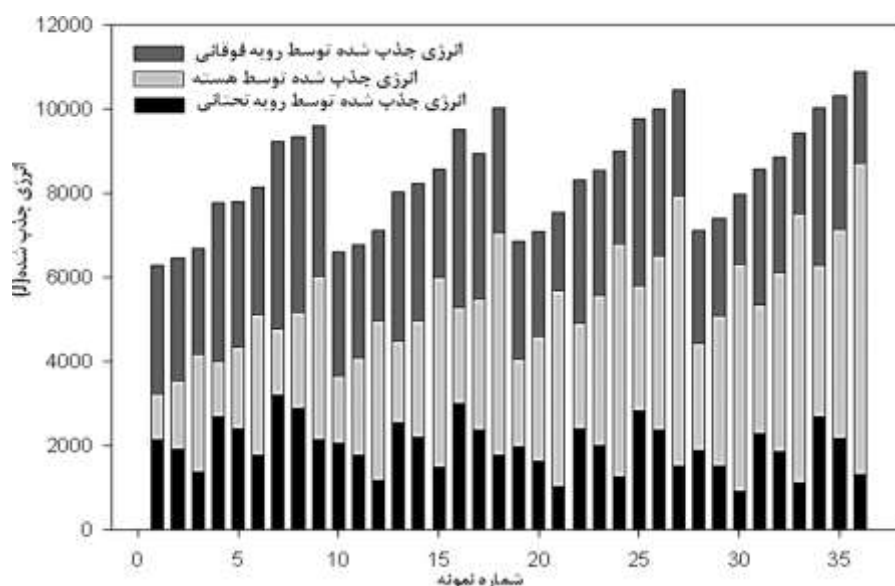
درصد جذب انرژی ناشی از افزایش قطر لوله‌های هسته و برابر ۱۲/۲ درصد در تعداد لوله‌های ۱۰ عدد و ضخامت ۱ mm است.

همچنین با افزایش ضخامت رویه‌ها مقدار جذب انرژی افزایش می‌یابد. بازه درصد افزایش جذب انرژی با افزایش ضخامت از ۱ به ۱/۵ mm مطابق جدول ۵ بین ۳۶ تا ۴۸ درصد است. بیشترین درصد افزایش جذب انرژی در تعداد لوله‌های ۶ عدد و مقطع لوله به ابعاد ۸×۱۰ mm و کمترین درصد جذب انرژی در تعداد لوله‌های ۱۰ عدد و مقطع لوله به ابعاد ۱۴×۱۶ mm است. ملاحظه می‌شود که افزایش ضخامت رویه‌ها، افزایش تعداد لوله‌ها، و قطر داخلی یا بیرونی به ترتیب بیشترین تأثیر را در جذب انرژی انفجار دارد.

وجود می‌آید درحالی‌که فقط در مقطعی از لوله در نزدیکی تکیه‌گاه خمیدگی پلاستیک به وجود می‌آید. با افزایش تعداد لوله‌های هسته و باوجود 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.

با افزایش تعداد لوله‌های هسته از ۴ به ۶، ۸ و ۱۰ عدد میانگین جذب انرژی از  $J 7193$  به ترتیب به  $J 8201$ ،  $J 8618$  و  $J 8957$  افزایش یافته است. که میانگین افزایش جذب انرژی در نمونه‌های با ۱۰ عدد لوله در هسته نسبت به نمونه‌های با ۴ عدد لوله در هسته ۲۴/۵ درصد است.

در همه نمونه‌ها با افزایش قطر داخلی و خارجی مقطع لوله مقدار جذب انرژی افزایش می‌یابد. بیشترین افزایش



شکل (۸): مقایسه جذب انرژی رویه‌ها و هسته ورق‌های ساندویچی

میزان جذب انرژی رویه فوقانی بیشتر از رویه تحتانی است. بیشترین و کمترین نسبت جذب انرژی رویه فوقانی به جذب انرژی رویه تحتانی به ترتیب برابر ۱/۸۴ در نمونه شماره ۳۰ و ۱/۴ در نمونه شماره ۲۵ جدول ۴ است.

##### ۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه مکانیزم جدیدی از سازه‌های ساندویچی با هسته لوله‌ای شعاعی تحت بار انفجاری مورد مطالعه تحلیلی و تجربی قرار گرفت. در روش تحلیلی برای اولین بار همه

با افزایش ضخامت رویه و افزایش اندازه مقطع لوله‌های هسته مقدار جذب انرژی در ورق ساندویچی با هر تعداد لوله در هسته افزایش می‌یابد. افزایش جذب انرژی با افزایش ضخامت رویه از ۱ به ۱/۵ mm و افزایش اندازه مقطع لوله‌های هسته آن از ۸×۱۰ به ۱۴×۱۶ mm به مقدار ۵۳- درصد است. این درصد افزایش جذب انرژی تقریباً مستقل از تعداد لوله هسته بوده و تقریباً برای سازه‌های با هسته‌های دارای ۴، ۶، ۸ و ۱۰ لوله ثابت است.

4. H. Gharababaei and A. Darvizeh. Experimental and analytical investigation of large deformation of thin circular plates subjected to localized and uniform impulsive loading, *Int. J. Mechanics based design of structure and machines*, Vol. 38, No. 2, pp. 171-189, 2010.
5. M. D. Theobald and G. N. Nurick, "Experimental and numerical analysis of tube-core claddings under blast loads," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, No. 3, pp. 333-348, Mar. 2010,
6. M. D. Theobald and G. N. Nurick, "Numerical investigation of the response of sandwich-type panels using thin-walled tubes subject to blast loads," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 34, No. 1, pp. 134-156, Jan. 2007,
7. Y. Guo, Z. Zhuang, X. Y. Li and Z. Chen, An investigation of the combined size and rate effects on the mechanical responses of FCC metals, *Int. Jnl. of. of Solids and Structures*, 44 pp. 1180-1195, 2007
8. Tomasz Wierzbicki, Monique V. Sinmao, A simplified model of Brazier effect in plastic bending of cylindrical tubes, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 71, No. 1, pp. 19-28, 1997.
9. N. Jones, *Structural impact*. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
10. C.N. Kingery, G. Bulmash, Airblast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical surface burst, ARBRL-TR-02555, U.S. Army Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD, 1984.
11. Jones N. Impulsive loading of a simply supported circular rigid plastic plate. *J Appl Mech*, Vol. 35, No. 59, p. 65, 1968.
12. Foroozan M.R, Hafshjani M, Jamshidian S. , Simulation of St12 guillotine section of steel sheet using Johnson-cook damage model, in Persian, 18th National Conference on Steel Symposium, 2016, Tehran, Iran. (in Persian)

متغیرهای لازم و همچنین همه معادلات حاکم بر تعادل انرژی در سازه برحسب خیز بیشینه رویه تحتانی ورق ساندویچی به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش تعداد لوله‌های هسته مقدار خیز بیشینه رویه تحتانی برای ضخامت‌های مختلف رویه و برای همه مقاطع لوله‌های هسته، کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش ضخامت رویه‌ها برای سازه‌ای با هر تعداد لوله در هسته و با لوله‌هایی با مقاطع مختلف، مقدار خیز بیشینه کاهش می‌یابد. مقدار خیز بیشینه با بزرگ شدن اندازه مقطع لوله‌ها کاهش می‌یابد. با افزایش تعداد لوله‌های هسته میانه جذب انرژی توسط هسته بسته به ضخامت رویه‌ها و اندازه مقطع لوله‌های هسته افزایش می‌یابد. با افزایش ضخامت رویه و افزایش اندازه مقطع لوله‌های هسته مقدار جذب انرژی در ورق ساندویچی با هر تعداد لوله در هسته افزایش می‌یابد. انرژی جذب شده ناشی از خمش لوله‌های هسته در مقایسه با انرژی جذب شده ناشی له‌شدگی هسته خیلی کم و حتی قابل‌اغماض است. بیشترین ظرفیت جذب انرژی به‌وسیله نمونه‌ای حاصل شده است که دارای بیشترین تعداد لوله در ساختار هسته و دارای بیشترین ضخامت رویه‌ها و بزرگ‌ترین اندازه مقطع لوله‌های هسته است.

## ۶- مراجع

1. S. C. K. Yuen, G. Cunliffe, and M. C. du Plessis, "Blast response of cladding sandwich panels with tubular cores," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 110, pp. 266-278, Dec. 2017,
2. Z. Xia, X. Wang, H. Fan, Y. Li, and F. Jin, "Blast resistance of metallic tube-core sandwich panels", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 97, pp. 10-28, 2016.
3. X. M. Xiang, G. Lu, G. W. Ma, X. Y. Li, and D. W. Shu, "Blast response of sandwich beams with thin-walled tubes as core," *Engineering Structures*, Vol. 127, pp. 40-48, Nov. 2016.