# تحلیل آزمایشگاهی و عددی فروریزش محوری سازههای

# جدارنازک ترکیبی

على قمريان و محمد على فارسى ً

پژوهشگاه هوافضا (تاریخ دریافت: ۹۰/۵/۱۹: تاریخ پذیرش: ۹۰/۱۱/۲۷)

#### چکیدہ

ضربه گیرها و جاذبهای انرژی از جمله اجزایی هستند که در برخی سامانهها برای جذب انرژی جنبشی و تبدیل آن به صورت دیگری از انرژی استفاده می شوند. هدف از تحقیق حاضر مطالعه آزمایشگاهی و شبیه سازی فروریزش سازه های جدار نازک استوانه ای با درپوش کروی (سازه های جدار نازک ترکیبی) تحت اثر بارگذاری شبه استاتیک محوری و بررسی عوامل مؤثر بر نحوه فروریزش است. در مطالعهٔ آزمایشگاهی نمونه های استوانه ای با درپوش کروی آلومینیمی به روش چرخکاری ساخته شده و بین دو صفحهٔ صلب تحت اثر بارگذاری شبه استاتیک قرار سپس نحوهٔ فروریزش نمونه، تغییرات نیرو و مقدار انرژی لازم تعیین شده اند. مدلی برای شبیه سازی فرآیند فروریزش با استفاده از تحلیل اجزای محدود ارائه و اثر رفتار غیر خطی مواد، تعییرات نیرو و مقدار انرژی لازم تعیین شده اند. مدلی برای شبیه سازی فرآیند فروریزش با استفاده از تحلیل اجزای می دهد که مدل ارائه شده برای تعیین پاسخ فروریزش و تعیین نمودار نیرو – جابه جایی و میزان انرژی جذب شده مناسب است. با استفاده از مدل عددی، اثر می دهد که مدل ارائه شده برای تعیین پاسخ فروریزش و تعیین نمودار نیرو – جابه جایی و میزان انرژی جذب شده مناسب است. با ستفاده از مدل عددی، اثر پارامترهای مختلف نظیر زاویهٔ نیمر آس، ارتفاع بخش استوانه ای و ارتفاع بخش کروی بر متوسط نیروی فروریزش، میزان انرژی جذب هروریزش، میزان انرژی جذب شده و نیز و فره ایرو با ستفاده از مدل عددی، اثر پارامترهای مختلف نظیر زاویهٔ نیمر آس، ارتفاع بخش استوانه ای و ارتفاع بخش کروی بر متوسط نیروی فروریزش، میزان انرژی جذب شده و نمیز ان و زویهٔ بر ای بای بای بایی ای می و نو به یای سازه های می میزان انرژی جذب شده و نموهٔ

واژههای کلیدی: فروریزش محوری، سازههای جدار نازک، جاذب انرژی، پوستههای استوانهای، درپوش کروی

# Experimental and Numerical Analysis of Collapse Behavior of Combined Thin Walled Structures under Axial Loading

A. Ghamarian and M.A. Farsi Aerospace Research Institute

(Received: 27 July, 2011; Accepted: 16 Feb., 2012)

#### ABSTRACT

Crashworthiness and energy absorbers are including components used in some systems for energy absorbing and convert it into another energy. The purpose of this study is experimental and numerical investigation of collapse behavior of thin walled structure cylindrical tube with shallow spherical caps (combined thin walled structures) under quasi-static axial loading and studied effective factors on a collapse mechanism. In experimental approach, aluminum cylindrical with shallow spherical cap samples was made by the process of spinning. These samples are compressed between two rigid platens under quasi-static loading conditions and the collapse mechanism, the variations of crushing load and absorbed energy are determined. A numerical model is presented based on finite element analysis to simulate the collapse process considering the non-linear responses due to material behavior, contact and large deformation. The comparison of numerical and experimental results showed that the present model provides an appropriate procedure to determine the collapse mechanism, crushing load and the amount of energy absorption. The model is used to evaluate the effects of important parameters such as semi apical angle; height of the cylindrical region, and height of the spherical cap region on the mean crush load, energy absorption capacity, and collapse mechanism of cylindrical shells with shallow spherical caps. For example, results of this study can assist aerospace industry to reentry sounding rocket carrier payload based on combined structures.

Keywords: Axial Crushing, Thin Walled Structures, Energy Absorbers, Cylindrical Shells, Shallow Spherical Caps

۱- کارشناس ارشد (نویسنده پاسخگو): ali\_ghamarian@yahoo.com

۲- استادیار : farsi@ari.ac.ir

#### ۱– مقدمه

برخورد تجهیزات متحرک و توقف آنها در مدت زمان کوتاه، موجب اعمال شتاب بیش از حد و تخریب تجهیزات و یا صدمه جانی سرنشینان آنها میشود. ضربهگیرها که برای کاهش شتاب توقف تجهیزات متحرک استفاده میشوند، انرژی جنبشی را به انواع دیگر انرژی تبدیل میکنند. انرژی جنبشی صرف غلبه بر اصطکاک، تغییرشکل پلاستیک و یا شکست در قطعات میشود. ضربهگیرها را میتوان به دو دسته بازگشت پذیر (مانند جریان سیال در میراکنندههای مواد) تقسیم کرد. اغلب ضربه گیرهای دسته اول برای برخورد مواد) تقسیم کرد. اغلب ضربه گیرهای دسته اول برای برخورد با انرژی کم و فقط با احتمال آسیب سازه استفاده میشوند، در صورتی که ضربه گیرهای دسته دوم برای برخورد با انرژی بالا و با احتمال آسیب اجزای مهم و خطر جانی طراحی شدهاند.

ضربه گیرهای مکانیکی که انرژی جنبشی را توسط انجام کار پلاستیک جذب می کنند از جمله ضربه گیرهای بازگشتناپذیری هستند که در سامانههای حمل و نقل مانند آسانسور، اتومبیل، بالگرد، هواپیما و کشتی، رآکتورهای هستهای مانند تجهیزات حمل مواد هستهای، حفاظت مخازن و سازههای ساحلی برای جذب انرژی برخورد کشتی با اسکله کاربرد دارند. سازههای جدارنازک یکی از انواع رایج ضربه گیرها هستند که به طور معمول در هندسههای ساده استوانهای و مخروطی ساخته شدهاند. این سازهها تحت اثر فروریزش آنها خواهد شد. طراحی فرآیند فروریزش سازههای جدارنازک برای تعیین ظرفیت جذب انرژی آنها و تغییرات نیرو یا شتاب اعمالی به تجهیزات در حین فروریزش سازه جدارنازک اهمیت زیادی داشته و محققین مختلف تاکنون این موضوع را بررسی نمودهاند[۳–1].

الکساندر<sup>۱</sup> در سال ۱۹۶۰ طرح سادهای برای تخمین بار متوسط فروریزش لولههای استوانهای جدارنازک ارائه داد. وی هندسه تغییرشکل یافته پوسته استوانه را پس از کمانش، بهصورت سه لولا با تغییر شکل پلاستیکی بین دو بازوی صلب در نظر گرفته و با محاسبه انرژی پلاستیک لازم برای تغییر

طول لوله و خمش لولاها و بهینه کردن آن نسبت به طول بازوی صلب، مقدار متوسط نیروی فروریزش را محاسبه نمود. برای سادهسازی رفتار ماده به صورت صلب پلاستیک کامل در نظر گرفته شد[۴].

گوپتا<sup>۲</sup> و عباس در سال ۲۰۰۰، رفتار فروریزش متقارن-محوری مخروط ناقص تحت اثر بارگذاری محوری را تحلیل نمودند. این طرح برخلاف طرحهای پیشین پاسخ متفاوتی از پوسته مخروطی در حین ایجاد چروک اول در مقایسه با چروکهای دیگر تعیین کرد. نتایج آزمایشگاهی نشان میدهد که اولین چروک ایجادشده در فروریزش نمونه مخروطی تحت اثر بارگذاری محوری به صورت مستقیم باقی می ماند [۵].

یامازاکی<sup>۳</sup> و هان<sup>†</sup> در سال ۲۰۰۰ توانستند به کمک روش المان محدود شیوه صحیح فروریزش متقارنمحوری<sup>6</sup>، الماسی<sup>4</sup> و کمانش اولر<sup>۷</sup> را در لوله استوانهای شبیهسازی نمایند. نتایج این شبیهسازی با آزمایش ضربه افقی لوله استوانهای مقایسه شد و برابری خوبی بین طرح و نتایج آزمایشگاهی مشاهده شد. این پژوهشگران ناحیه فروریزش متقارنمحوری لولههای آلومینیومی را با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و شبیهسازی تعیین کردند[۶].

گوپتا و ونکاش<sup>۸</sup> در سال ۲۰۰۷ فروریزش پوسته مخروطی جدارنازک تحت اثر برخورد محوری را به صورت آزمایشگاهی و تحلیل عددی مطالعه کردند. برخورد پوسته مخروطی آلومینیومی برای زاویه نیمرأس و نسبت قطر به ضخامت متفاوت بررسی شد. نحوه تغییرشکل پوسته، نمودار نیرو–جابه جایی، نمودار انرژی– جابه جایی و متوسط بار فروریزش از آزمایش نمونه های مخروطی به دست آمد. رفتار ویسکوپلاستیک صلب برای ماده در شبیه سازی اجزاء محدود انتخاب شد که تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت [۷].

محمد شریف و همکاران در سال ۲۰۰۸ پوسته مخروط ناقص جدار نازک را بر حسب میزان انرژی جذب شده تحت اثر برخورد محوری بهینهسازی کردند. پوسته مخروطی بر

- 2-Gupta
- 3-Yamasaki
- 4-Han
- 5-Axi-symmetric Mode

- 7-Global Buckling
- 8-Venkatesh

<sup>1-</sup> Alexander

<sup>6 -</sup>Diamond Mode

اساس عوامل هندسی مانند قطر، ارتفاع، زاویه نیمرأس و خواص پوسته مخروطی به روش صفحه پاسخ بهینهسازی شد. آنها اثر تنش جریان مواد بر انرژی جذب شده برای نمونههای مخروطی از جنس روی، آلومینیوم و فولاد نرم را بررسی نمودند[۸].

قمریان و ابدی در سال ۲۰۱۱ فروریزش پوستههای استوانهای سربسته تقویتشده با فوم را تحت بارگذاری محوری و بهصورت آزمایشگاهی و شبیهسازی عددی بررسی نمودند. آنها نشان دادند که پوستههای استوانهای سربسته با کاهش نیروی اولیه، جاذب انرژی بهتری نسبت به پوستههای استوانهای سرباز هستند[۹].

قمریان و همکاران ضربه گیرهای مخروطی سربسته تو خالی و تقویت شده با فوم پلی یورتان تحت اثر بارگذاری محوری را به صورت آزمایشگاهی و تحلیل عددی مطالعه نمودند. در این تحقیق، نتایج شبیه سازی با آزمایشگاهی مقایسه و اثر دانسیته فوم بر فروریزش پوسته های مخروطی سربسته بررسی شد[۱۰]. هم چنین با مطالعه اثر عوامل مؤثر از جمله قطر، ارتفاع، زاویه نیم رأس و ضخامت پوسته های استوانه ای و مخروطی سربسته، بهینه سازی این سازه ها بر حسب انرژی جذب شده و انرژی ویژه فروریزش آن ها تحت بارگذاری محوری انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد که انرژی ویژه پوسته های مخروطی سربسته به مراتب بیشتر از پوسته های استوانه ای سربسته است [۱۱].

مطالعات انجام شده نشان دادند [۱۲ و ۶] که نیروی لازم برای فروریزش سازههای جدار نازک بهصورت غیرخطی و متناوب درحین کاهش ارتفاع و ایجاد چروک در سازه تغییر نموده و برای شناسایی عملکرد جاذب انرژی نیاز است. طرحی بر اساس رفتار مواد در تغییرشکل بزرگ و شرایط برخورد سطوح خارجی سازه به مانع یا سطوح چروکخورده سازه به یکدیگر ارائه شود. با وجود مطالعات انجامشده در حوزه طراحی ضربه گیرها، به دلیل پیچیدگی فرآیند و لزوم افزایش راندمان و عملکرد ضربه گیرها، این حوزه همچنان نیازمند تحقیق است. در این مقاله در ادامه مطالعات انجامشده توسط نویسندگان، نحوه عملکرد ضربه گیرهای استوانهای با درپوش

عوامل مختلف بر متوسط نیروی فروریزش، میزان انرژی جذب شده و نحوه فروریزش آنها بررسی شده است.

### ۲- طرح تئوری

رفتار لهیدگی پوستههای جدار نازک تحت بارگذاری محوری بهصورت تجربی از سال ۱۹۶۰ مورد مطالعه قرار گرفته است. از دیدگاه تئوری، فروریزش پوستهها تحت بارگذاری محوری بسیار پیچیده است. رفتار الاستیک-پلاستیک، کمانش اولیه در آغاز فروریزش، رفتار پلاستیک ماده و تغییرشکل بزرگ پس از کمانش، شرایط مرزی و غیره همگی پدیدههایی هستند که با درنظر گرفتن آنها نمیتوان یک راهحل بسته برای نیرو و سایر عوامل لهیدگی ارائه نمود. تاکنون تعداد زیادی طرح تئوری برای این گونه مقاطع ارائه شده است [۱۳ در نظر گرفته شده است و با فرض ماده پوسته از نوع صلب-پلاستیک کامل<sup>۱</sup>، بر مبنای محاسبات بار حدی، برخی عوامل لهیدگی مانند نیروی متوسط فروریزش و طول چین بدست آمده است.

از آنجا که تا بحال طرحی برای بررسی رفتار فروریزش پوستههای استوانهای با درپوش کروی ارائه نشده است، در این تحقیق میتوان از طرحهای تئوری فروریزش پوستههای استوانهای، تنها برای تخمین طول چینهای پوسته استوانهای با درپوش کروی استفاده نمود.

## ۲-۱ طرح الکساندر

الکساندر اولین کسی بود که در سال ۱۹۶۰ یک طرح تئوری برای لهیدگی محوری لولههای جدار نازک در حالت شیوه متقارنمحوری ارائه نمود[۴]. همانطور که در شکل ۱ مشاهده میشود، میتوان فرض نمود که زمان شکل گرفتن یک چین، سه لولای پلاستیک محیطی بهوجود آمده و کار انجام شده توسط نیروی خارجی، توسط خمش پلاستیک سه لولا و کشش محیطی ماده بین آنها، تلف خواهد شد. او ماده را از نوع کاملاً پلاستیک در نظر گرفت و علاوه بر این، فرض نمود خمش و کشش در معیار تسلیم، برهم اثر نگذاشته و به-صورت دو فرآیند جداگانه طراحی شدهاند. لازم بهذکر است

<sup>1-</sup> Rigid-Perfectly Plastic Material

که معیار تسلیم بکار رفته در تئوری الکساندر معیار تسلیم فون میزز<sup>۱</sup> است. این طرح با آنکه با فرضیات زیادی همراه بود، ولی بسیاری از نکات دیده شده در آزمایشها را پوشش نداده است. رابطه (۱)، طول چین (h) پوسته استوانهای را برحسب ضخامت (t) و شعاع پوسته استوانهای (R) در طرح الکساندر نشان میدهد.

$$\frac{H}{R} = 1.905 \sqrt{\frac{t}{2R}}$$
(1)

۲-۲ طرح آبرامویچ<sup>۲</sup> و جونز<sup>۳</sup> در سال ۱۹۸۳ دو محقق بریتانیایی آزمایشهای محوری فشاری شبهاستاتیک و دینامیکی را برروی دستهای از لوله-های جدار نازک فولادی با مقطع مدور و مربعی انجام دادند [۱۴]. آنها مفهوم مهم فاصله لهیدگی مؤثر (۵) را طبق شکل ۲ در راستای ارتقای طرح الکساندر ارائه نمودند.



شکل (۱):نحوه چین خوردگی در طرح الکساندر [۴].

برای حالت متقارن، آبرامویچ و همکارانش معادله طول چین را در سال ۱۹۸۴ بهصورت رابطه (۲) پیشنهاد دادند[۱۵]. این رابطه برابری خوبی بین طول چین پیشبینی شده بر اساس معادله فوق و نتایج آزمایشهای تجربی نشان داده است.

$$\frac{H}{R} = 1.618 \sqrt{\frac{t}{2R}}$$
(7)

این دو محقق سپس در سال ۱۹۸۶ با کمی اصلاح در طرح خود رابطه (۳) را ارائه نمودند[۱۶].

- 1- Von Mises Yield
- 2- Abramowicz W.
- 3- Jones N.

$$\frac{H}{R} = 1.84 \sqrt{\frac{t}{2R}}$$
(7)



حون چین خوری کی کار طرح ابروهویچ جونز [1۵].

۳- تحلیل آزمایشگاهی فروریزش سازههای جدار نازک ترکیبی

نحوه آمادهسازی نمونههای آزمایشگاهی و ساخت تجهیزات تأمين كننده شرايط مرزى، اندازه گيرى دقيق هندسي و تعیین خواص مکانیکی پوستههای استوانهای با درپوش کروی آلومینیومی از جمله مراحلی است که باید قبل از انجام آزمایش فروریزش نمونههای استوانهای با دریوش کروی تحت اثر بارگذاری محوری مورد توجه قرار گیرند. سازههای استوانهای با درپوش کروی جدار نازک با روش چرخکاری دستی ساختهشده و پس از تعیین ابعاد هندسی آنها و کنترل ابعادی و ظاهری قطعه با قرار گرفتن در یک نگهدارنده ، بین دو صفحه تخت متصل به دستگاه آزمایش یونیورسال با سرعت معینی در راستای محور مخروط فشرده شدهاند. نیروی محوری موجب کمانش و فروریزش بخش کروی پوسته ترکیبی شده و سپس ارتفاع بخش استوانهای پس از چروکهای متقارن محوری متوالی تا مقدار معینی كاهش يافته است. مقدار نيروى لازم براى تغييرشكل پوستهها در حین تغییرشکل اندازه گیری شده و از همه مراحل فروریزش نمونه آزمایشگاهی تصویربرداری شده است تا حالتهای مختلف تغییرشکل پوسته ترکیبی شناسایی شود. شرایط بارگذاری شبهاستاتیک با انتخاب سرعت

4- Fixture

www.SID.ir

١٠٢

تغییرشکل محوری ۱۰ میلیمتر بر دقیقه در حین فررویزش تأمین شده است. ضخامت گرده اولیه آلومینیمی ۱ میلیمتر انتخاب شده است و کاهش ضخامت پوسته استوانهای با درپوش کروی ناشی از عملیات چرخکاری در کلیه نقاط اندازه گیری شد که مقدار حداکثر کاهش ضخامت ۱/۰ میلیمتر در انتهای بخش استوانهای است. قطر نمونههای استوانهای با درپوش کروی ۴/۰±۰/۲ میلیمتر و ارتفاع آن ۸/۰±۹۷/۵ است. شکل ۳ پوسته استوانهای با درپوش کروی را تحت اثر شرایط مرزی یک سرگیردار نشان داده است.



**شکل(۳)**: پوسته استوانهای با درپوش کروی تحت اثر شرایط مرزی یکسرگیردار.

تنش کرنش مهندسی ماده آلومینیمی پوستههای استوانهای با درپوش کروی مطابق شکل ۴ با استفاده از آزمایش کشش (استاندارد ASTM E8) تعیین شد. ضریب الاستیسیته و ضریب پواسون با نصب کرنش سنج به نمونههای آزمایشگاهی نمودار، مقدار تنش تسلیم برابر با ۸۳ مگاپاسکال استخراج شد. مقایسه نتایج تجربی و شبیه سازی کشش ساده ماده آلومینیومی در شکل ۴ نشان می دهد، نرم افزار المان محدود قادر به شبیه سازی رفتار این ماده در تحقیق حاضر است.



در این تحقیق از نرمافزار المان محدود اباکوس برای تحلیل فروریزش پوستههای استوانهای با درپوش کروی تحت اثر بارگذاری شبهاستاتیک محوری استفاده شده است. شکل ۵ هندسه و بارگذاری پوسته استوانهای با درپوش کروی را در تحلیل عددی نشان داده است. با توجه به نتایج آزمایش برای تحلیل تغییرشکل سازه جدارنازک استوانهای با درپوش کروی و برای کاهش زمان تحلیل عددی فرآیند فروریزش آن، هندسه این پوسته نسبت به محور آن متقارن در نظر گرفته شد. در نتیجه پوسته استوانهای با درپوش کروی با سطحی معرفی شده که از تلاقی صفحهای عبور از محور تقارن ایجاد شده است. این سطح از دو قسمت تشکیل شده است:

۴- شبیهسازی فروریزش سازههای جدارنازک ترکیبی

الف- ديواره پوسته كروى و

ب- دیواره پوسته استوانهای. در شبیهسازی حاضر طبق شکل **۵** ، دیواره پوستههای استوانهای و کروی بهترتیب با صفحهای عمودی و خمیده طراحی شده است.



**شکل (۵**): هندسه پوسته استوانهای با درپوش کروی در شبیهسازی متقارنمحوری.

رفتار غیرخطی مواد در تغییرشکلهای بزرگ و اثر برخورد چروکهای پوستههای استوانهای همراه درپوش کروی با یکدیگر یا با سطح بالایی و پایینی ابزار، طراحی شده تا شرایط تحلیل با شرایط آزمایشگاهی کاملاً منطبق باشند.

شبیهسازی فروریزش با فرض صلب بودن سطوح مسطح ابزار در مقایسه با نمونه آزمایشگاهی ارائه شده است. رفتار ناحیه پلاستیک با استفاده از مقادیر تنش و کرنش پلاستیک تعیین شد که مقادیر آنها در جدول ۱ ارائه شده است. تنش تسلیم برابر با ۸۳ مگاپاسکال با استفاده از آزمایش کشش تعیین شد که مقدار آن در کرنش پلاستیک صفر در این جدول ارائه شده است.

جدول(۱): مقادير منحنى تنش- كرنش پلاستيك.

تنش حقیقی ۲۳ ۲۰۰ ۹۸ ۹۰ ۲۰۱ ۱۰۲ ۱۰۵ ۱۰۵ ۲۰۱ ۲۰۰ ۲۰۱۵ ۲۰۱۵ (MPa) کرنش پلاستیک ۰ ۲۰/۱۰۱ ۲۰/۱۰ ۲۰/۱۶۵						
(MPa) کرنش پلاستیک ۰ ۱۰/۱۰ ۲۰/۱۰۳ ۰/۱۶۵	۱۰۵	1.7	٩٨	٩٠	٨٣	تنش حقيقى
كرنش پلاستيك • ١٠٥١ • ١/١٤٣ • ١/١٢٣ ١/١٤٥						(MPa)
	•/180	•/14٣	•/١•٣	•/•01	•	كرنش پلاستيك

شرط مرزی تماسی برای جلوگیری از نفوذ نقاط مختلف پوسته استوانهای با درپوش کروی به داخل قطعات صلب و امکان لغزش پوسته استوانهای با درپوش کروی برروی سطوح صلب تعریف شده است.

در این مطالعه بین سطح خارجی پوسته استوانهای همراه درپوش کروی با سطح صلب بالایی شرط تماس تعریف شده و مقدار ضریب اصطکاک ۱/۰۵ در نظر گرفته شده است [۱۱–۹]. همچنین در این شبیهسازی شرط تماس در سطوح خارجی و داخلی پوسته استوانهای با درپوش کروی پیشبینی شده است تا از نفوذ گرههای ورق لوله استوانهای با درپوش کروی در حین چروکخوردگی جلوگیری شود.

هر صفحه صلب ممکن است شش درجه آزادی شامل سه مؤلفه جابهجایی و سه مؤلفه دوران داشته باشد. سطح صلب زیرین که در تحلیل آزمایشگاهی به فک ثابت دستگاه متصل است. در نتیجه، تمامی درجات آزادی آن مقید شدهاند. از طرف دیگر، سطح صلب بالایی به فک متحرک، متصل است که تمامی درجات آزادی آن غیر از جابهجایی در راستای محور پوسته مقید شده است.

نوع المانها برای تحلیل اجزای محدود وابسته به هندسه نمونه و روش تحلیل است. برای شبیهسازی پوسته استوانهای با درپوش کروی و صفحات صلب بهترتیب از المانهای متقارنمحوری چهارگوش و المان صلب خطی استفاده شده

است [۱۷] ، به طوری که المان های چهار گوش دارای چهار گره و المان های خطی دارای دو گره هستند. در تحقیق حاضر، اثر اندازه المان های پوسته استوانه ای با در پوش کروی بررسی شده است که با توجه به همگرایی پاسخ فروریزش تعداد المان های پوسته استوانه ای با در پوش کروی در جهت ضخامت و محور پوسته به ترتیب ۵ و ۵۸۱ المان انتخاب شده است.

۴–۱–معیارهای مقایسه عملکرد فروریزش ضربه گیرها به طور کلی، مهم ترین معیارهای مقایسه عملکرد فروریزش ضربه گیر به صورت زیر تعریف شده اند:

**انرژی ویژه**: یکی از معیارهای مقایسه بازده ضربه گیرها، انرژی ویژه است که نسبت انرژی جذب شده به جرم تغییر شکل یافته ضربه گیر تعریف شده است.

**بازده لهیدگی**: نسبت طول لهیدهشده ضربه گیر به طول اولیه آن است.

متوسط نیروی فروریزش: نیروی فروریزش ضربه گیر از مشخصههای ضربه گیر است و عکسالعمل آن موجب ایجاد شتاب کاهنده در وسیلهای شده که ضربه گیر به آن متصل است. در صورتی که ضربه گیری به سطح صلب برخورد کند نیروی فروریزش ضربه گیر تعیین کننده شتاب مرکز جرم آن است. سرعت وسایل پس از برخورد ضربه گیر بر اساس متوسط نیروی فروریزش و زمان برخورد محاسبه شده است. ضربه گیری ایده آل است که مقدار متوسط نیروی فروریزشی آن در مدت زمان برخورد ثابت باشد تا از ایجاد شتاب بیش از حد در اثر تغییر نیرو جلوگیری کند.

**نیروی بیشینه**: بهطور معمول حداکثر نیرو در ضربه گیرهای فروریزشی مربوط به تغییرشکل الاستیک است که پس از آغاز تغییرشکل پلاستیک به سرعت کاهش یافته است. در طراحی جنس ضربه گیرها یک مقدار بیشینه مجاز برای نیرو تعیین شده است.

## ۵- نتایج تحلیل آزمایشگاهی و شبیهسازی

شکل ۶ نمونهای از نتایج شبیهسازی فروریزش محوری پوسته استوانهای با درپوش کروی را نشان میدهد. همانطور که مشاهده میشود کاهش ارتفاع نمونه با بازده لهیدگی ۴۹٪

مشابه با شرایط آزمایشگاهی محاسبه شده است. هندسه برش خورده نمونه آزمایشگاهی برای مقایسه در این شکل نشان داده شده که در هر دو حالت تعداد چینهای داخلی و خارجی نمونه استوانهای همراه درپوش کروی برابر است. شکل ۷ نحوه فروریزش پوسته استوانهای با درپوش کروی را در طی جابجاییهای مختلف (b) نشان داده است. فروریزش پوسته استوانهای با درپوش کروی از بخش کروی آغاز شده که باعث کمانش بخش کروی پوسته خواهد شد، سپس چینهای متقارن محوری در طول بخش استوانهای تشکیل شده و پشت سرهم ادامه یافتهاند.



**شکل (۶**): مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیهسازی فروریزش پوسته استوانهای با درپوش کروی تحت بارگذاری محوری.



**شکل (۷**): نحوه فروریزش متقارنمحوری پوسته استوانهای با درپوش کروی تحت بارگذاری محوری.

در شکل ۸ نمودار نیرو- جابهجایی و انرژی- جابهجایی فروریزش متقارنمحوری این نمونه استوانهای با درپوش کروی را براساس نتایج آزمایشگاهی و شبیهسازی نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه میشود، در شروع بارگذاری، نیرو بهصورت خطی تا یک مقدار بیشینه افزایش یافته که علت تغییر خطی نیرو، رفتار الاستیک پوسته استوانهای با درپوش کروی تحت اثر بار فشاری، قبل از آغاز کمانش است. نیروی لازم برای تغییرشکل محوری لوله استوانهای با درپوش کروی

با شروع کمانش استوانه بهصورت ناگهانی کاهش یافته که دوباره با تشکیل چین داخلی شروع به افزایش نموده است. تماس چروک سطح خارجی بخش استوانهای با خودش و تکمیل چین موجب افزایش نیرو لهیدگی پوسته خواهد شد. بهطور کلی، نیروی فروریزش با تشکیل چین داخلی و خارجی بهترتیب افزایش و کاهش یافته، درنتیجه منحنی نیرو-جابهجایی فروریزش متقارنمحوری بدون در نظر گرفتن اولین بیشینه نیرو همواره بهصورت تناوبی تغییر میکند.

نتایج تجربی و شبیه سازی در جدول ۲ با یکدیگر مقایسه شده است. انرژی جذب شده از محاسبه سطح زیر منحنی نیرو- جابه جایی در تحلیل آزمایشگاهی محاسبه شده است و در شبیه سازی از محاسبه مقدار کار خارجی تعیین شده اند. مقایسه این مقادیر نشان می دهد، نتایج تجربی و شبیه سازی فروریزش پوسته استوانه ای با در پوش کروی تحت اثر بارگذاری شبه استاتیک خطای ناچیزی داشته و خطای طرح برای محاسبه انرژی جذب شده نسبت به نتایج آزمایشگاهی کمتر از ۴٪ است.



**شکل (۸**): مقایسه نتایج تجربی و طراحی الف) نمودار نیرو- جابهجایی ب) نمودار انرژی- جابهجایی.

انرژی	متوسط نيروى	اولين بيشينه	
جذبشده	فروريزش	نيروى فروريزش	نتايج
(J)	(KN)	(KN)	
240	۴/۹۳	V/Y	تجربى
774	۴/۷۲	٧/٩	مدلسازى

طراحي.	تجربی و	نتايج	مقايسه	:(۲	جدول(
--------	---------	-------	--------	-----	-------

همچنین برای بررسی نتایج حاصل از آزمایشهای تجربی و مقایسه آنها با طرحهای تئوری الکساندر و آبرامویچ و جونز، طبق جدول ۳ مقدار طول چین برای تئوریهای مذکور محاسبه و سپس با نتایج تجربی مقایسه شدهاند. نتایج نشان میدهد طرحهای تحلیلی به خوبی با نتایج تجربی هم خوانی دارد.

در این بررسی، طرح آبرامویچ و جونز درصد خطای پایین تر نسبت به طرح الکساندر به خود اختصاص داده است. این امر به آن علت است که ابعاد هندسی پوستههای استوانه-ای (شامل ضخامت و شعاع پوسته استوانهای) در آزمایشهای تجربی آبرامویچ و جونز بسیار نزدیک به کار آزمایشگاهی در این تحقیق است.

طرح أبرومويچ و	طرح	تجربى	نتايج
جونز	الكساندر		
۶/۳۰	۶/۵۳	۶/۱۵	طول چين
			(میلیمتر)
٢	۶	-	درصد خطا

**جدول(۳)**: برابری آزمایشهای تجربی با طرح تحلیلی.

با توجه به مقایسه نتایج تجربی فروریزش پوستههای استوانه-ای با درپوش کروی و تئوریهای فروریزش پوستههای استوانهای تحت بارگذاری محوری میتوان گفت که در تحقیق حاضر بخش کروی پوستههای جدار نازک ترکیبی اثر چندانی بر روی مقدار طول چین ندارد.

## ۶- تعیین اثر عوامل مختلف بر فروریزش سازههای جدارنازک ترکیبی

بهدلیل تنوع عوامل تأثیر گذار بر پدیده فروریزش پوسته استوانهای با درپوش کروی، مانند ابعاد هندسی، جنس پوسته، شرایط تکیه گاهی و نحوه بارگذاری، هنوز دستهبندی مناسبی برای پیشبینی رفتار فروریزش سازههای جدار نازک ترکیبی در شرایط مختلف ارائه نشده است. مقایسه نتایج تجربی و شبیه سازی در بخش قبلی مقاله نشان می دهد مدل اجزاء محدود ارائه شده می تواند پدیده فروریزش پوسته های اجزاء محدود ارائه شده می تواند پدیده فروریزش پوسته های محوری با درپوش کروی را تحت اثر بارگذاری استاتیک محوری با دقت مناسبی مدل سازی کند. لذا از این روش برای بررسی اثر پارامترهای مؤثر بر نحوه فروریزش سازه جدار نازک استوانه ای با درپوش کروی تحت اثر بارگذاری محوری استفاده می شود.

## ۶–۱– اثر زاویه نیمرأس

زاویه نیمرأس یکی از عوامل مؤثر بر فروریزش پوستههای متقارنمحوری است. در این تحقیق زاویه نیمرأس برابر زاویه دیواره پوسته با محور افقی تعریف شده است. شکل ۹ اثر زاویه نیمرأس بر نیروی اولیه و انرژی جذبشده لوله استوانهای با درپوش کروی را نشان میدهد. همانطور که دیده می شود، در این بررسی زاویه نیم رأس در محدوده ۰ تا ۱۲ درجه تغییر داده شده است. در این مطالعه، طول پوستههای استوانهای و ضخامت ثابت و بهترتیب برابر ۱۰۰ و ۱ میلیمتر در نظر گرفته شده است. نتایج شبیهسازی نشان-دهنده کاهش نیروی اولیه پوستههای مخروطی با درپوش کروی نسبت به پوستههای استوانهای با درپوش کروی است. بنابراین در کاربرد ضربه گیرهای ترکیبی می توان از این نوع پوستهها برای کاهش شوک اولیه استفاده نمود. از طرف دیگر، با افزایش زاویه نیمرأس انرژی جذب شده کاهش یافته است. بنابراین پوسته مخروطی با درپوش کروی ۱۲ درجه کمترین مقدار انرژی را جذب می کند. کاهش انرژی جذب شده برای این پوسته مخروطی، بهدلیل نحوه فروریزش آن قابل توجه است. همان طور که در شکل ۱۰ مشاهده می شود طول چینهای تشکیل شده این یوسته مخروطی در مقایسه با

پوستههای دیگر کوچکتر است. بنابراین انتظار میرود، انرژی جذب شده این پوسته بهنسبت قابل توجهی کاهش یابد.

## ۲-۶– اثر ارتفاع

یکی دیگر از عوامل مهم در طراحی ضربه گیرهای مکانیکی، انتخاب ابعاد ضربه گیر بهویژه ارتفاع آن است. در هندسه مورد مطالعه در این تحقیق، سازه از دو ارتفاع مختلف تشکیل شده است. بنابراین برای بررسی دقیق تر اثر هر یک از بخشها به صورت مستقل بررسی شده است.





شکل (۱۰): نحوه فروریزش سازههای جدار نازک ترکیبی با زاویه نیمرأس الف) ۱۲ ب)۹ ج)۳ د) ۰ درجه.

#### ۶–۳– ارتفاع بخش استوانهای

در این مطالعه اثر ارتفاع بخش استوانهای بر نیروی اولیه و انرژی جذبشده پوسته استوانهای با درپوش کروی تحقیق شده بهطوری که این ارتفاع در محدوده ۶۰ تا ۹۰ میلیمتر تغییر داده شده است. همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می-شود، انرژی جذبشده پوستههای استوانهای با درپوش کروی با افزایش ارتفاع بخش استوانهای افزایش یافته اما این عامل بهدلیل ثابت بودن بخش کروی اثر قابل توجهی بر نیروی اولیه فروریزش پوستهها ندارد.



**شکل (۱۱**): اثر ارتفاع بخش استوانهای بر الف- نیروی اولیه و ب- انرژی جذبشده سازههای جدار نازک ترکیبی.

## ۶-۴- ارتفاع بخش کروی

در این بخش با ثابت در نظر گرفتن مختصات پوسته استوانهای، عامل ارتفاع بخش کروی از ۰ تا ۳۵ میلیمتر تغییر داده شده است. همان طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، با افزایش ارتفاع درپوش کروی نیروی اولیه و انرژی جذب شده به نسبت قابل توجهی افزایش یافته است. نکته قابل توجه اینکه فروریزش پوستههای استوانهای با درپوش کروی، باعث جذب بالای انرژی آن نسبت به نمونه

مسطح خود خواهند شد. افزایش ارتفاع درپوش کروی پوسته-های استوانهای باعث افزایش بیشینه نیروهای فروریزش شده، بنابراین اولین چین متقارنمحوری در ناحیه پایین تری نسبت به پوسته استوانهای تشکیل شده که این امر باعث کاهش چین خوردگی پوستههای استوانهای خواهد شد.



**شکل (۱۲**): اثر ارتفاع بخش کروی بر الف- نیروی اولیه و ب- انرژی جذبشده سازههای جدار نازک ترکیبی ترکیبی.

#### ۵- نتیجهگیری

در این مقاله، فروریزش متقارن محوری پوسته های جدار نازک استوانه ای با درپوش کروی تحت بارگذاری محوری به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی شده است. با توجه به نتایج آزمایش برای تحلیل تغییر شکل سازه جدار نازک استوانه ای با درپوش کروی و برای کاهش زمان تحلیل عددی فرآیند فروریزش آن، از مدل متقارن محوری برای شبیه سازی آن استفاده شد. نتایج طراحی نشان می دهد، نمودار نیرو - جابه -جایی، نمودار انرژی - جابه جایی و نحوه فروریزش پوسته استوانه ای با درپوش کروی تحت بارگذاری شبه - استاتیک

برابری خوبی با نتایج تجربی دارد. از بررسی فروریزش سازههای جدار نازک ترکیبی (استوانهای با درپوش کروی) نتایج زیر بهدست میآیند:

- ۱- در صورتی که عیوب اولیه در ساخت پوستههای
  متقارنمحوری کم باشد، پوسته تحت بارگذاری محوری
  بهصورت متقارنمحوری فروریزش میکند،
- ۲- با توجه به مقایسه نتایج تجربی فروریزش پوستههای استوانهای با درپوش کروی و تئوریهای فروریزش پوستههای استوانهای تحت بارگذاری محوری میتوان گفت که در تحقیق حاضر بخش کروی پوستههای جدار نازک ترکیبی اثر چندانی برروی مقدار طول چین ندارد،
- ۳- فروریزش پوستههای استوانهای با درپوش کروی باعث
  جذب بالای انرژی نسبت پوستههای استوانهای با درپوش
  مسطح می شود،
- ۴- با افزایش زاویه نیمرأس، انرژی جذب شده ضربه گیرهای ترکیبی کاهش مییابد بنابراین پوسته های استوانه ای با در پوش کروی نسبت به مخروطی انرژی بیشتری جذب خواهد نمود،
- ۵- نیروی اولیه پوستههای مخروطی با درپوش کروی نسبت به پوستههای استوانهای با درپوش کروی کمتر است. بنابراین در کاربرد ضربه گیرهای ترکیبی میتوان از این نوع پوستهها برای کاهش شوک اولیه استفاده نمود،
- ۶- با افزایش ارتفاع بخش استوانهای لوله ترکیبی (استوانهای بادرپوش کروی)، نیروی اولیه تغییر محسوسی نخواهد کرد و
- ۷- در صورتی که ارتفاع بخش استوانهای لولههای ترکیبی
  (استوانهای با درپوش کروی) ثابت در نظر گرفته شود،
  افزایش ارتفاع درپوش کروی، باعث افزایش نیروی اولیه و
  انرژی جذب شده آن خواهد شد.

#### مراجع

- Wierzbicki, T. and Abramowizc, W. "On the Crashing Mechanics of Thin-Walled Structures", J. Appl. Mech, Vol. 50, pp. 727-739, 1983.
- 2. Abramowizc, W. and Jones, N. "Dynamic Axial Crashing of Square Tubes", Int. J. Impact. Eng, Vol. 2, pp. 263-281, 1984.
- 3. Singac, A.A. and Elsobky, H. "Further Experimental Investigation on the Eccentricity Factor in the

- Ghamarian, A. and Zarei, H.R. "Crashworthiness Investigation of Conical and Cylindrical End-capped Tubes under Quasi Static Crash Loading", Int. J. Crashworthiness, Vol. 17, No. 1, pp. 19–28, 2012.
- Easwara Prasad, G.L. and Gupta, N.K. "An Experimental Study of Deformation Modes of Domes and Large-angled Frusta at Different Rates of Compression", Int. J. Impact Eng., Vol. 32, No.'s 1-4, pp. 400–415, 2005.
- Feli, S. and Shokri, A. "Dynamic Progressive Buckling of Square Tubes under Axial Impact Loading", Aerospace Mech. J., Vol. 5, No. 4, pp. 53–65, 2010 (In Persian).
- Abramowichz, W. "The Effective Crushing Distance in Axially Compressed Thin-walled Metal Colums", Int. J. Impact Eng., Vol. 1, No. 3, pp. 309-317, 1983.
- Abramowichz, W. and Jones, N. "Dynamic Axial Crushing of Circular Tubes", Int. J. Impact Eng., Vol. 2, No. 3, pp. 263-281, 1984.
- Abramowicz, W., and Jones N. "Dynamic Progressive Buckling of Circular and Square Tubes", Int. J. Impact Eng., Vol. 4, No. 4, pp. 243–269, 1986.
- Aljawi, A.A.N., Alghamdi, A.A.A., Abu-Mansour, T.M.N., and Akyurt, M. "Inward Inversion of Capped-end Frusta as Impact Energy Absorbers", Thin-Walled Struct, Vol. 43, No. 4, pp. 647–664, 2005.

Progressive Crushing of Tubes", Int. J. Solids Struct., Vol. 32, No. 24, pp. 589-602, 1996.

- Alexander, J.M. "An Approximate Analysis of the Collapse of the Cylindrical Shells under Axial Loading", Q.J. Mech. Appl. Math., Vol. 13, No. 1, pp. 10-15, 1960.
- Gupta, N.K. and Abbas, H. "Axisymmetric Axial Crushing of Thin Frusta", Thin-Walled Struct., Vol. 36, No. 3, pp.169–179, 2000.
- Yamasaki, K. and Han, J. "Maximisation of Crushing Energy Absorption of Cylindrical Shells", Adva. Eng. Soft., Vol. 31, No. 6, pp.425–423, 2000.
- Gupta, N.K. and Venkatesh, "Experimental and Numerical Studies of Impact Axial Compression of Thin-Walled Conical Shells", Int. J. Impact Eng., Vol. 34, No. 4, pp.708–720, 2007.
- Mohamed Sheriff, N., Gupta, N.K., Velmurugan, R., and Shanmugapriyan, N. "Optimization of Thin Conical Frusta for Impact Energy Absorption", Thin-Walled Struct, Vol. 46, No. 6, pp. 653–666, 2008.
- 9. Ghamarian, A. and Abadi, M.T. "Axial Crushing Analysis of End-capped Circular Tubes", Thinwalled Struct, Vol. 49, No. 6, pp. 743–752, 2011.
- Ghamarian, A., Zarei, H.R., and Abadi, M.T. "Experimental and Numerical Crashworthiness Investigation of Empty and Foam-filled End-capped Conical Tubes", Thin-walled Struct, Vol. 49, No. 10, pp.1312–1319, 2011.