

# تحلیل آزمایشگاهی و عددی فروریزش محوری سازه‌های

## جدار نازک ترکیبی

علی قمریان<sup>۱</sup> و محمد علی فارسی<sup>۲</sup>

پژوهشگاه هوافضا

(تاریخ دریافت: ۹۰/۵/۵؛ تاریخ پذیرش: ۹۰/۱۱/۲۷)

### چکیده

ضربه‌گیرها و جاذب‌های انرژی از جمله اجزایی هستند که در برخی سامانه‌ها برای جذب انرژی جنبشی و تبدیل آن به صورت دیگری از انرژی استفاده می‌شوند. هدف از تحقیق حاضر مطالعه آزمایشگاهی و شبیه‌سازی فروریزش سازه‌های جدار نازک استوانه‌ای با درپوش کروی (سازه‌های جدار نازک ترکیبی) تحت اثر بارگذاری شبه‌استاتیک محوری و بررسی عوامل مؤثر بر نحوه فروریزش است. در مطالعه آزمایشگاهی نمونه‌های استوانه‌ای با درپوش کروی آلومینیمی به روش چرخ‌کاری ساخته شده و بین دو صفحه صلب تحت اثر بارگذاری شبه‌استاتیک قرار گرفته و سپس نحوه فروریزش نمونه، تغییرات نیرو و مقدار انرژی لازم تعیین شده‌اند. مدلی برای شبیه‌سازی فرآیند فروریزش با استفاده از تحلیل اجزای محدود ارائه و اثر رفتار غیرخطی مواد، تماس و تغییر شکل بزرگ در این شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مدل ارائه شده برای تعیین پاسخ فروریزش و تعیین نمودار نیرو-جابجایی و میزان انرژی جذب‌شده مناسب است. با استفاده از مدل عددی، اثر پارامترهای مختلف نظیر زاویه نیم‌رأس، ارتفاع بخش استوانه‌ای و ارتفاع بخش کروی بر متوسط نیروی فروریزش، میزان انرژی جذب‌شده و نحوه فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای با درپوش کروی بررسی شده است. به‌عنوان مثال، نتایج این مطالعه در صنایع هوافضا می‌تواند برای بازیابی راکت کاوش بر پایه سازه‌های ترکیبی استفاده شود.

**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، تغییر شکل پلاستیک و یا شکست در قطعات می‌شود. ضربه‌گیرها را می‌توان به دو دسته بازگشت‌پذیر (مانند جریان سیال در میراکننده‌های هیدرولیک) و بازگشت‌ناپذیر (مانند تغییر شکل پلاستیک در مواد) تقسیم کرد. اغلب ضربه‌گیرهای دسته اول برای برخورد با انرژی کم و فقط با احتمال آسیب سازه استفاده می‌شوند، در صورتی که ضربه‌گیرهای دسته دوم برای برخورد با انرژی بالا و با احتمال آسیب اجزای مهم و خطر جانی طراحی شده‌اند.

ضربه‌گیرهای مکانیکی که انرژی جنبشی را توسط انجام کار پلاستیک جذب می‌کنند از جمله ضربه‌گیرهای بازگشت‌ناپذیری هستند که در سامانه‌های حمل و نقل مانند آسانسور، اتومبیل، بالگرد، هواپیما و کشتی، راکتورهای 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 ضربه‌گیرها هستند که به طور معمول در هندسه‌های ساده استوانه‌ای و مخروطی ساخته شده‌اند. این سازه‌ها تحت اثر نیروی محوری کمانش کرده و انرژی جنبشی تجهیزات صرف 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 [۱-۳].

الکساندر<sup>۱</sup> در سال ۱۹۶۰ طرح ساده‌ای برای تخمین بار متوسط فروریزش لوله‌های استوانه‌ای جدارنازک ارائه داد. وی هندسه تغییر شکل یافته پوسته استوانه را پس از کمانش، به صورت 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 ایجاد شده در فروریزش نمونه مخروطی تحت اثر بارگذاری محوری به صورت مستقیم باقی می‌ماند [۵].

یامازاکی<sup>۳</sup> و هان<sup>۴</sup> در سال ۲۰۰۰ توانستند به کمک روش المان محدود شیوه صحیح فروریزش متقارن محوری<sup>۵</sup>، الماسی<sup>۶</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 متقارن محوری 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 تغییر شکل پوسته، نمودار نیرو-جابجایی، نمودار انرژی-جابجایی و متوسط بار فروریزش از آزمایش نمونه‌های مخروطی به دست آمد. رفتار ویسکوپلاستیک صلب برای ماده در شبیه‌سازی اجزاء محدود انتخاب شد که تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت [۷].

محمد شریف و همکاران در سال ۲۰۰۸ پوسته مخروط ناقص جدارنازک 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

6-Diamond Mode

7-Global Buckling

8-Venkatesh

1- Alexander

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 به صورت تجربی از سال ۱۹۶۰ مورد مطالعه قرار گرفته است. از دیدگاه تئوری، فروریزش پوسته‌ها تحت بارگذاری محوری بسیار پیچیده است. رفتار الاستیک-پلاستیک، کماتش اولیه در آغاز فروریزش، رفتار پلاستیک ماده و تغییرشکل بزرگ پس از کماتش، شرایط مرزی و غیره همگی پدیده‌هایی هستند که با در نظر گرفتن آن‌ها نمی‌توان یک راه حل بسته برای نیرو و سایر عوامل لهیدگی ارائه نمود. تاکنون تعداد زیادی طرح تئوری برای این گونه مقاطع ارائه شده است [۱۳ و ۱۴]. در همه آن‌ها یک سینماتیک برای رفتار لهیدگی سازه 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 متقارن محوری ارائه نمود [۴]. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، می‌توان فرض نمود که زمان شکل گرفتن یک چین، سه لولای پلاستیک محیطی به وجود 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 به ذکر است

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].

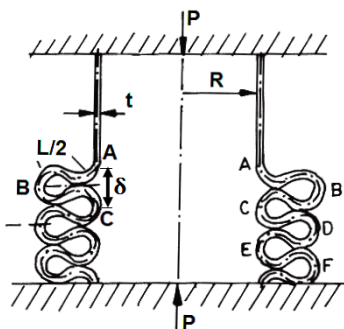
قمریان و ابدی در سال ۲۰۱۱ فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای سربسته تقویت شده با فوم را تحت بارگذاری محوری و به صورت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که پوسته‌های استوانه‌ای سربسته با کاهش نیروی اولیه، جذب انرژی بهتری نسبت به پوسته‌های استوانه‌ای سرباز هستند [۹].

قمریان و همکاران ضربه‌گیرهای مخروطی سربسته تو خالی و تقویت شده با فوم پلی‌پورتان تحت اثر بارگذاری محوری را به صورت آزمایشگاهی و تحلیل عددی مطالعه نمودند. در این تحقیق، نتایج شبیه‌سازی با آزمایشگاهی مقایسه و اثر دانسیته فوم بر فروریزش پوسته‌های مخروطی سربسته بررسی شد [۱۰]. هم‌چنین با مطالعه اثر عوامل مؤثر از جمله قطر، ارتفاع، زاویه نیم‌رأس و ضخامت پوسته‌های استوانه‌ای و مخروطی سربسته، بهینه‌سازی این سازه‌ها برحسب انرژی جذب شده و انرژی ویژه فروریزش آن‌ها تحت بارگذاری محوری انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد که انرژی ویژه پوسته‌های مخروطی سربسته به مراتب بیشتر از پوسته‌های استوانه‌ای سربسته است [۱۱].

مطالعات انجام شده نشان دادند [۱۲ و ۱۳] که نیروی لازم برای فروریزش سازه‌های جدار نازک به صورت 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 چروک خورده سازه به یکدیگر ارائه شود. با وجود مطالعات انجام شده در حوزه طراحی ضربه‌گیرها، به دلیل پیچیدگی فرآیند و لزوم افزایش راندمان و عملکرد ضربه‌گیرها، این حوزه همچنان نیازمند تحقیق است. در این مقاله در ادامه مطالعات انجام شده توسط نویسندگان، نحوه عملکرد ضربه‌گیرهای استوانه‌ای با درپوش کروی در شرایط بارگذاری شبه‌استاتیک بررسی شده و اثر

1- Rigid-Perfectly Plastic Material

$$\frac{H}{R} = 1.84 \sqrt{\frac{t}{2R}} \quad (۳)$$



شکل (۲): نحوه چین خوردگی در طرح آبرومویج و جونز [۱۵].

### ۳- تحلیل آزمایشگاهی فروریزش سازه‌های جدار نازک ترکیبی

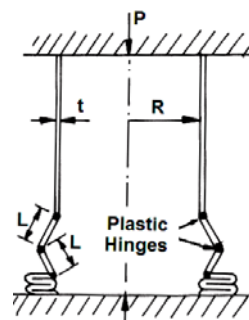
نحوه آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی و ساخت تجهیزات تأمین‌کننده شرایط مرزی، اندازه‌گیری دقیق هندسی و تعیین خواص مکانیکی پوسته‌های استوانه‌ای با درپوش کرومی آلومینیومی از جمله مراحل است که باید قبل از انجام آزمایش فروریزش نمونه‌های استوانه‌ای با درپوش کرومی تحت اثر بارگذاری محوری مورد توجه قرار گیرند. سازه‌های استوانه‌ای با درپوش کرومی جدار نازک با روش چرخ‌کاری دستی ساخته شده و پس از تعیین ابعاد هندسی آن‌ها و کنترل ابعادی و ظاهری قطعه با قرار گرفتن در یک نگهدارنده<sup>۴</sup>، 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 کرومی پوسته ترکیبی شده و سپس ارتفاع بخش استوانه‌ای پس از چروک‌های متقارن محوری متوالی تا مقدار معینی کاهش یافته است. مقدار نیروی لازم برای تغییرشکل پوسته‌ها در حین تغییرشکل اندازه‌گیری 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

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.

$$\frac{H}{R} = 1.905 \sqrt{\frac{t}{2R}} \quad (۱)$$

### ۲-۲ طرح آبرامویج<sup>۲</sup> و جونز<sup>۳</sup>

در سال ۱۹۸۳ دو محقق بریتانیایی آزمایش‌های محوری فشاری شبه‌استاتیک و دینامیکی را بر روی دسته‌ای از لوله‌های جدار نازک فولادی با مقطع مدور و مربعی انجام دادند [۱۴]. آن‌ها مفهوم مهم فاصله لهیدگی مؤثر (δ) را طبق شکل ۲ در راستای ارتقای طرح الکساندر ارائه نمودند.



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

برای حالت متقارن، آبرامویج و همکارانش معادله طول چین را در سال ۱۹۸۴ به صورت 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.

$$\frac{H}{R} = 1.618 \sqrt{\frac{t}{2R}} \quad (۲)$$

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.

4- Fixture

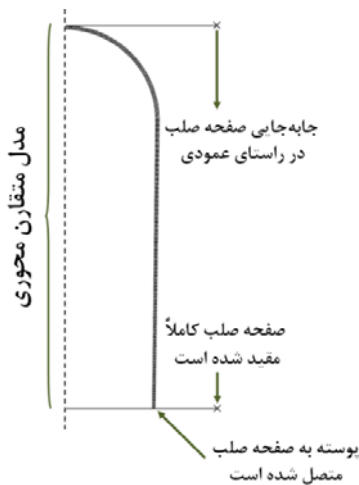
#### ۴- شبیه‌سازی فروریزش سازه‌های جدارنازک ترکیبی

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:

الف- دیواره پوسته کروی و

ب- دیواره پوسته استوانه‌ای.

در شبیه‌سازی حاضر طبق شکل ۵، دیواره پوسته‌های استوانه‌ای و کروی به ترتیب با صفحه‌ای عمودی و خمیده طراحی شده است.



شکل (۵): هندسه پوسته استوانه‌ای با درپوش کروی در شبیه‌سازی متقارن محوری.

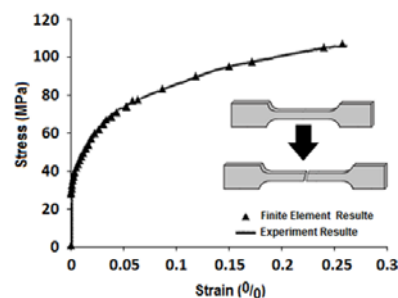
رفتار غیرخطی مواد در تغییرشکل‌های بزرگ و اثر برخورد چروک‌های پوسته‌های استوانه‌ای همراه درپوش کروی با یکدیگر یا با سطح بالایی و پایینی ابزار، طراحی شده تا شرایط تحلیل با شرایط آزمایشگاهی کاملاً منطبق باشند.

تغییرشکل محوری ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه در حین فروریزش تأمین شده است. ضخامت گرده اولیه آلومینیومی ۱ میلی‌متر انتخاب شده است و کاهش ضخامت پوسته استوانه‌ای با درپوش کروی ناشی از عملیات چرخ‌کاری در کلیه نقاط اندازه‌گیری شد که مقدار حداکثر کاهش ضخامت ۰/۱۵ میلی‌متر در انتهای بخش استوانه‌ای است. قطر نمونه‌های استوانه‌ای با درپوش کروی  $47/0 \pm 0/4$  میلی‌متر و ارتفاع آن  $97/5 \pm 0/5$  میلی‌متر است. شکل ۳ پوسته استوانه‌ای با درپوش کروی را تحت اثر شرایط مرزی یک‌سرگردار نشان داده است.



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

تنش کرنش مهندسی ماده آلومینیومی 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 کرنش‌سنج به نمونه‌های آزمایشگاهی به ترتیب ۵۷/۵ گیگا پاسکال و ۰/۳ تعیین شد. بر طبق این نمودار، مقدار تنش تسلیم برابر با ۸۳ مگاپاسکال استخراج شد. مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی کشش ساده ماده آلومینیومی در شکل ۴ نشان می‌دهد، نرم‌افزار المان محدود قادر به شبیه‌سازی رفتار این ماده در تحقیق حاضر است.



شکل (۴): تنش-کرنش مهندسی ماده آلومینیومی.

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

#### ۴-۱- معیارهای مقایسه عملکرد فروریزش ضربه‌گیرها

به طور کلی، مهم‌ترین معیارهای مقایسه عملکرد فروریزش ضربه‌گیر به صورت زیر تعریف شده‌اند:

**انرژی ویژه:** یکی از معیارهای مقایسه بازده ضربه‌گیرها، انرژی ویژه است که نسبت انرژی جذب شده به جرم تغییرشکل یافته ضربه‌گیر تعریف شده است.

**بازده لهیدگی:** نسبت طول لهیده شده ضربه‌گیر به طول اولیه آن است.

**متوسط نیروی فروریزش:** نیروی فروریزش ضربه‌گیر از مشخصه‌های ضربه‌گیر است و عکس‌العمل آن موجب ایجاد شتاب‌کاهنده در وسیله‌ای شده که ضربه‌گیر به آن متصل است. در صورتی که ضربه‌گیری به سطح صلب برخورد کند نیروی فروریزش ضربه‌گیر تعیین‌کننده شتاب مرکز جرم آن است. سرعت وسایل پس از برخورد ضربه‌گیر بر اساس متوسط نیروی فروریزش و زمان برخورد محاسبه شده است. ضربه‌گیری ایده‌آل 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:** به طور معمول حداکثر نیرو در ضربه‌گیرهای فروریزشی مربوط به تغییرشکل الاستیک است که پس از آغاز تغییرشکل پلاستیک به سرعت کاهش یافته است. در طراحی جنس ضربه‌گیرها 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٪

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): مقادیر منحنی تنش-کرنش پلاستیک.

تنش حقیقی (MPa)	۸۳	۹۰	۹۸	۱۰۲	۱۰۵
کرنش پلاستیک	۰	۰/۰۵۱	۰/۱۰۳	۰/۱۴۳	۰/۱۶۵

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 بر روی سطوح صلب تعریف شده است.

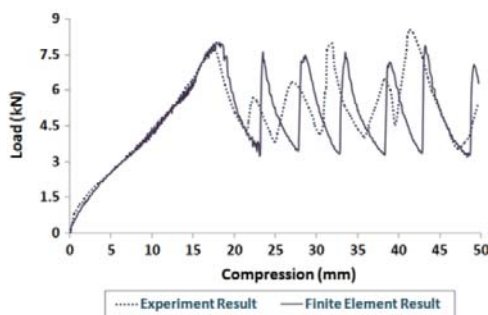
در این مطالعه بین سطح خارجی پوسته استوانه‌ای همراه درپوش کروی با سطح صلب بالایی شرط تماس تعریف شده و مقدار ضریب اصطکاک ۰/۱۵ در نظر گرفته شده است [۹-۱۱]. هم‌چنین در این شبیه‌سازی شرط تماس در سطوح خارجی و داخلی پوسته استوانه‌ای با درپوش کروی پیش‌بینی شده است تا از نفوذ گره‌های ورق لوله استوانه‌ای با درپوش کروی در حین چروک خوردگی 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.

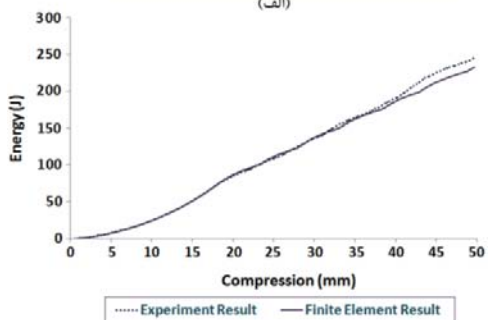
نوع المان‌ها برای تحلیل اجزای محدود وابسته به هندسه نمونه و روش تحلیل است. برای شبیه‌سازی پوسته استوانه‌ای با درپوش کروی و صفحات صلب به ترتیب از المان‌های متقارن محوری چهارگوش و المان صلب خطی استفاده شده

با شروع کماتش استوانه به صورت 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. به طور کلی، نیروی فروریزش با تشکیل چین داخلی و خارجی به ترتیب افزایش و کاهش یافته، در نتیجه منحنی نیرو-جابجایی فروریزش متقارن محوری بدون در نظر گرفتن اولین بیشینه نیرو همواره به صورت تناوبی تغییر می‌کند.

نتایج تجربی و شبیه‌سازی در جدول ۲ با یکدیگر مقایسه شده است. انرژی جذب‌شده از محاسبه سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی در تحلیل آزمایشگاهی محاسبه شده است و در شبیه‌سازی از محاسبه مقدار کار خارجی تعیین شده‌اند. مقایسه این مقادیر نشان می‌دهد، نتایج تجربی و شبیه‌سازی فروریزش پوسته استوانه‌ای با درپوش کروی تحت اثر بارگذاری شبه‌استاتیک خطای ناچیزی داشته و خطای طرح برای محاسبه انرژی جذب‌شده نسبت به نتایج آزمایشگاهی کمتر از ۰.۴٪ است.



(الف)

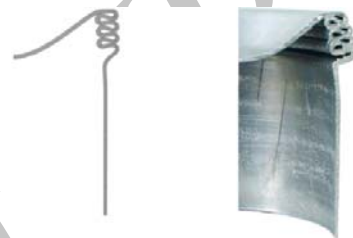


(ب)

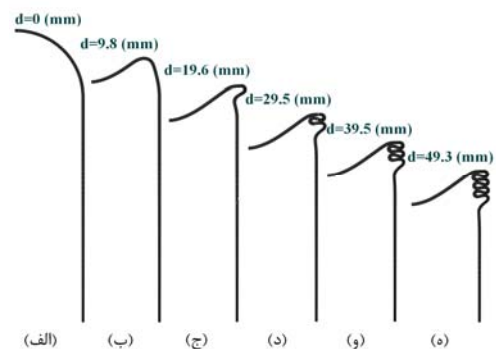
شکل (۸): مقایسه نتایج تجربی و طراحی

(الف) نمودار نیرو-جابجایی (ب) نمودار انرژی-جابجایی.

مشابه با شرایط آزمایشگاهی محاسبه شده است. هندسه برش‌خورده 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 (d) نشان داده است. فروریزش پوسته استوانه‌ای با درپوش کروی از بخش کروی آغاز شده که باعث کماتش 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 متقارن محوری پوسته استوانه‌ای با درپوش کروی تحت بارگذاری محوری.

در شکل ۸ نمودار نیرو-جابجایی و انرژی-جابجایی فروریزش متقارن محوری این نمونه استوانه‌ای با درپوش کروی را براساس نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در شروع بارگذاری، نیرو به صورت 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 کماتش است. نیروی لازم برای تغییر شکل محوری لوله استوانه‌ای با درپوش کروی

**جدول (۲): مقایسه نتایج تجربی و طراحی.**

نتایج	اولین بیشینه نیروی فروریزش	متوسط نیروی فروریزش	انرژی جذب شده
	(KN)	(KN)	(J)
تجربی	۷/۷	۴/۹۳	۲۴۵
مدل سازی	۷/۹	۴/۷۲	۲۳۴

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 هم‌خوانی دارد.

در این بررسی، طرح آبرامویچ و جونز درصد خطای پایین‌تر 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.

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

نتایج	تجربی	طرح الکساندر	طرح آبرامویچ و جونز
طول چین (میلی‌متر)	۶/۱۵	۶/۵۳	۶/۳۰
درصد خطا	-	۶	۲

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**

به دلیل تنوع عوامل تأثیرگذار بر پدیده فروریزش پوسته استوانه‌ای با درپوش کروی، مانند ابعاد هندسی، جنس پوسته، شرایط تکیه‌گاهی و نحوه بارگذاری، هنوز دسته‌بندی مناسبی برای پیش‌بینی رفتار فروریزش سازه‌های جدار نازک ترکیبی در شرایط مختلف ارائه نشده است. مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی در بخش قبلی مقاله نشان می‌دهد مدل اجزاء محدود ارائه شده می‌تواند پدیده فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای با درپوش کروی را تحت اثر بارگذاری استاتیکی محوری با دقت مناسبی مدل‌سازی کند. لذا از این روش برای بررسی اثر پارامترهای مؤثر بر نحوه فروریزش سازه جدار نازک استوانه‌ای با درپوش کروی تحت اثر بارگذاری محوری استفاده می‌شود.

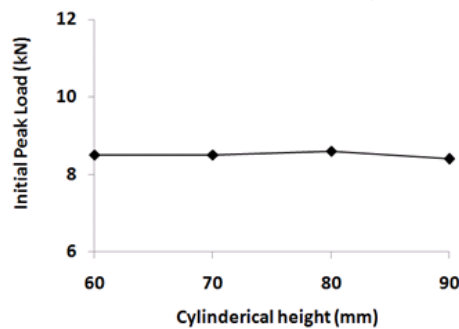
**۶-۱- اثر زاویه نیم‌رأس**

زاویه نیم‌رأس یکی از عوامل مؤثر بر فروریزش پوسته‌های متقارن محوری 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 جذب شده لوله استوانه‌ای با درپوش کروی را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، در این بررسی زاویه نیم‌رأس در محدوده ۰ تا ۱۲ درجه تغییر داده شده است. در این مطالعه، طول پوسته‌های استوانه‌ای و ضخامت ثابت و به ترتیب 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 ضربه‌گیرهای ترکیبی می‌توان 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 می‌کند. کاهش انرژی جذب شده برای این پوسته مخروطی، به دلیل نحوه فروریزش آن قابل توجه است. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود طول چین‌های تشکیل شده این پوسته مخروطی در مقایسه با

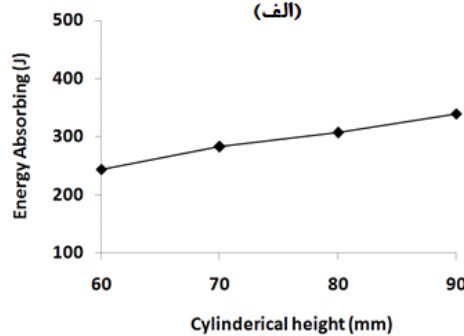


### ۳-۶- ارتفاع بخش استوانه‌ای

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



(الف)



(ب)

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

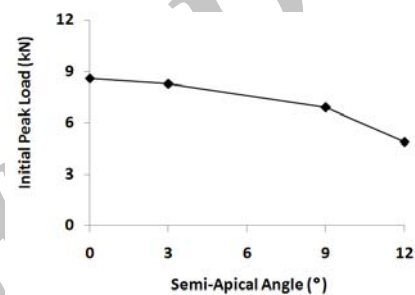
### ۴-۶- ارتفاع بخش کروی

در این بخش با ثابت در نظر گرفتن مختصات پوسته استوانه‌ای، عامل ارتفاع بخش کروی از ۰ تا ۳۵ میلی‌متر تغییر داده شده است. همان‌طور 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

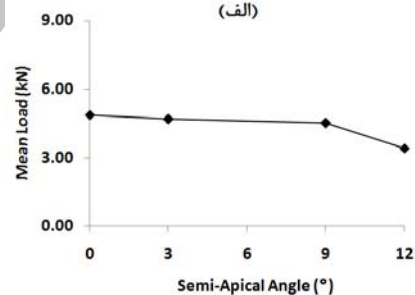
پوسته‌های دیگر کوچک‌تر است. بنابراین انتظار می‌رود، انرژی جذب شده این پوسته به نسبت قابل توجهی کاهش یابد.

### ۲-۶- اثر ارتفاع

یکی دیگر از عوامل مهم در طراحی ضربه‌گیرهای مکانیکی، انتخاب ابعاد ضربه‌گیر به ویژه ارتفاع آن است. در هندسه مورد مطالعه در این تحقیق، سازه از دو ارتفاع مختلف تشکیل شده است. بنابراین برای بررسی دقیق‌تر اثر هر یک از بخش‌ها به صورت مستقل بررسی شده است.

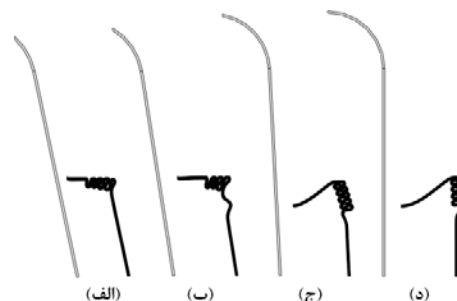


(الف)



(ب)

شکل (۹): اثر زاویه نیم‌رأس بر الف- نیروی اولیه و ب- انرژی جذب شده سازه‌های جدار نازک ترکیبی.



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

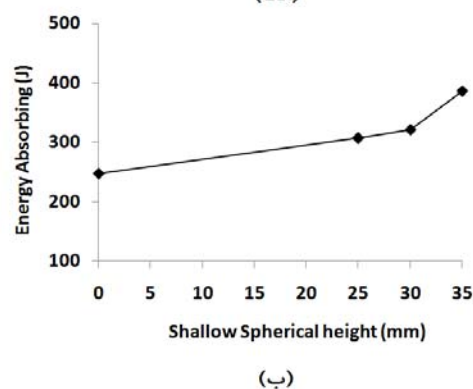
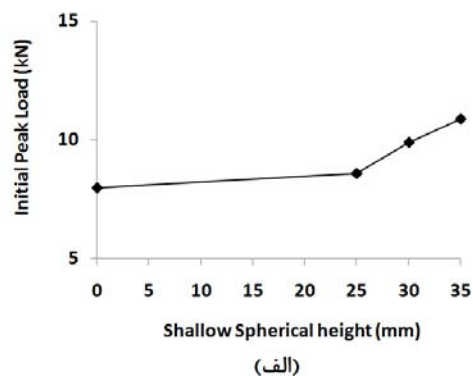
برابری خوبی با نتایج تجربی دارد. از بررسی فروریزش سازه‌های جدار نازک ترکیبی (استوانه‌ای با درپوش کرووی) نتایج زیر به دست می‌آیند:

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

#### مراجع

1. Wierzbicki, T. and Abramowicz, W. "On the Crashing Mechanics of Thin-Walled Structures", J. Appl. Mech, Vol. 50, pp. 727-739, 1983.
2. Abramowicz, 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

مسطح خود خواهند شد. افزایش ارتفاع درپوش کرووی پوسته‌های استوانه‌ای باعث افزایش بیشینه نیروهای فروریزش شده، بنابراین اولین چین متقارن محوری در ناحیه پایین‌تری نسبت به پوسته استوانه‌ای تشکیل شده که این امر باعث کاهش چین خوردگی پوسته‌های استوانه‌ای خواهد شد.



شکل (۱۲): اثر ارتفاع بخش کرووی بر الف- نیروی اولیه و ب- انرژی جذب شده سازه‌های جدار نازک ترکیبی ترکیبی.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، فروریزش متقارن محوری پوسته‌های جدار نازک استوانه‌ای با درپوش کرووی تحت بارگذاری محوری به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی شده است. با توجه به نتایج آزمایش برای تحلیل تغییر شکل سازه جدار نازک استوانه‌ای با درپوش کرووی و برای کاهش زمان تحلیل عددی فرآیند فروریزش آن، از مدل متقارن محوری برای شبیه‌سازی آن استفاده شد. نتایج طراحی نشان می‌دهد، نمودار نیرو- جابه‌جایی، نمودار انرژی- جابه‌جایی و نحوه فروریزش پوسته استوانه‌ای با درپوش کرووی تحت بارگذاری شبه- استاتیکی

11. 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.
12. 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.
13. 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).
14. Abramowicz, W. "The Effective Crushing Distance in Axially Compressed Thin-walled Metal Columns", *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 1, No. 3, pp. 309–317, 1983.
15. Abramowicz, W. and Jones, N. "Dynamic Axial Crushing of Circular Tubes", *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 2, No. 3, pp. 263–281, 1984.
16. 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.
17. 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.
4. 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.
5. Gupta, N.K. and Abbas, H. "Axisymmetric Axial Crushing of Thin Frusta", *Thin-Walled Struct.*, Vol. 36, No. 3, pp.169–179, 2000.
6. Yamasaki, K. and Han, J. "Maximisation of Crushing Energy Absorption of Cylindrical Shells", *Adva. Eng. Soft.*, Vol. 31, No. 6, pp.425–423, 2000.
7. 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.
8. 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", *Thin-walled Struct*, Vol. 49, No. 6, pp. 743–752, 2011.
10. 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.

Archive