



## بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار لهیدگی پوسته‌های استوانه‌ای برنجی

سجاد آذرخش<sup>۱\*</sup>، عباس رهی<sup>۲</sup> و علی قمریان<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی

<sup>۳</sup> باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۱۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۱۲/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۵/۰۲

### چکیده

سازه‌های جدارنازک به‌طور گسترده به‌عنوان جاذب انرژی در صنایع اتومبیل و هوافضایی استفاده می‌شوند. این مقاله رفتار لهیدگی و پاسخ انرژی جذب‌شده لوله‌های استوانه‌ای برنجی را با استفاده از آزمایش و مدل اجزاء محدود غیرخطی بررسی می‌کند. در مطالعه‌ی آزمایشگاهی نمونه‌های استوانه‌ای برنجی به‌روش اکستروژن ساخته شده و بین دو صفحه‌ی صلب تحت اثر بارگذاری شبه‌استاتیکی قرار گرفته و سپس نحوه‌ی 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 تغییرشکل بزرگ در این شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد مدل ارائه‌شده روش مناسبی برای تعیین پاسخ فروریزش و تعیین نمودار نیرو-جابجایی و میزان انرژی جذب‌شده ارائه می‌کند. تکنیک شبیه‌سازی عددی صحت‌گذاری شده برای انجام مطالعه پارامتری لوله‌های استوانه‌ای برنجی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ادامه اثر پارامترهای مهم مانند عیوب هندسی (گردادیان ضخامت، تغییرشکل موجی)، شرایط مرزی، زاویه‌ی نیم‌رأس، زاویه‌ی برخورد، تقویت‌کننده‌های چند سلولی ستونی و سرعت برخورد بررسی می‌شود. نتایج این مطالعه، به‌وضوح مزیت استفاده از لوله‌های استوانه‌ای برنجی را به‌عنوان جاذب بیان می‌کند.

**کلمات کلیدی:** لوله‌های استوانه‌ای؛ لهیدگی؛ انرژی جذب شده؛ روش اجزاء محدود.

## Experimental and Numerical Investigation of Crushing of Brass Cylindrical Tubes

S.Azarakhsh<sup>1,\*</sup>, A.Rahi<sup>2</sup>, A.Ghamarian<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Young Researchers and Elite Club, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.

<sup>2</sup> Faculty of Mechanical & Energy Engineering, Shahid Beheshti University, A.C., Tehran, Iran.

<sup>3</sup> Young Researchers and Elite Club, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

### Abstract

Thin-walled structures have been extensively used as energy absorbers in automobile and aerospace industries. This paper treats the collapse behaviour and energy absorption response of brass cylindrical tubes subjected to axial loading, using experiment and non-linear finite element models. In experimental approach, brass cylindrical samples were made by the process of extrusion. 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 behaviour, 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. Numerical simulation techniques validated are used to carry out a parametric study of brass cylindrical tubes. In the following, influence of important parameters such as geometry imperfection (wall thickness gradient and wave formation), boundary condition, semi-apical angle, multi-cell columns reinforce and velocity impact was investigated. The results of this paper highlight the advantages of using brass cylindrical tubes as energy absorber.

**Keywords:** Cylindrical tubes; Collapse, Energy absorption; Finite element method.

## ۱- مقدمه

هدف از طراحی و ساخت سازه‌های ضربه‌پذیر، جذب انرژی ضربه به صورت برگشت‌ناپذیر، محدود کردن نیروهای وارد شده به سرنشینان و کاهش خسارت به وسیله‌ی متحرک است. واضح است که تحقق این هدف مستلزم بهبود خواص جذب انرژی قطعات در هنگام تصادف و کاهش وزن قطعات وسیله‌ی متحرک است. بهبود ضربه‌پذیری سازه باید با توجه به محدودیت در مقدار نیرو و میزان تغییر شکل انجام شود. اگر استحکام سازه به‌منظور کاهش خسارت افزایش یابد، نیروی زیادی به هنگام تصادف به سرنشینان وارد خواهد شد که عملاً قابل قبول نیست. از طرف دیگر، اگر به منظور کاهش نیروهای وارده از موادی با استحکام پایین استفاده شود با کوچکترین برخورد، وسیله‌ی متحرک خسارت عمده خواهد دید. بنابراین راه‌حل بهینه استفاده از سیستم‌های جذب انرژی در بخش‌های حساس وسیله‌ی متحرک است. این سیستم‌ها باید در هنگام تصادف قادر باشند در یک مقدار نیروی قابل پیش‌بینی، توانایی جذب انرژی زیاد و تغییر شکل کنترل شده را دارا باشند. سیستم‌های استفاده شده بدین صورت معمولاً قطعات یکبار مصرف هستند. نیاز به جذب انرژی زیاد و محدودیت در مقدار نیرو ایجاب می‌کند که سیستم‌های جذب‌کننده‌ی انرژی دارای قابلیت لهیدگی زیاد باشند. از جمله مهم‌ترین سیستم‌های جذب انرژی پوسته‌های جدارنازک است. سازه‌های جدارنازک که از آن‌ها با عنوان ضربه‌گیرهای فروریزی یاد می‌شود، به شیوه‌های گوناگونی همچون نیروهای الاستیک، نیروی اصطکاک، شکست، کشش، لهیدگی و شیوه‌های دیگر، انرژی جنبشی جسم متحرک را جذب کرده و مانع از انتقال انرژی به بخش‌های حساس می‌شود. مطالعه‌ی رفتار فروریزش سازه‌های جدارنازک برای تعیین ظرفیت جذب انرژی آن‌ها و تغییرات نیرو یا شتاب اعمالی به تجهیزات در حین فروریزش سازه جدارنازک اهمیت بالایی داشته و محققین بسیاری تاکنون این موضوع را بررسی نموده‌اند [۱-۵].

گوپتا مقاله‌ای را تحت عنوان بررسی فروریزش محوری لوله‌های جدارنازک استوانه‌ای منتشر نمود [۶]. وی با این فرض که در فروریزش به شیوه‌ی چین‌دار بخشی از چین به داخل و بخشی از آن به خارج لوله شکل می‌گیرد، برای پیش‌بینی منحنی نیرو - لهیدگی در تشکیل یک چین،

رابطه‌ای ارائه کرد. در این مطالعه، ابعاد لوله‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شد که همگی به‌شیوه چین‌دار شدن فرو ریختند. متوسط نیروی فروریزش و منحنی نیرو - لهیدگی تئوری با نتایج تجربی هم‌خوانی داشت. ولی بیشینه و کمینه نیروی لهیدگی به ترتیب بالاتر و پایین‌تر از مقدار تجربی آن قرار گرفت. آزمایش‌های بیشتر نشان داد که علت این اختلاف به‌خاطر این فرض اشتباه است که شکل‌گیری یک چین در بیشینه نیرو آغاز می‌شود و در کمینه نیرو پایان می‌یابد. سینگاس رفتار فروریزش نامتقارن پوسته‌های استوانه‌ای را تحت بارگذاری محوری تحلیل کرد [۷]. وی برای اولین بار مدلی تحلیلی برای محاسبه‌ی بار متوسط فروریزش جاذب‌های استوانه‌ای به‌شیوه نامتقارن ارائه نمود که اصول کلی آن مانند روش مدل فروریزش متقارن بر پایه محاسبه‌ی انرژی خمشی و کششی در ناحیه‌ی فروریزش بود. یامازاکی و هان [۸] توانستند به کمک روش المان محدود شیوه‌ی صحیح فروریزش چین‌دار، الماسی و اولر را شبیه‌سازی کنند. نتایج این شبیه‌سازی با آزمایش ضربه افقی لوله مقایسه شد و تطابق خوبی مشاهده گردید. این پژوهشگران با استفاده از روش تقریب سطح پاسخ و نتایج تجربی و شبیه‌سازی، ابعاد لوله‌ی آلومینیومی را به‌گونه‌ای تعیین کردند که لوله به‌شیوه چین‌دار فرو ریخت. الگالیب و لیمام مقاله‌ای تحت عنوان بررسی تجربی و عددی فروریزش محوری استاتیکی و دینامیکی پوسته‌های آلومینیومی منتشر کردند [۹]. در این مطالعه، از روش تحلیل اجزای محدود غیرخطی برای شبیه‌سازی شرایط آزمایش شبه‌استاتیکی و دینامیکی استفاده شد. نیروی فروریزش و نحوه‌ی فروریزش در شبیه‌سازی تطابق خوبی با نتایج تجربی داشت. در این مطالعه، عوامل مؤثر بر فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای نظیر سرعت برخورد، تأثیر عیوب اولیه و ... بررسی شد. کاراگیزوا و همکارانش نیز به مطالعه‌ی رفتار فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری محوری پرداختند [۱۰]. این محققان با استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود به بررسی اثر خواص اینرسی ماده روی فروریزش متقارن محوری پرداختند. در این تحقیق مشخص شد که جذب انرژی ضربه‌گیرها به سرعت اعمال بار و جرم ضربه‌زننده بستگی دارد. یان ونی و همکاران مقاله‌ای تحت عنوان شبیه‌سازی فروریزش لوله‌های آلومینیومی تقویت‌شده شده با فوم منتشر کردند [۱۱]. در

جرم برخورد کننده بر نسبت انرژی جذب شده دینامیکی به استاتیکی مورد بررسی قرار گرفت.

در مطالعه حاضر، رفتار پوسته‌های استوانه‌ای برنجی تحت بارگذاری محوری بررسی می‌شود. مدلی برای شبیه‌سازی فروریزش استفاده می‌شود که در آن اثر غیرخطی مواد و تغییرشکل بزرگ و تماس در آن لحاظ شده است. تطابق قابل قبول نتایج شبیه‌سازی و تجربی بیانگر صحت مدل‌سازی انجام شده است. از مدل صحنه‌گذاری شده برای بررسی اثر عوامل هندسی (نظیر زاویه‌ی نیم‌رأس و اثر زاویه‌ی برخورد)، تقویت‌کننده‌های چند سلولی ستونی، شرایط مرزی و همچنین اثر مقدار سرعت برخورد جسم ضربه‌زننده استفاده می‌شود.

## ۲- مطالعه‌ی آزمایشگاهی

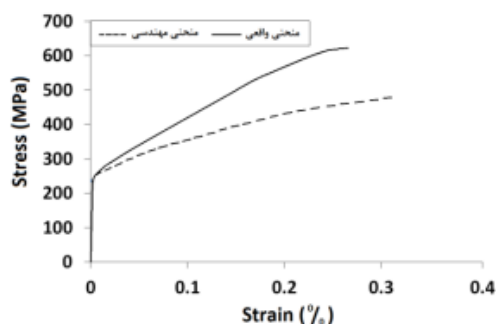
پوسته‌های استوانه‌ای از جنس آلیاژ برنجی است که به روش اکستروژن ساخته شده است. اکستروژن فرایند تغییرشکل است که در آن بلوک فلزی برنجی در اثر اعمال فشار از قالبی با سطح مقطع کوچکتر عبور می‌کند. به‌طور کلی، ابعاد خارجی لوله به وسیله قالب و ابعاد داخلی به‌وسیله سنبه شکل می‌پذیرد. نیروهای لازم برای این متراکم‌سازی به‌وسیله‌ی تماس بلوک با محفظه‌ی قالب ایجاد می‌شوند که مقادیر آن‌ها بسیار زیاد است. ضخامت دیواره نیز به‌وسیله سنبه و قالب کنترل می‌شود. در این مطالعه، ضخامت پوسته‌های استوانه‌ای برنجی تولید شده به‌روش اکستروژن ۱ میلی‌متر انتخاب شده است و قطر و طول آن به‌ترتیب در حدود ۵۰ و ۵۵ میلی‌متر است.

به‌طور کلی فرایند اکستروژن باعث کاهش ضخامت دیواره‌ی پوسته‌های استوانه‌ای می‌شود. شکل ۱-الف تغییر ضخامت یا اصطلاحاً گرادیان ضخامت سطح دیواره‌ی پوسته‌ی استوانه‌ای را نشان می‌دهد. شکل ۱-ب نیز منحنی نقاط ثبت شده را در طول نمونه‌ی استوانه‌ای نشان می‌دهد که توسط ساعت اندازه‌گیری شده است. محور افقی این نمودار بیان‌گر میزان برآمدگی دیواره‌ی نمونه‌های استوانه‌ای است. در تحقیق حاضر، دو موج در دیواره‌ی نمونه‌های برنجی مشاهده شد.

این مطالعه، فروریزش پوسته‌های تقویت‌شده با فوم شبیه‌سازی شده است و بین نمودارهای نیرو - جابجایی شبیه‌سازی عددی و تجربی تطابق خوبی مشاهده شد. نتایج این تحقیق نشان داد پوسته‌های تقویت‌شده با فوم نسبت به توخالی قابلیت جذب انرژی بالایی دارند. همچنین در این مطالعه اثر پارامترهای هندسی و اصطکاک بر انرژی جذب شده فروریزش بررسی شد. رازندران و همکارانش در مقاله‌ی اثر فوم‌های سلول بسته‌ی آلومینیومی در لوله‌های استوانه‌ای فولادی را بررسی کردند [۱۲]. در این مطالعه منحنی‌های نیرو- جابه‌جایی و شتاب- زمان به‌ترتیب از آزمون‌های شبه‌استاتیکی و دینامیکی استخراج شدند و میزان تغییرشکل نمونه‌های آزمایشگاهی توخالی و تقویت شده با یکدیگر مقایسه شدند.

مرزبان‌راد و همکارانش [۱۳] نشان دادند که مقطع بیضی نسبت به مقاطع مربع و دایره‌ای ظرفیت جذب انرژی بهتری دارد و چنانچه جنس مقطع از آلومینیوم به فولاد تغییر کند زمان مورد نیاز جهت جذب انرژی و لهیدگی لوله تا ۴/۵ برابر بیشتر می‌شود. صالح غفاری و همکارانش [۱۴] دو نوع مقطع جدارنازک بهبود یافته با کارایی جذب انرژی بهتر را معرفی کردند. در نوع اول، حلقه‌های فولادی از انتهای بالایی لوله جا زدند و در نوع دوم، شیارهای محیطی بر روی لوله ایجاد کردند که هر دو وضعیت موجب افزایش جذب انرژی گردید. علوی‌نیا و حداد [۱۵] نحوه‌ی تغییرشکل و ظرفیت جذب انرژی لوله‌های جدارنازک با هندسه‌های مختلف (مقطع دایره، مربع، مستطیل، شش‌ضلعی، مثلث، هرمی و مخروطی) را به‌صورت تجربی و عددی بررسی نمودند و نشان دادند که در بین مقاطع مورد بررسی، مقطع دایره‌ای دارای بیشترین میزان جذب انرژی و نیروی متوسط لهیدگی است.

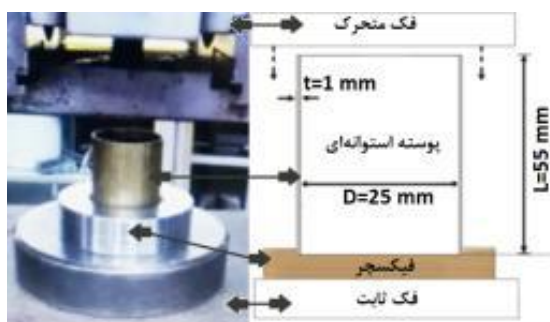
قمریان و ابدی فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای آلومینیومی سر بسته تقویت‌شده با فوم را تحت بارگذاری محوری و به‌صورت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که پوسته‌های استوانه‌ای سر بسته، جاذب انرژی بهتری نسبت به پوسته‌های استوانه‌ای سرباز هستند [۱۶]. آذرخش و همکارانش نیز اخیراً به مطالعه‌ی رفتار فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای دوجداره برنجی تحت بارگذاری محوری پرداختند [۱۷]. در این تحقیق اثر عوامل هندسی نظیر ضخامت، زاویه‌ی نیم‌رأس و همچنین سرعت و



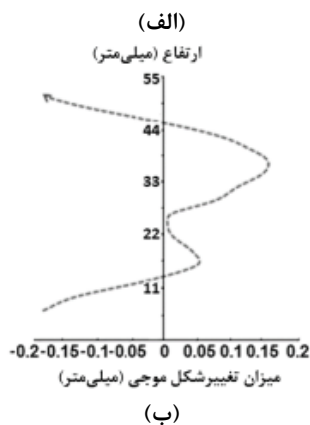
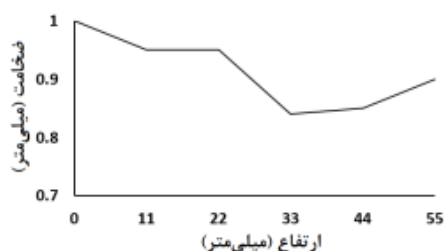
شکل ۲- نمودار تنش- کرنش ماده‌ی آلیاژی پوسته‌ی برنجی

در مطالعه حاضر، شرایط مرزی فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری محوری، یک‌سرگردار انتخاب شده است. بنابراین برای برقراری شرایط مرزی از قطعه‌ای فولادی برای مقید کردن قاعده‌ی تحتانی نمونه‌ها استفاده شده است. در سطح این قطعه شیار (هم‌قطر با پوسته‌های استوانه‌ای) ایجاد شده است تا از حرکت افقی و عمودی پوسته‌ی استوانه‌ای در طی فروریزش آن جلوگیری شود. شکل ۳ نمایی از شرایط مرزی و نحوه‌ی بارگذاری فروریزش نمونه‌های استوانه‌ای را به‌صورت شماتیک و تجربی نشان می‌دهد.

محدوده‌ی سرعت بارگذاری دستگاه کشش-فشار یونیورسال زویک مورد استفاده ۲ تا ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه است. از آنجا که سرعت بارگذاری شبه‌استاتیکی اثری بر رفتار فروریزش پوسته‌های فلزی ندارد، بنابراین در این مطالعه، آزمایش فروریزش شبه‌استاتیکی دو نمونه‌ی استوانه‌ای (CT1 و CT2) همراه با سرعت بارگذاری ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه و میزان جابه‌جایی تقریباً ۴۰ میلی‌متر انجام می‌شود.



شکل ۳- شرایط مرزی و نحوه‌ی بارگذاری نمونه‌های استوانه‌ای



شکل ۱- الف) گرادیان ضخامت دیواره و ب) میزان برآمدگی سطح پوسته‌ی استوانه‌ای برنجی

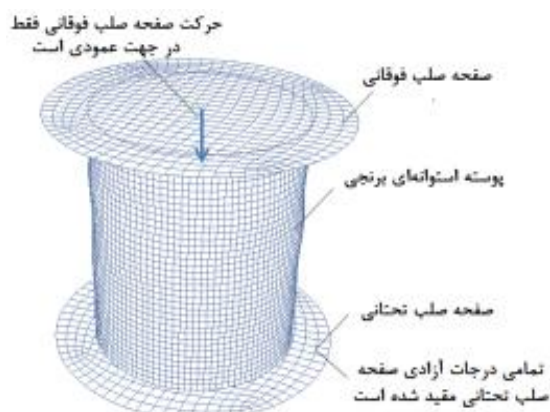
برای شناسایی خواص مکانیکی ابتدا یکی از نمونه‌ها با روش وایرکات و طبق استاندارد JANAF برش داده شده و تعداد سه نمونه استاندارد آماده‌سازی شد. سپس تست کشش نمونه‌ها توسط دستگاه کشش-فشار یونیورسال زویک دانشگاه صنعتی امیرکبیر انجام شد. این دستگاه دارای دو فک فوقانی و تحتانی است. فک تحتانی دستگاه ثابت و فک فوقانی متحرک است و می‌تواند با سرعت ثابت یا متغیر، مسافت تعریف شده را طی کند. اعمال نیروی کششی-فشاری تا سقف ۶۰ تن و با دقت یک ده هزارم ظرفیت آن توسط سیستم هیدرولیک میسر است. در این مطالعه، تست کشش نمونه‌ها با سرعت ۲/۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. شکل ۲ نمودار تنش-کرنش ماده‌ی آلیاژی پوسته‌ی برنجی را در حالت مهندسی و حقیقی نشان می‌دهد که نحوه‌ی اجرای آزمون کشش آن براساس استاندارد ASTM E8-M است. مدول الاستیسیته و ضریب پواسون این آلیاژ به ترتیب ۹۸ گیگاپاسکال و ۰/۳ تعیین شده است. بر طبق این نمودار، مقدار تنش تسلیم ماده نیز برابر ۲۳۶ مگاپاسکال محاسبه شده است.

در آزمایش فشار محوری، شیوه‌ی فروریزش برخی از این نوع پوسته‌ها به صورت نامتقارن است.

بهترین روش برای ایجاد عیوب هندسی در مدل عددی استفاده از مدهای کماتش است. در این تحقیق، برای به دست آوردن مدهای کماتش و مقادیر ویژه، پوسته‌ی استوانه‌ای با شرایط مرزی تعریف شده در مسئله تحت اثر نیروی واحد در جهت نوع بارگذاری قرار داده می‌شود. از آنجا که مد اول کماتشی پوسته مورد مطالعه به صورت متقارن محوری است، بنابراین به دلیل وجود شیوه‌ی فروریزش الماسی سه‌گوش آن در نتایج آزمایشگاهی قابل استفاده نیست. مشابه این پدیده برای پوسته‌های آلومینیومی مراجع [۱۸] نیز تکرار شده است. شکل ۶ مد سوم کماتشی مورد استفاده برای فروریزش استوانه‌ای را نشان می‌دهد که شیوه‌ی فروریزش آن‌ها براساس نتایج تجربی نامتقارن است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای وضوح بیشتر صفحه‌های صلب آن‌ها حذف شده است.



شکل ۴- فروریزش نهایی پوسته‌های استوانه‌ای برنجی



شکل ۵- هندسه‌ی پوسته‌ی استوانه‌ای تحت شرایط مرزی یک‌سرگیردار و بارگذاری محوری

شکل ۴ فروریزش نهایی این دو نمونه را تحت شرایط مرزی یک‌سرگیردار نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نحوه‌ی فروریزش نمونه‌های آزمایشگاهی پوسته‌های استوانه‌ای به صورت الماسی سه‌گوش است، علت این امر را می‌توان در عیوب هندسی حاصل از اکستروژن نمونه‌ها و شرایط مرزی جستجو کرد. تغییر شکل سطحی (برآمدگی یا تغییر شکل موجی) و تغییر ضخامت دیواره‌ی آن از جمله معایب ساخت نمونه‌ی استوانه‌ای به روش اکستروژن است. این پدیده در نتایج آزمایشگاهی دیگری نیز برای فروریزش نمونه‌های آزمایشگاهی متفاوت دیده شده است [۱۷]. در تحقیق حاضر به دلیل وجود عیوب هندسی در نمونه‌های آزمایشگاهی، فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای به شیوه‌ی نامتقارن مشاهده شده است. معمولاً در فروریزش نامتقارن با صرف نظر کردن از اولین بیشینه نیرو که مربوط به واکنش نمونه‌ی استوانه‌ای در محدوده‌ی الاستیک است، متوسط نیرو در این شیوه‌ی فروریزش یک مقدار تقریباً ثابت است.

### ۳- مطالعه‌ی اجزاء محدود

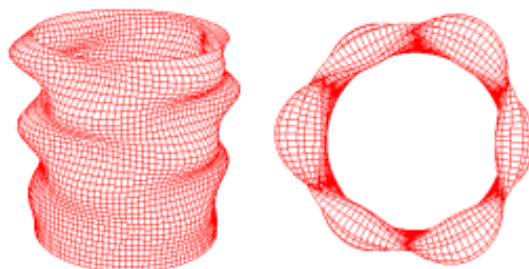
فرآیند فروریزش با استفاده از نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی عددی می‌شود و اثر رفتار غیرخطی مواد، تماس و تغییر شکل بزرگ در این شبیه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که سازه‌ی جدارنازک متصل به وسیله‌ی متحرک در برخورد با جسم دیگر قرار می‌گیرد، لازم است برای شبیه‌سازی عددی مطابق شکل ۵ صفحات صلبی تعریف شود که هر یک معرف وسیله‌ی متحرک و جسم ثابت باشد. در مطالعه حاضر، فروریزش پوسته‌ی استوانه‌ای تحت بارگذاری شبه‌استاتیک بررسی می‌شود، بنابراین جرمی برای جسم صلب متحرک لحاظ نمی‌شود. از طرفی دیگر در این شبیه‌سازی، اثر عیوب هندسی اولیه ناشی از ساخت سازه‌های جدارنازک در نظر گرفته شده است. این عیوب به نوبه‌ی خود سبب تغییر شیوه‌ی فروریزش سازه‌های جدارنازک می‌شود. در صورتی که مسئله‌ی فروریزش پوسته‌های متقارن محوری توسط نرم‌افزار المان محدود با شرایط مرزی و بارگذاری فشاری متقارن محوری بررسی شود، شیوه‌ی فروریزش پوسته نیز به صورت متقارن محوری خواهد بود. از آنجا که هندسه‌ی پوسته‌ها در فرآیند ساخت دارای عیوب هندسی اولیه شامل برآمدگی سطحی، تغییر ضخامت در طول و ... است، بنابراین

## جدول ۱- مقادیر تنش و کرنش پلاستیک ماده برنجی مورد

استفاده در مطالعه شبیه‌سازی					
تنش حقیقی	۲۳۶	۳۱۹	۵۲۵	۵۶۷	۵۸۲
کرنش پلاستیک	۰	۰/۰۵۶	۰/۲۷۰	۰/۳۲۱	۰/۳۳۶

برای ارتباط قطعات مختلف در سطح تماس آن‌ها نیز، شرایط تماس لغزشی و تماس کامل اعمال می‌شود. برای توضیح شرط تماس لغزشی، گره‌های یکی از قطعات واقع در سطح تماس را در نظر بگیرید که بر روی سطح تماس قطعه-ی دیگر قرار دارند. این گره‌ها می‌توانند از سطح دور شوند بدون آن‌که نیرویی ایجاد شود ولی در داخل سطح نمی‌توانند نفوذ کنند. گره‌های سطوح قطعات در شرط تماس لغزشی می‌توانند نسبت به سطح تماس در راستای مماس بر سطح حرکت کنند و با فرض اصطکاک کولمبی، نیرویی که بر گره اعمال می‌شود از حاصل ضرب نیروی عمودی در ضریب اصطکاک تعیین می‌شود. از طرف دیگر، در شرط مرزی تماس کامل بین دو سطح، هیچ حرکت نسبی در راستای مماس بر سطح و عمود بر سطح وجود ندارد و مقدار جابه‌جایی هر گره از سطح با جابه‌جایی نقطه‌ی تماس متناظر آن با سطح مقابل برابر است. در سطوح مشترک بین سازه‌ی جدارنازک استوانه‌ای و صفحه‌ی صلب تحتانی از شرط تماس کامل برای ارتباط جابه‌جایی بین قطعات استفاده می‌شود. شرط تماس لغزشی نیز در سطح تماس دیواره‌ی پوسته‌ی استوانه‌ای با صفحه‌ی صلب فوقانی استفاده می‌شود. همچنین در این شبیه‌سازی شرط خود تماسی در سطوح خارجی و داخلی پوسته‌ی استوانه‌ای پیش‌بینی شده است تا از نفوذ گره‌های آن در حین چروک‌خوردگی جلوگیری شود. نتایج مرجع [۱۶] نشان می‌دهد ضریب اصطکاک تأثیر چندانی در پارامترهای فروریزش ندارد. پس می‌توان از اصطکاک آن با خودش صرف‌نظر کرد. از طرفی دیگر، مقایسه‌ی مدل فروریزش با نتایج آزمایش نشان می‌دهد در صورتی که برای تماس سطح دیواره پوسته با سطوح صلب اصطکاک تعریف شود، شکل فروریزش به واقعیت نزدیک‌تر است. بنابراین، براساس مطالعات پیشین این ضریب ۰/۱۵ در نظر گرفته شده است [۱۷].

هر صفحه‌ی صلب ممکن است شش درجه آزادی شامل سه مولفه‌ی جابه‌جایی و سه مولفه‌ی دوران داشته باشند. سطح صلب تحتانی در تحلیل تجربی به جسم ثابت متصل است



شکل ۶- مد کمانشی مورد استفاده در فروریزش پوسته‌ی استوانه‌ای

ضریب نقش هر مد، بیشینه‌ی جابه‌جایی اولیه‌ی پوسته‌ی استوانه‌ای در هر نقص (مد کمانش) است. به‌طور کلی، در تحقیق حاضر، بیشینه‌ی مقدار جابه‌جایی اولیه‌ی پوسته‌ی استوانه‌ای برای مد سوم کمانش و برابر درصدی از ضخامت آن است. این مقدار جابه‌جایی اولیه در حل مسئله‌ی فروریزش به‌عنوان عیوب هندسی پوسته‌ی استوانه‌ای در نظر گرفته می‌شود و سبب تغییرشکل نامتقارن آن‌ها در نرم‌افزار اجزاء محدود می‌شود [۱۷].

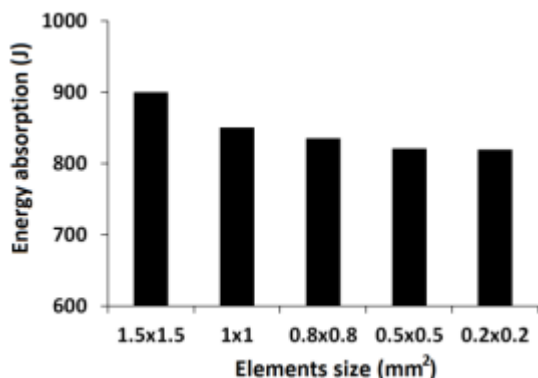
در شبیه‌سازی فروریزش پوسته‌ی استوانه‌ای تحت بارگذاری محوری، رفتار غیرخطی مواد در تغییرشکل بزرگ و همچنین اثر برخورد چروک‌های پوسته‌ی استوانه‌ای با خودش یا با صفحات صلب فوقانی و تحتانی، مدل‌سازی شده تا شرایط تحلیل با شرایط واقعی کاملاً منطبق باشد. شبیه‌سازی فروریزش با فرض صلب بودن سطوح مسطح ابزار در مقایسه با نمونه آزمایشگاهی ارائه شده است. رفتار ناحیه‌ی پلاستیک با استفاده از مقادیر تنش و کرنش پلاستیک مطابق روابط زیر تعیین شد.

$$\sigma_{tru} = \sigma_{eng} (1 + \varepsilon_{eng}) \quad (۱)$$

$$\varepsilon_{tru} = \ln(1 + \varepsilon_{eng}) \quad (۲)$$

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_{tru} - \frac{\sigma_y}{E} \quad (۳)$$

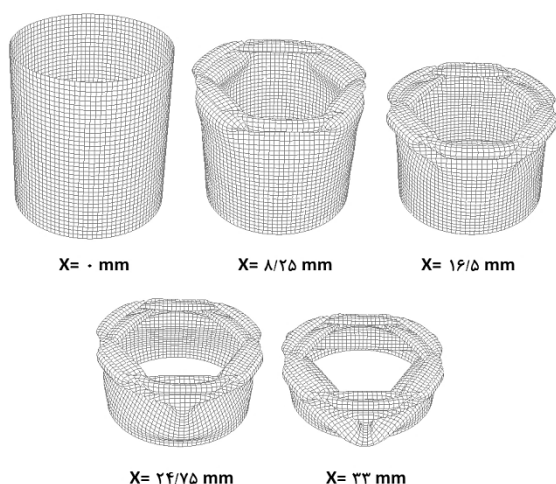
در این معادلات  $\varepsilon_{tru}$  و  $\sigma_{tru}$  به‌ترتیب تنش و کرنش حقیقی،  $\varepsilon_{eng}$  و  $\sigma_{eng}$  به‌ترتیب تنش و کرنش مهندسی،  $\varepsilon_{pl}$  کرنش پلاستیک،  $\sigma_y$  تنش تسلیم و  $E$  مدول الاستیسیته است. بنابراین برای معرفی نمودار تنش-کرنش پلاستیک تعدادی نقطه به مختصات  $(\sigma_{tru}, \varepsilon_{pl})$  تعریف می‌شود که مقادیر آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. تنش تسلیم برابر با ۲۳۶ مگاپاسکال با استفاده از آزمایش کشش تعیین شد که مقدار آن در کرنش پلاستیک صفر در این جدول ارائه شده است.



شکل ۷- نمودار آنالیز حساسیت اندازه‌ی المان برحسب انرژی جذب شده



شکل ۸- مقایسه مد فروریزش بدست آمده در نتایج عددی و آزمایشگاهی



شکل ۹- نحوه فروریزش پوسته استوانه‌ای برنجی تحت بارگذاری محوری

پس کلیه‌ی درجات آزادی آن مقید می‌شود. از طرف دیگر، سطح صلب فوقانی به جسم متحرک متصل است که کلیه‌ی درجات آزادی آن غیر از جابه‌جایی در راستای محور پوسته‌ی استوانه‌ای مقید شده است (شکل ۵). نوع المان‌ها برای تحلیل اجزای محدود وابسته به هندسه‌ی نمونه و روش تحلیل است. در این شبیه‌سازی، برای پوسته‌ی استوانه‌ای و صفحات صلب به ترتیب از المان‌های پوسته‌ای چهارگوش (S4R) و المان صلب خطی (R3D4) استفاده شده است [۱۷] به طوری که المان‌های چهارگوش دارای چهار گره و المان‌های صلب دارای دو گره است. شکل ۷ نمودار آنالیز حساسیت اندازه‌ی المان را برحسب انرژی جذب شده نشان می‌دهد. در تحقیق حاضر با توجه به همگرایی پاسخ فروریزش اندازه المان‌های پوسته‌ی استوانه‌ای  $0.5 \times 0.5$  میلی‌متر مربع انتخاب شد.

#### ۴- نتایج و بحث

شکل ۸ نمونه‌ای از نتایج شبیه‌سازی فروریزش محوری پوسته‌ی استوانه‌ای را تحت شرایط مرزی یک‌سرگیردار و بارگذاری محوری نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود کاهش ارتفاع نمونه با بازده لهیدگی ۷۰ درصد مشابه با شرایط آزمایشگاهی محاسبه شده است. هندسه‌ی نمونه‌ی آزمایشگاهی برای مقایسه در این شکل نشان داده شده که در هر دو حالت تعداد لایه‌های تغییرشکل یافته داخلی و خارجی نمونه‌ی استوانه‌ای برنجی برابر است.

شکل ۹ نحوه‌ی فروریزش پوسته استوانه‌ای برنجی را در طی جابه‌جایی مختلف (X) نشان داده است. در این شبیه‌سازی‌ها فروریزش پوسته‌ی استوانه‌ای از ناحیه‌ی فوقانی به صورت تاخوردگی شروع می‌شود و پشت سرهم ادامه می‌یابد.

نمودار نیرو- جابه‌جایی و انرژی جذب‌شده- جابه‌جایی فروریزش نمونه‌های استوانه‌ای تحت اثر شرایط مرزی یک‌سرگیردار در شکل ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در شروع بارگذاری، نیرو به‌طور تقریباً خطی تا یک مقدار ماکزیمم افزایش می‌یابد. این روند تغییر نیرو ناشی از رفتار الاستیک نمونه استوانه‌ای تحت اثر بار فشاری، قبل از آغاز کماتش است. با شروع فروریزش سطح فوقانی نمونه‌ی استوانه‌ای و تشکیل لایه خارجی نیرو

نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی برای جابجایی ۳۳ میلی-متر در جدول ۲ با یکدیگر مقایسه شده است. انرژی جذب شده از محاسبه‌ی سطح زیر منحنی نیرو - جابه‌جایی در تحلیل آزمایشگاهی محاسبه شده است و در شبیه‌سازی از محاسبه‌ی مقدار کار خارجی تعیین شده‌اند. مقایسه این مقادیر نشان می‌دهد، نتایج تجربی و شبیه‌سازی فروریزش پوسته‌ی استوانه‌ای برنجی تحت اثر بارگذاری شبه‌استاتیک خطای ناچیزی داشته و خطای طرح برای محاسبه‌ی انرژی جذب شده نسبت به نتایج آزمایشگاهی در حدود ۴ درصد است.

#### جدول ۲- مقایسه‌ی نتایج فروریزش تجربی و شبیه‌سازی

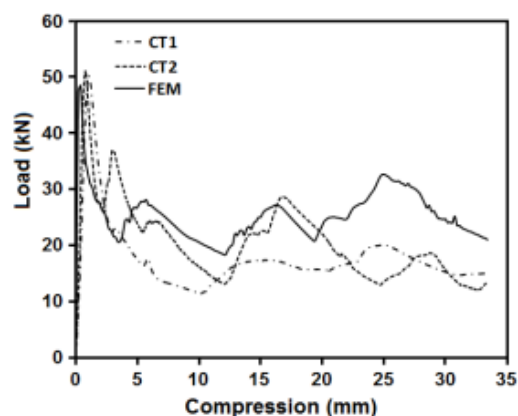
پوسته استوانه‌ای برنجی			
نتایج	نیروی اولیه (کیلو نیوتن)	نیروی متوسط (کیلو نیوتن)	انرژی جذب شده (ژول)
CT1	۵۰/۳	۲۴/۵	۸۰/۸
تجربی	درصد ۵۰/۱	درصد ۲۳/۲	درصد ۷۷۳
CT2	خطا ۵۰/۲	خطا ۲۳/۹	خطا ۷۹۰
میانگین	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۴
عددی	۴۹/۱	۲۴/۹	۸۲۱

#### ۵- مطالعه‌ی پارامتری

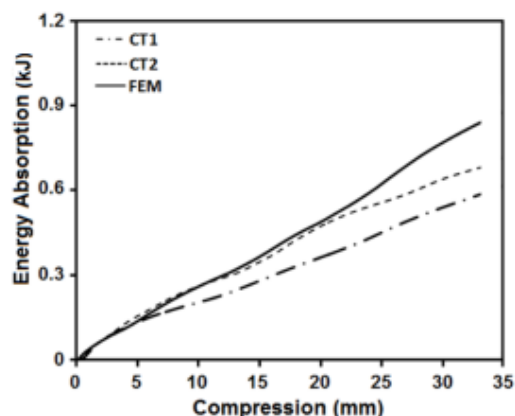
به دلیل تنوع عوامل تأثیرگذار بر پدیده فروریزش پوسته‌ی استوانه‌ای برنجی، مانند ابعاد هندسی، جنس پوسته، شرایط تکیه‌گاهی و نحوه‌ی بارگذاری هنوز دسته‌بندی مناسبی برای پیش‌بینی رفتار فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای در شرایط مختلف ارائه نشده است. مقایسه‌ی نتایج تجربی و شبیه‌سازی در بخش قبل نشان داده است که مدل اجزای محدود ارائه شده می‌تواند پدیده‌ی فروریزش پوسته‌های جدارنازک را تحت اثر بارگذاری محوری شبیه‌سازی کند. بنابراین از مدل اجزای محدود ارائه شده برای تحلیل فروریزش پوسته‌های جدارنازک و بررسی اثر پارامترهای مؤثر بر نحوه‌ی فروریزش آن تحت اثر بارگذاری مختلف استفاده می‌شود.

شیوه‌ی فروریزش سازه‌های جدارنازک متقارن محوری وابسته به نوع هندسه، شرایط مرزی، نوع بارگذاری و همچنین عیوب هندسی ناشی از ساخت آن است. بدیهی است که در صورت برقراری شرایط مرزی و بارگذاری متقارن-محوری نوع فروریزش نیز متقارن محوری است. معمولاً از جمله معایب اصلی ساخت سازه‌های جدارنازک تغییرشکل

افت می‌کند. سپس نیرو با تشکیل لایه داخلی و تکمیل اولین چین‌خوردگی افزایش می‌یابد که با تشکیل لایه خارجی دوباره کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، در حین فرآیند فروریزش، نیرو با تشکیل لایه خارجی و داخلی به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد و در نتیجه منحنی نیرو- جابه‌جایی فروریزش خصوصاً برای شرایط مرزی یک‌سرگردار همواره به صورت تناوبی است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، میزان افزایش اولین بیشینه‌ی نیروی فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای برنجی در مقایسه با سایر بیشینه‌ی نیروها قابل توجه است که علت این امر پایداری و مقاومت اولیه‌ی آن در برابر بارگذاری محوری است. این درحالی است که با افزایش جابجایی و کم‌اندام پوسته‌ی استوانه‌ای، پایداری آن در برابر بارگذاری محوری کاهش می‌یابد.



شکل ۱۰- مقایسه‌ی آزمایشگاهی و عددی نمودار نیروی استاتیکی - جابه‌جایی پوسته‌ی استوانه‌ای برنجی



شکل ۱۱- مقایسه‌ی آزمایشگاهی و عددی نمودار انرژی جذب شده - جابه‌جایی فروریزش پوسته‌ی استوانه‌ای برنجی



همان‌طور که مشاهده می‌شود، تفاوت عمده این منحنی‌ها در بیشینه و کمینه نیروهاست. در فروریزش متقارن-محوری (بدون در نظر گرفتن عیوب هندسی) نیرو از تناوب بیشتری در زمان تغییر شکل برخوردار است. به‌طوری‌که برای یک بیشینه نیروی فروریزش غیرمتقارن دو بیشینه نیروی متقارن محوری وجود دارد. علت این امر ناشی از وجود چین داخلی و خارجی برای تکمیل یک چین متقارن محوری است. نکته قابل توجه اثر نامحسوس عیوب هندسی بر انرژی جذب شده و اولین بیشینه نیروی فروریزش است. در این مطالعه، اولین بیشینه نیروی فروریزش و انرژی جذب شده در پوسته‌های استوانه‌ای برنجی همراه عیوب هندسی در حدود ۱ درصد کمتر از هندسه‌ی همراه با عیوب هندسی است. با این حال نتایج نشان می‌دهد، عیوب هندسی تنها بر تغییر شیوه‌ی فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای برنجی مؤثر است. بنابراین در ادامه‌ی تحقیق تمامی هندسه‌های مورد بررسی، به منظور تحلیل رفتار فروریزی پوسته‌های استوانه‌ای، بدون در نظر گرفتن عیوب هندسی انجام می‌شود.

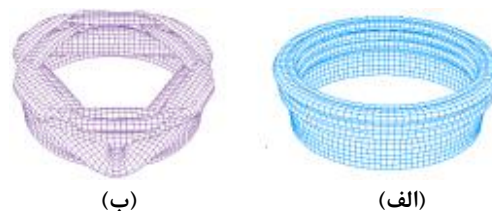
#### ۵-۲- اثر گرادیان ضخامت

گرادیان ضخامت سازه‌های جدارنازک در حین عملیات ساخت (مانند شکل‌دهی (چرخ‌کاری)، اکستروژن و ...) از عواملی است که باید در بررسی هندسه‌ی نهایی بررسی شود. گرادیان ضخامت شامل تغییر ضخامت دیواره‌ی سازه‌های جدارنازک است. بررسی ابعادی (شکل ۱-الف) نشان می‌دهد، بیشترین ضخامت در این سازه‌ها در قاعده‌ی فوقانی (با ضخامت  $t_1$ ) و کمترین آن در نزدیکی قاعده‌ی تحتانی (با ضخامت  $t_2$ ) است که در فاصله‌ی بین دو قاعده ضخامت به صورت غیرخطی تغییر می‌کند. شکل ۱۴ اثر گرادیان ضخامت را بر نحوه‌ی فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای برنجی نشان می‌دهد. لازم به توضیح است که در این بخش به‌منظور بررسی اثر گرادیان ضخامت بر فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای برنجی، عیوب هندسی شامل برآمدگی موجی سطح دیواره در نظر گرفته نشده است. بنابراین بدیهی است که شیوه‌ی فروریزش آن به‌صورت متقارن محوری باشد. در این تحقیق، از مدل متقارن محوری برای بررسی این پارامتر استفاده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود (شکل ۱۴-الف) تعداد چین‌های داخلی و خارجی مدل متقارن محوری و سه بعدی با شرایط هندسی و بارگذاری مشابه برابر است.

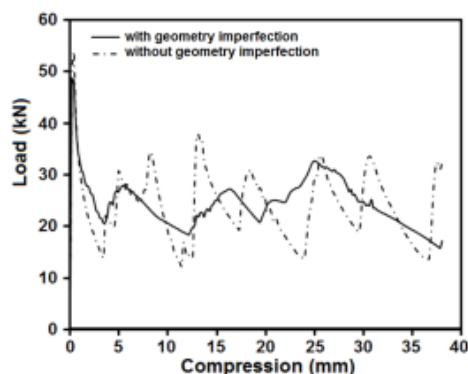
سطحی یا اصطلاحاً برآمدگی موجی و همچنین گرادیان ضخامت دیواره‌ی آن است که در ادامه به بررسی اثر این عوامل بر فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای برنجی پرداخته می‌شود.

#### ۵-۱- اثر عیوب هندسی

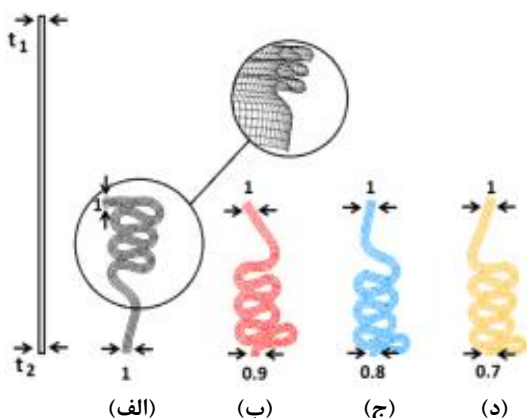
در این بخش اثر عیوب هندسی ناشی از برآمدگی موجی سطح دیواره‌ی پوسته‌ی استوانه‌ای بر فروریزش آن بررسی می‌شود. برای این منظور عیوب هندسی برابر بیشینه مقدار جابه‌جایی اولیه‌ی پوسته‌ی استوانه‌ای برای مد سوم کماتش و برابر دو درصد از ضخامت آن در نظر گرفته شده است. این عیوب (شامل برآمدگی سطحی و گرادیان ضخامت) مطابق شکل ۱۲ سبب فروریزش غیرمتقارن پوسته‌ی استوانه‌ای می‌شود. این درحالیست که اگر در سازه‌ی جدارنازک مقدار این عیوب هندسی اندک باشد، آن‌گاه فروریزش به‌صورت متقارن محوری خواهد بود. مقایسه‌ی نمودار نیرو- جابه‌جایی فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای همراه با عیوب هندسی و بدون آن در شکل ۱۳ آورده شده است.



شکل ۱۲- اثر عیوب هندسی بر فروریزش پوسته‌ی استوانه‌ای برنجی (الف) بدون و (ب) همراه عیوب هندسی



شکل ۱۳- اثر عیوب هندسی بر نمودار نیرو- جابه‌جایی پوسته‌ی استوانه‌ای برنجی تحت بارگذاری محوری

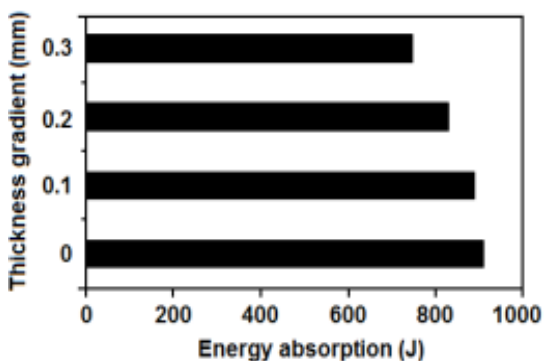


شکل ۱۴- اثر گرادیان ضخامت بر فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای برنجی (ابعاد برحسب میلی‌متر است)

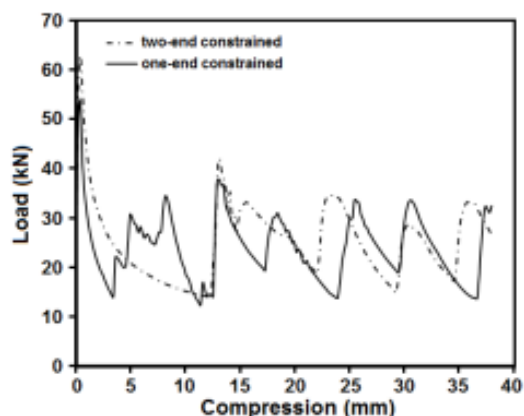
از طرفی دیگر، فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای برنجی با گرادیان ضخامت برخلاف پوسته‌ی استوانه‌ای بدون عیوب هندسی از انتهای قاعده‌ی گیردار آن‌ها شروع می‌شود. علت این امر کاهش ضخامت دیواره در قاعده‌های تحتانی این نمونه‌هاست. نتایج این تحقیق مطابق شکل ۱۵ نشان می‌دهد که انرژی جذب شده با گرادیان ضخامت رابطه‌ی عکس دارد. به طوری که با افزایش گرادیان ضخامت، انرژی جذب شده کاهش می‌یابد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، انرژی جذب‌شده‌ی پوسته‌ی استوانه‌ای با گرادیان ضخامت ۰/۳ میلی‌متر ( $t_2$  برابر ۰/۷ میلی‌متر) نسبت به پوسته‌ی استوانه‌ای بدون عیوب هندسی در حدود ۱۸ درصد کاهش یافته است.

### ۵-۳- اثر شرایط مرزی

در مطالعه حاضر، رفتار فروریزش پوسته‌ی استوانه‌ای برنجی با شرایط مرزی دوسرگیردار و یک‌سرگیردار بررسی می‌شود. شکل ۱۶ مقایسه‌ی نمودار نیرو- جابه‌جایی فروریزش نمونه‌های استوانه‌ای برنجی را تحت شرایط مرزی مختلف نشان می‌دهد. آنچه به وضوح مشخص است، افزایش اولین بیشینه‌ی نیروی فروریزش نمونه‌ی استوانه‌ای دوسرگیردار نسبت به یک‌سرگیردار است که علت آن عدم واژگونی سطح قاعده‌ی فوقانی است (شکل ۱۷). از آن‌جا که در شرایط مرزی دوسرگیردار قاعده فوقانی پوسته‌ی استوانه‌ای مقید شده است، بنابراین برخلاف شرایط مرزی یک‌سرگیردار فروریزش از ناحیه‌ی پایین‌تری نسبت به قاعده‌ی فوقانی اتفاق می‌افتد. این امر سبب افزایش طول چین و اولین بیشینه‌ی نیروی فروریزش و همچنین کاهش تعداد چین‌های تشکیل شده در طول جابه‌جایی برابر نسبت به شرایط مرزی یک‌سرگیردار می‌شود.



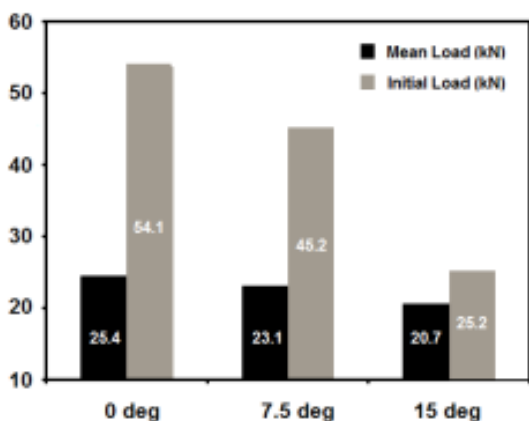
شکل ۱۵- اثر گرادیان ضخامت بر انرژی جذب‌شده پوسته استوانه‌ای برنجی تحت بارگذاری محوری



شکل ۱۶- مقایسه‌ی نمودار نیرو- جابه‌جایی فروریزش نمونه‌های استوانه‌ای برنجی تحت شرایط مرزی مختلف

بر اساس آنچه بیان شد، انتظار می‌رود، میزان انرژی جذب‌شده پوسته‌ی استوانه‌ای برنجی دوسرگیردار نیز نسبت به نمونه‌های یک‌سرگیردار برای مقدار جابه‌جایی یکسان بیشتر باشد. در مطالعه حاضر، مقدار انرژی جذب شده و اولین بیشینه‌ی نیرو در نمونه‌ی استوانه‌ای برنجی با شرایط مرزی دوسرگیردار به ترتیب در حدود ۶ و ۱۷ درصد بیشتر از شرایط مرزی یک‌سرگیردار است.

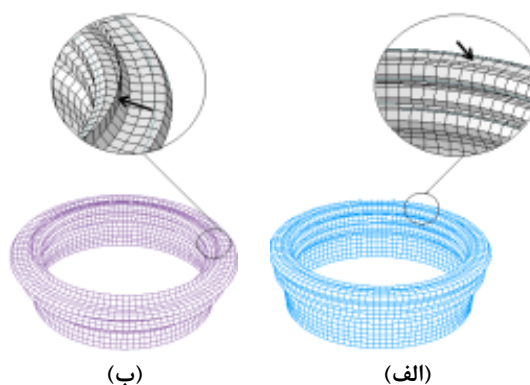
همان‌طور که در شکل ۱۹ ملاحظه می‌شود، با افزایش زاویه نیم‌رأس نیروی اولیه و متوسط نیروی فروریزش کاهش می‌یابد. بنابراین پوسته مخروطی ۱۵ درجه کمترین مقدار متوسط نیرو است. به عبارتی دیگر، این پوسته کمترین انرژی را جذب می‌کند. کاهش انرژی جذب‌شده برای این پوسته مخروطی، به دلیل نحوه‌ی فروریزش آن قابل توجه است. از طرفی دیگر می‌توان دریافت که اثر تغییر زاویه‌ی نیم‌رأس بر نیروی اولیه‌ی فروریزش نسبت به متوسط نیرو قابل ملاحظه است. به طوری که با افزایش زاویه‌ی نیم‌رأس از ۰ تا ۱۵ درجه نیروی اولیه و متوسط نیروی فروریزش به ترتیب در حدود ۱/۱۶ و ۱۸ درصد افزایش می‌یابد. بنابراین در سازه‌هایی که کاهش شوک اولیه در برخورد از اولویت بالاتری نسبت به انرژی جذب‌شده برخوردار است، استفاده از نمونه‌های مخروطی نسبت به پوسته‌های استوانه‌ای پیشنهاد می‌شود.



شکل ۱۹- اثر زاویه‌ی نیم‌رأس بر نیروی اولیه و متوسط نیروی فروریزش پوسته‌ی استوانه‌ای برنجی تحت بارگذاری محوری

#### ۵-۵- بررسی اثر تقویت‌کننده چند سلولی ستونی بر انرژی جذب شده

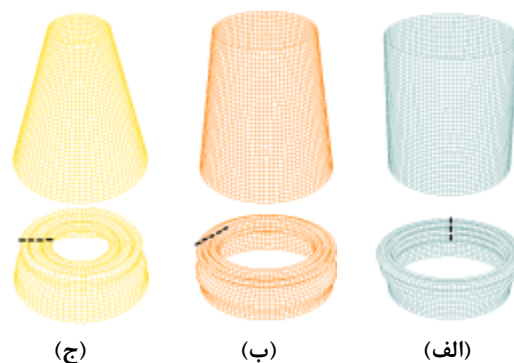
از آنجا که تقویت‌کننده‌ها به منظور افزایش جذب انرژی در جذب‌های انرژی استفاده می‌شود، بنابراین مطابق شکل ۲۰ اثر تقویت‌کننده‌های چند سلولی‌های ستونی و همچنین چیدمان آن بر رفتار فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای برنجی بررسی می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تحقیق حاضر از دو، سه و چهار تقویت‌کننده ستونی استفاده شده است که زاویه‌های قرارگیری آن‌ها به ترتیب ۱۸۰، ۱۲۰ و ۹۰ درجه در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۷- مقایسه‌ی نحوه‌ی فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای برنجی تحت شرایط مرزی؛ الف) یک‌سری‌دار و ب) دوسری‌دار

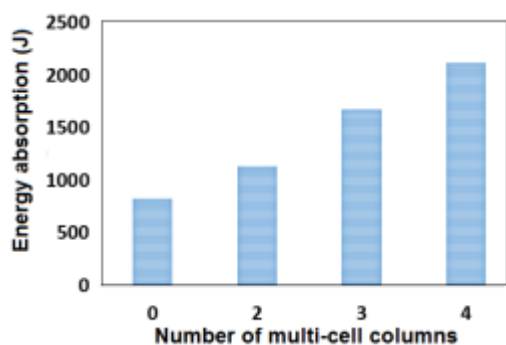
#### ۵-۴- اثر زاویه‌ی نیم‌رأس

شکل ۱۸ اثر زاویه‌ی نیم‌رأس را بر فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای برنجی نشان می‌دهد که زاویه‌ی نیم‌رأس در محدوده‌ی ۰ تا ۱۵ درجه تغییر داده شده است. در این تحقیق، ضخامت و طول پوسته‌های استوانه‌ای ثابت و به ترتیب برابر ۱ و ۵۵ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تغییر زاویه‌ی نیم‌رأس پوسته‌های جدارنازک سبب تغییر زاویه‌ی تشکیل چین‌های متقارن محوری می‌شود. به طوری که چین‌های تشکیل‌شده در پوسته‌های استوانه‌ای به صورت کاملاً عمودی و در پوسته‌ی مخروطی با زاویه‌ی نیم‌رأس ۱۵ درجه به صورت کاملاً افقی روی یکدیگر واقع شده‌اند.



شکل ۱۸- اثر زاویه‌ی نیم‌رأس بر نحوه‌ی فروریزش پوسته‌ها برای زاویه‌ی نیم‌رأس الف) صفر درجه، ب) ۷/۵ درجه و ج) ۱۵ درجه

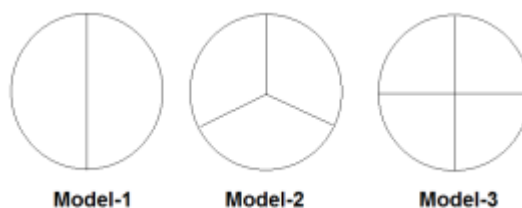
شکل ۲۲ اثر چند سلول‌های تقویت‌کننده را بر انرژی جذب شده فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای برنجی نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، استفاده از چند سلولی‌های تقویت‌کننده سبب افزایش انرژی جذب شده می‌شود. به‌طوری‌که با افزایش تقویت‌کننده‌ها (از دو تا چهار) میزان انرژی جذب شده به ترتیب در حدود ۳۷ تا ۱۵۷ درصد نسبت به عدم استفاده از تقویت‌کننده افزایش می‌یابد. این درحالیست که انرژی ویژه‌ی این نمونه‌ها نیز با افزایش تقویت‌کننده‌های ستونی افزایش می‌یابد. در این مطالعه، مقدار انرژی ویژه‌ی جذب شده برای نمونه‌ی برنجی با دو تقویت‌کننده (مدل یک) ۱۲ درصد و برای نمونه با چهار تقویت‌کننده (مدل ۳) در حدود ۵۵ درصد بیشتر از نمونه‌ی برنجی بدون تقویت‌کننده است. براساس این مطالعه استفاده از تقویت‌کننده‌های چندسلولی ستونی نسبت به عدم استفاده از آن‌ها در مواردی که نیاز به جذب انرژی بالاتری است، بسیار کارآمدتر است.



شکل ۲۲- اثر تقویت‌کننده‌های چند سلولی بر انرژی جذب شده پوسته‌های استوانه‌ای برنجی

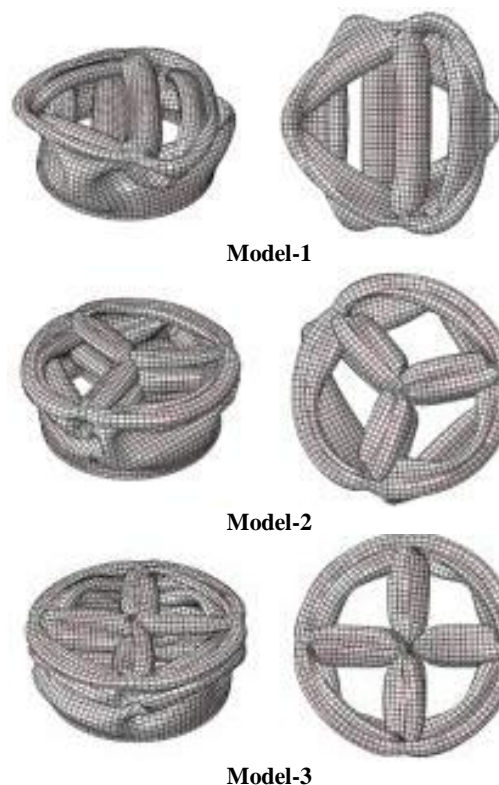
#### ۵-۶- اثر زاویه‌ی برخورد

سازه‌های جدارنازک به‌طور گسترده‌ای برای جذب انرژی‌های ضربه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. مقالات منتشر شده در این زمینه بیشتر مربوط به بارگذاری محوری است. اما در عمل سازه‌های بسیار کمی تحت بارگذاری محوری قرار می‌گیرند، به‌خصوص سازه‌های جاذب انرژی در خودروها که تحت بارگذاری فشاری غیرمحوری و برخورد مایل هستند. بنابراین بحث و بررسی چگونگی پاسخ جاذب انرژی تحت بارگذاری مایل بسیار مهم و ضروری است. در این بخش از



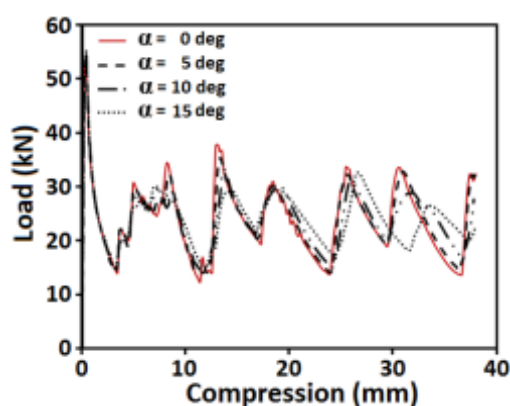
شکل ۲۰- مدل تقویت‌کننده‌های چند سلولی پوسته‌های استوانه‌ای برنجی

شکل ۲۱ اثر تقویت‌کننده‌های چند سلولی ستونی را بر نحوه‌ی فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای برنجی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تعداد چندسلولی سبب تغییر رفتار فروریزش نمونه‌ها می‌شود. از آنجا که اتصال تقویت‌کننده‌ها به پوسته به‌صورت کامل فرض شده است، بنابراین تغییر شکل تقویت‌کننده‌ها در اثر بارگذاری محوری خود سبب عدم فروریزش متقارن محوری پوسته دایروی می‌شود. به‌طوری‌که وجود دو، سه و چهار تقویت‌کننده سبب تغییر شکل الماسی چند گوش می‌شود.

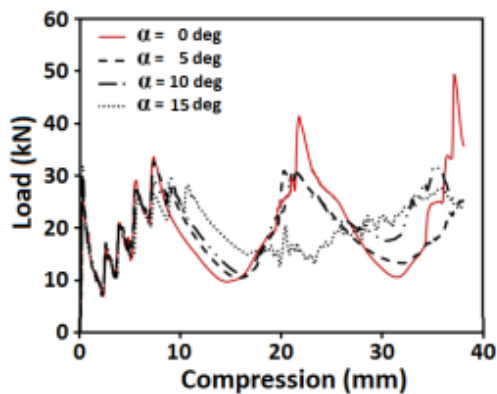


شکل ۲۱- اثر تقویت‌کننده‌های چند سلولی بر نحوه فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای برنجی

نکته قابل توجه دیگر، افزایش طول چین‌های تشکیل شده در بارگذاری مایل نسبت به بارگذاری محوری است. از طرفی دیگر، شیوه‌ی فروریزش در نمونه‌های مخروطی با زاویه‌ی نیم‌رأس ۱۵ درجه برخلاف پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری مایل با زاویه‌ی ۱۰ و ۱۵ درجه تغییر می‌کند. همان‌طور که از نمودارهای نیرو- جابه‌جایی (شکل ۲۵) مشخص است، برخلاف پوسته‌های مخروطی، زاویه‌ی برخورد (تا ۱۵ درجه) اثر محسوسی بر رفتار فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای برنجی ندارد.



(الف)

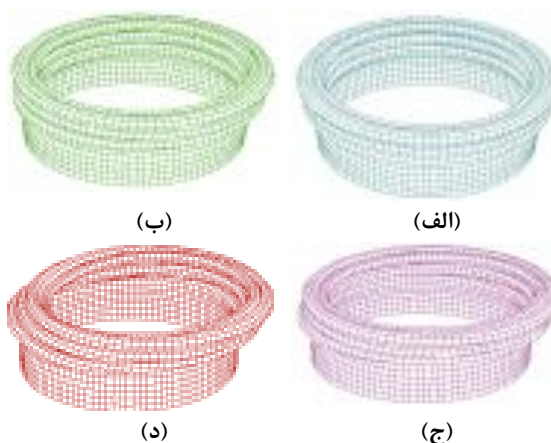


(ب)

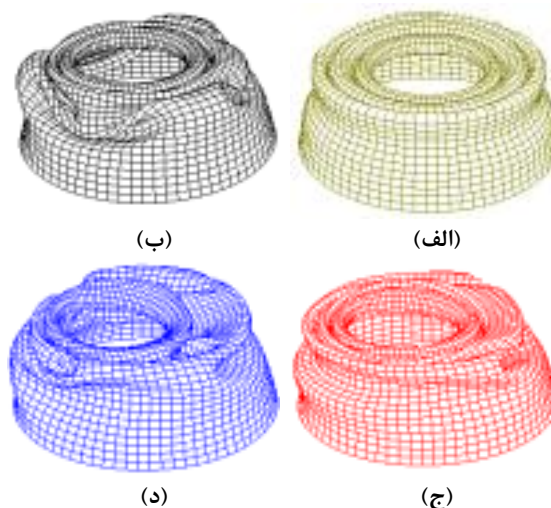
شکل ۲۵- مقایسه‌ی نمودار نیرو- جابه‌جایی فروریزش نمونه‌های الف) استوانه‌ای و ب) مخروطی با زاویه نیم‌رأس ۱۵ درجه برنجی، تحت زاویه‌ی برخورد متفاوت

از آن‌جا که پوسته‌ها به‌صورت مایل تغییر شکل می‌دهند، بنابراین با افزایش میزان جابه‌جایی، مقدار بیشینه نیروهای نسبی ایجاد شده نسبت به اولین بیشینه‌ی نیرو به‌شدت

مطالعه حاضر نمونه‌ی استوانه‌ای و مخروطی با زاویه‌ی نیم‌رأس ۱۵ درجه با شرایط مرزی یک‌سرگیردار، تحت بارگذاری مایل به مقدار ۵ تا ۱۵ درجه قرار می‌گیرد. شکل‌های ۲۳ و ۲۴ فروریزش نهایی نمونه‌های استوانه‌ای و مخروطی را تحت بارگذاری محوری و مایل نشان می‌دهد. آنچه به وضوح مشخص است، تغییر شکل مایل پوسته‌های استوانه‌ای حول محور زاویه برخورد است.



شکل ۲۳- اثر زاویه‌ی برخورد بر نحوه‌ی فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای با زاویه برخورد الف) صفر درجه، ب) ۵ درجه، ج) ۱۰ درجه و د) ۱۵ درجه

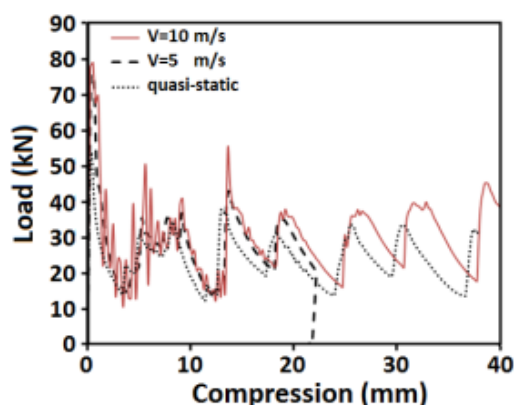


شکل ۲۴- اثر زاویه‌ی برخورد بر نحوه‌ی فروریزش پوسته‌های مخروطی با زاویه نیم‌رأس ۱۵ درجه با زاویه برخورد الف) صفر درجه، ب) ۵ درجه، ج) ۱۰ درجه و د) ۱۵ درجه

تأثیری در طراحی پوسته‌ی جدارنازک نداشته باشد. در سال‌های پیشین نیز نتایج مشابه با تحقیق حاضر برای فروریزش پوسته‌های مخروطی با سطح مقطع مستطیلی مشاهده شده است [۲۰].



شکل ۲۶- اثر سرعت برخورد بر نحوه‌ی فروریزش پوسته‌های برنجی تحت بارگذاری محوری الف) ۵ متر بر ثانیه و ب) ۱۰ متر بر ثانیه



شکل ۲۷- اثر سرعت برخورد بر رفتار فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای برنجی تحت بارگذاری محوری

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، فروریزش پوسته‌های جدارنازک استوانه‌ای برنجی تحت بارگذاری محوری به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی شده است. با توجه به نتایج آزمایش برای تحلیل تغییر شکل سازه جدارنازک استوانه‌ای، از مدل سه‌بعدی برای شبیه‌سازی آن استفاده شد. نتایج عددی نشان می‌دهد، نمودار نیرو- جابه‌جایی، نمودار انرژی- جابه‌جایی و نحوه‌ی فروریزش پوسته‌ی استوانه‌ای تحت بارگذاری شبه‌استاتیک برابری خوبی با نتایج تجربی دارد. بنابراین از مدل اجزای محدود ارائه‌شده برای تحلیل فروریزش پوسته‌های جدارنازک و بررسی اثر پارامترهای مؤثر بر نحوه‌ی فروریزش آن تحت

کاهش می‌یابد. در تحقیق حاضر، انرژی جذب‌شده پوسته‌های مخروطی تحت بارگذاری مایل در حدود ۸ درصد نسبت به زاویه‌ی برخورد محوری کاهش می‌یابد.

## ۵-۷- اثر سرعت برخورد

در نرم‌افزار المان محدود برای شبیه‌سازی دینامیکی فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای اثر نرخ کرنش ماده‌ی آن با استفاده از مدل کوپر- سایموند به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۹]:

$$\dot{\epsilon}_{pl} = D \left( \frac{\dot{\sigma}_0}{\sigma_0} - 1 \right)^q \dot{\sigma}_0 \geq \sigma_0 \quad (1)$$

که در آن  $\dot{\sigma}_0$  نرخ تنش سیلان دینامیکی،  $\dot{\epsilon}_{pl}$  نرخ کرنش پلاستیک محوری،  $\sigma_0$  تنش سیلان استاتیکی و  $D$  و  $q$  پارامترهای ماده‌ی برنجی هستند. بنابراین در شبیه‌سازی دینامیکی فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای، خواص مکانیکی پوسته با نقاط تنش- کرنش پلاستیک جدول ۲ و ثابت‌های رابطه‌ی ۱ به نرم‌افزار المان محدود معرفی می‌شوند. در این شبیه‌سازی ثابت‌های  $D$  و  $q$  به ترتیب برابر ۴/۴۴۶ و ۴۷۲۲۰۰ بر ثانیه است که در مطالعات پیشین برای فروریزش دینامیکی پوسته‌های استوانه‌ای برنجی استفاده شده است [۱۷].

در این بخش اثر سرعت برخوردکننده برای نمونه‌های استوانه‌ای در بارگذاری دینامیکی و شبه‌استاتیکی مقایسه می‌شود. شکل ۲۶ اثر سرعت برخورد، برخوردکننده را بر رفتار فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای برنجی با جرم ضربه‌زننده‌ی ۵۰ کیلوگرم نشان می‌دهد.

همان‌طور که به روشنی مشخص است سرعت برخورد اثر قابل ملاحظه‌ای بر متوسط نیروی فروریزش و اولین بیشینه‌ی نیروی فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای برنجی نسبت به حالت شبه‌استاتیکی دارد. به طوری که نیروی اولیه‌ی فروریزش در حالت دینامیکی نسبت به حالت شبه‌استاتیکی در حدود ۳۸ درصد افزایش می‌یابد. این درحالیست که با افزایش سرعت، نیروی اولیه و متوسط نیروی فروریزش تغییر محسوسی ندارد.

نکته قابل ذکر آن است که با توجه به شکل ۲۷ ملاحظه می‌شود، افزایش سرعت سبب افزایش مقدار جابه‌جایی و در نهایت انرژی جذب شده می‌شود. به عبارت دیگر، اثر سرعت جزء پارامترهای ظاهری به شمار می‌آیند که ممکن است

پوسته‌های استوانه‌ای برنجی نسبت به حالت شبه‌استاتیکی دارد. این درحالیست که با افزایش سرعت، نیروی اولیه و متوسط نیروی فروریزش تغییر محسوسی ندارد. به عبارت دیگر، اثر سرعت جزء پارامترهای ظاهری به شمار می‌آید که ممکن است تأثیری در طراحی پوسته‌ی جدارنازک نداشته باشد.

۷- استفاده از چند سلولی‌های تقویت‌کننده سبب افزایش انرژی و انرژی ویژه‌ی جذب شده جذب شده می‌شود. بنابراین براساس این مطالعه استفاده از تقویت‌کننده‌های چند سلولی ستونی نسبت به عدم استفاده از آن‌ها در مواردی که نیاز به جذب انرژی بالاتری است، بسیار کارآمدتر است.

#### ۸- مراجع

- [1] Alexander JM (1960) An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading. *Q J Mech Appl Math* 13(1): 11-16.
- [2] Andrews KRF, England GL, Ghani E (1983) Classification of axial collapse of cylinder tubes under quasi-static loading. *Int J Mech Sci* 25(2): 687-696.
- [3] Ren W, Mingbao H, Zhuping H, Qingchun Y (1983) An experimental study on the dynamic axial plastic buckling of cylindrical shells. *Int J Impact Eng* 1(3): 249-256.
- [4] Abramowicz W, Jones N (1984) Dynamic axial crushing of circular tubes. *Int J Impact Eng* 2(3): 263-281.
- [5] Abramowicz W, Jones N (1986) Dynamic progressive buckling of circular and square tubes. *Int J Impact Eng* 4(4): 243-269.
- [6] Gupta NK (1998) Some aspect of axial collapse of cylindrical thin-walled tubes. *Thin Wall Struct* 32(3): 111-126.
- [7] Singace AA (1999) Axial crushing analysis of tubes deforming in the multi-lobe mode. *Int J Mech Sci* 41(7): 865-890.
- [8] Yamasaki K, Han J (2000) Maximization of crushing energy absorption of cylindrical shells. *Adv Eng Softw* 31(6): 425-434.
- [9] AlGalib D, Limam A (2004) Experimental and numerical investigation of static and dynamic axial crushing of circular aluminum tubes. *Thin Wall Struct* 42(8): 1103-1137.
- [10] Karagiozova D, Alves M (2004) Transition from progressive buckling to global bending of circular

اثر بارگذاری مختلف استفاده شده است. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که:

- ۱- در این مطالعه، اولین بیشینه‌ی فروریزش و انرژی جذب شده در پوسته‌ی استوانه‌ای برنجی همراه عیوب هندسی در حدود ۱ درصد کمتر از هندسه‌ی همراه با عیوب هندسی است. با این حال نتایج نشان می‌دهد، عیوب هندسی تنها بر تغییر شیوه‌ی فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای برنجی مؤثر است.
- ۲- انرژی جذب شده پوسته‌های استوانه‌ای با گرادیان ضخامت رابطه‌ی عکس دارد. به طوری که با افزایش گرادیان ضخامت، انرژی جذب شده کاهش می‌یابد.
- ۳- میزان انرژی جذب شده پوسته‌ی استوانه‌ای برنجی دوسرگیردار نسبت به نمونه‌های یک‌سرگیردار برای مقدار جابه‌جایی یکسان بیشتر است. از آن‌جا که در شرایط مرزی دوسرگیردار قاعده فوقانی پوسته‌ی استوانه‌ای مقید شده است، بنابراین برخلاف شرایط مرزی یک‌سرگیردار فروریزش از ناحیه‌ی پایین‌تری نسبت به قاعده‌ی فوقانی اتفاق می‌افتد. این امر سبب افزایش طول چین و اولین بیشینه‌ی نیروی فروریزش و همچنین کاهش تعداد چین‌های تشکیل شده در طول جابه‌جایی برابر نسبت به شرایط مرزی یک‌سرگیردار می‌شود.
- ۴- تغییر زاویه‌ی نیم‌رأس پوسته‌های جدارنازک سبب تغییر زاویه‌ی تشکیل چین‌های متقارن‌محوری می‌شود. به طوری که چین‌های تشکیل شده در پوسته‌های استوانه‌ای به صورت کاملاً عمودی و در پوسته‌ی مخروطی با زاویه‌ی نیم‌رأس ۱۵ درجه به صورت کاملاً افقی روی یکدیگر واقع شده‌اند. از طرفی دیگر، افزایش زاویه نیم‌رأس سبب کاهش نیروی اولیه و متوسط نیروی فروریزش می‌شود.
- ۵- برخورد مایل سبب افزایش طول چین‌های تشکیل شده پوسته‌های جدارنازک نسبت به بارگذاری محوری است. از طرفی دیگر، برخورد مایل برخلاف پوسته‌های مخروطی اثر محسوسی بر رفتار فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای برنجی ندارد.
- ۶- سرعت برخورد اثر قابل ملاحظه‌ای بر متوسط نیروی فروریزش و اولین بیشینه‌ی نیروی فروریزش

- deformations of thin walled tubes with various section geometries. *Thin Wall Struct* 48: 946-954.
- [16] Ghamarian A, Abadi MT (2011) Axial crushing analysis of end-capped circular tubes. *Thin Wall Struct* 49(6): 743-752.
- [17] Azarakhsh S, Rahi A, Ghamarian A, Motamedi H (2015) Axial crushing analysis of empty and foam-filled brass bitubular cylinder tubes. *Thin Wall Struct* 95(3): 60-72.
- [18] Gupta NK, Venkatesh C (2007) Experimental and numerical studies of impact axial compression of thin-walled conical shells. *Int J Impact Eng* 34: 708-720.
- [19] Symonds PS (1965) Viscoplastic behavior in response of structures to dynamic loading. In: Huffington NJ (eds). *Behaviour of Materials under Dynamic Loading*. SME, New York. 106-124.
- [20] Ahmad Z, Thambiratnam DP (2009) Crushing response of foam-filled conical tubes under quasi-static axial loading. *Mater Design* 30(7): 2393-2403.
- shells under axial impact- part I: experimental and numerical observations. *Int J Solids Struct* 41(5): 1565-1580.
- [11] Wenyi Y, Emilien Durif YY, Cuie W (2007) Crushing simulation of foam-filled aluminium tubes. *Mater Trans* 48(7): 1901-1906.
- [12] Rajendran R, PremSai K, Chandrasekar B, Gokhaleb A, Basu S (2009) Impact energy absorption of aluminum foam fitted AISI 304L stainless steel tube. *Mater Design* 30(5): 1777-1784.
- [13] Marzbanrad J, Mehdikhanlo M, Saeedipour A (2009) An energy absorption comparison of square, circular, and elliptic steel and aluminum tubes under impact loading. *Turkish J Eng Environ Sci* 33: 159-166.
- [14] Salehghaffari S, Tajdari M, Panahi M, Mokhtarnezhad F (2010) Attempts to improve energy absorption characteristics of circular metal tubes subjected to axial loading. *Thin Wall Struct* 48: 379-390.
- [15] Alavi Nia A, Haddad Hamedani J (2010) Comparative analysis of energy absorption and