

## بررسی تجربی و عددی جذب انرژی در ضربه گیرها با لوله‌های جدار نازک مخروطی دو جداره تحت اثر بار محوری

سجاد آذرخش<sup>۱</sup>

کارشناسی ارشد

عباس رهی<sup>۲</sup>

استادیار

برای کاهش صدمه های ناشی از برخوردهای ناگهانی از جاذب‌های انرژی استفاده می شود. در این پژوهش اثر پارامترهای هندسی لوله‌های جدارنازک مخروطی دوجداره در بارگذاری محوری بر مقدار جذب انرژی به روش تجربی و عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس اثر وجود فوم نیز برای جذب انرژی بیشتر مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در بخش تجربی، ابتدا لوله‌های مخروطی از جنس آلومینیوم، به صورت توخالی و پر شده از فوم پلی‌یورتان تهیه شده و سپس نمونه ها تحت آزمایشهای تجربی قرار گرفته و نمودار نیرو- جابجایی در هر آزمایش استخراج میشود. در بخش عددی، شبیه‌سازی پدیده فروریزش محوری لوله‌های مخروطی جدارنازک با نرم‌افزار آباکوس انجام می‌گیرد. مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مدل ارائه شده روش مناسبی برای بررسی نحوه فروریزش و مقدار انرژی جذب شده در سیستم جاذب انرژی می باشد. در انتها، تأثیر پارامترهای اصلی سیستم همانند اختلاف قطر لوله داخلی و خارجی، طول لوله، ضخامت دیواره، نوع جنس لوله، و افزودن فوم، بر مقدار جذب انرژی در ضربه‌گیر لوله های جدارنازک مخروطی دو جداره با استفاده از روش عددی مطالعه می‌شود.

واژه های راهنما: جذب انرژی، بارگذاری محوری؛ فوم، لوله‌های دوجداره، روش اجزاء محدود.

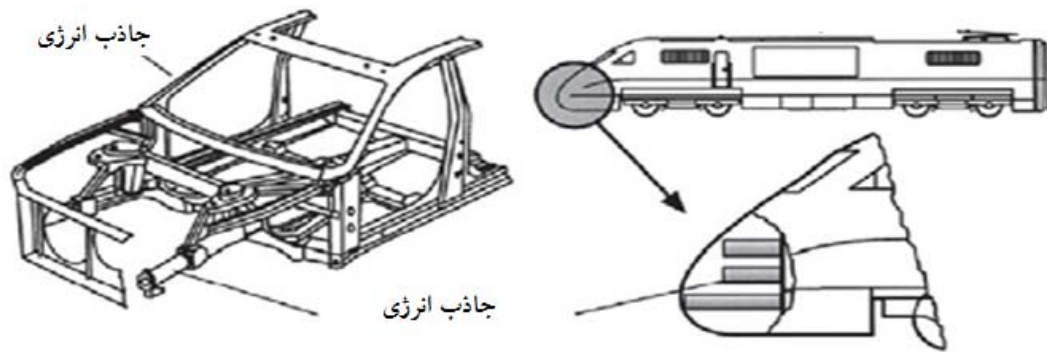
### ۱- مقدمه

جاذب‌های انرژی در صورت برخورد عمل کرده و از وارد شدن ضربه ناگهانی به شخص و یا تجهیزات حساس جلوگیری می‌کند. به عبارت دیگر، جاذب انرژی با تغییر شکل زیاد، بسیاری از انرژی جنبشی ضربه ای را در مدت زمان برخورد جذب کرده و بدین ترتیب باعث کاهش آسیب وارده به شخص و یا سیستم اصلی می‌شود. سازه‌ها و لوله‌های جدارنازک یکی از رایج ترین انواع جاذب‌های انرژی می‌باشند که مطابق شکل (۱) در سامانه‌های حمل و نقل همانند خودروها و قطارها کاربرد فراوانی دارند [۱].

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

<sup>۲</sup> نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران a\_rahi@sbu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۰/۲۹، تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۸/۱۹



شکل ۱- نمونه‌ای از جاذب های انرژی لوله‌ای به کار رفته در خودرو و قطار [۱]

پژوهش های انجام شده برای جذب انرژی بارهای ضربه ای، نشان می‌دهد که نحوه لهیدگی در اثر ضربه و میزان انرژی جذب شده در لوله‌های جدار نازک می‌تواند با ایجاد الگوهای مختلف بر روی لوله کنترل شود و بدین ترتیب سبب افزایش مقدار کارآیی این نوع از جاذب‌های انرژی یک بار مصرف شود.

علوی‌نیا و همدانی [۲] به بررسی نیروی حداکثر، مقدار جذب انرژی، و متوسط لهیدگی لوله‌های آلومینیومی استوانه‌ای، شش ضلعی، هرمی، مخروطی و مستطیلی شکل به روش شبیه‌سازی عددی در هنگام ضربه پرداختند. نتایج آنها نشان داد که لوله‌های استوانه‌ای، مخروطی، شش ضلعی، مستطیلی و مثلثی به ترتیب بیشترین مقدار جذب انرژی را دارند و همچنین بیشترین کاهش نیروی حداکثر لهیدگی در حالت‌های لوله‌های مخروطی و هرمی اتفاق می‌افتد. مرزبان‌راد و همکاران [۳] نشان دادند که لوله‌های با سطح مقطع بیضوی نسبت به لوله‌های با سطح مقطع مربعی و دایروی، دارای جذب انرژی بهتری هستند و هرگاه جنس لوله از آلومینیوم به فولاد تغییر کند زمان مورد نیاز برای لهیدگی نیز بیشتر می‌شود.

یان و همکاران [۴]، مقدار جذب انرژی در حالت استفاده از فوم‌های پلی اورتان با رشته‌های کتان در لوله‌های کامپوزیتی تحت فشار محوری شبه استاتیکی را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. آنها دریافتند لوله‌هایی که از فوم پر می‌شوند جذب انرژی بالاتری نسبت به لوله‌های توخالی دارند. آرنولد و آلتن هوف [۵] اثر عیوب هندسی بر میزان جذب انرژی و تغییر در نیروی بیشینه ابتدایی برخورد را بررسی کردند. آزمایش‌های آنها نشان داد که شکل ناپیوستگی و شیارها بر روی جذب انرژی جاذب و نیروی برخورد تاثیر قابل توجهی دارد. چنگ و همکاران [۶] تاثیر شکل هندسی ناپیوستگی (دایروی، شیاری و بیضوی) در لوله‌های آلومینیومی با سطح مقطع مربع را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که جاذب انرژی دارای ناپیوستگی بیضوی دارای جذب انرژی بالاتری است.

حسینی تهرانی و پیرمحمد [۷] رفتار جذب انرژی لوله‌های دوجداره ساده تحت بارگذاری محوری و مایل را مطالعه کردند. آنها دریافتند که لوله‌های دوجداره تحت بارگذاری محوری، دارای رفتار لهیدگی مناسبتر و همچنین دارای جذب انرژی بالاتری هستند. آذرخش و همکاران [۸-۱۰] نیز کارهای متعددی در خصوص رفتار و مقدار جذب انرژی توسط سازه‌ها و لوله‌های جدار نازک در حالت‌های مختلف به روش تجربی و عددی انجام داده‌اند. آنها در مرجع [۸] رفتار لهیدگی پوسته‌های استوانه‌ای تک‌جداره برنجی را به روش آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار دادند.

در تحقیق فوق، اثر پارامترهای اصلی همانند عیوب هندسی (تغییرات ضخامت و تغییرشکل موجی)، شرایط مرزی، مقدار زاویه نیم رأس، زاویه برخورد، تقویت کننده‌های چند سلولی ستونی و سرعت برخورد بر روی میزان جذب انرژی در جاذبه‌های انرژی مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین آذرخش و همکاران [۹] رفتار فروریزش لوله های استوانه‌ای دوجداره برنجی تحت بارگذاری محوری را مورد بررسی قرار دادند. آنها در تحقیق مذکور، اثر عوامل هندسی سازه نظیر ضخامت، زاویه نیم‌رأس و همچنین سرعت و جرم برخورد کننده بر روی نسبت انرژی جذب شده دینامیکی به استاتیکی را مورد مطالعه قرار دادند. در ادامه آذرخش و همکاران [۱۰] به روشهای عددی و تجربی، مقدار جذب انرژی و تغییرشکل در لوله‌های جدارنازک مخروطی تک‌جداره تحت بارگذاری محوری و مایل را مطالعه کردند. آنها در مقاله فوق، اثر تغییر پارامترهای مختلف از جمله زاویه نیم‌راس، زاویه بارگذاری و وجود فوم درون لوله جدارنازک را بر میزان جذب انرژی مورد بررسی قرار دادند. همچنین اثر سرعت برخوردکننده بر میزان جذب انرژی لوله‌های توخالی و پر شده با فوم نیز توسط این محققین مورد بررسی قرار گرفت.

زارعی و قمریان [۱۱] جذب انرژی لوله‌های مخروطی و استوانه‌ای با درپوش کروی توخالی و تقویت شده با فوم پلی‌یورتان را تحت بارگذاری محوری مقایسه کردند. مشاهدات آنها نشان داد، تطابق قابل ملاحظه‌ای بین شیوه فروریزش، نمودار نیرو-جابجایی و انرژی ویژه جذب شده در نتایج عددی و آزمایشگاهی وجود دارد. رهی [۱۲] مقدار جذب انرژی و نحوه تغییرشکل ضربه‌گیرهای دوجداره ترکیبی را تحت اثر نیروی محوری به روش عددی و آزمایشگاهی بررسی کرد. در مقاله حاضر، رفتار مکانیکی و مقدار جذب انرژی در لوله‌های دوجداره مخروطی در حالت‌های خالی و تقویت شده با فوم پلی‌یورتان تحت اثر بارگذاری محوری به دو روش تجربی و عددی مطالعه شده است. در ابتدا نحوه تهیه نمونه‌ها و انجام آزمون‌های تجربی و نتایج حاصل بیان شده و سپس شبیه‌سازی عددی انجام شده است. مطالعه تجربی و عددی قابلیت جذب انرژی، مقدار نیروی متوسط، نحوه تغییر شکل سازه‌ها و همچنین تأثیر پارامترهای موثر بر عملکرد این سازه‌ها، از مهم‌ترین شاخصه‌های مورد بررسی در این پژوهش می‌باشند.

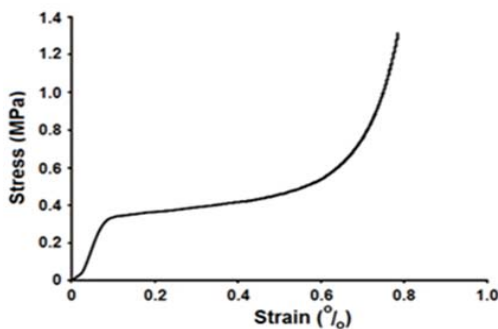
## ۲- آزمایشهای تجربی

به دلیل عدم امکان تهیه نمونه‌ها به شکل آماده با مشخصات و ابعاد مورد نظر در بازار، اقدام به ساخت نمونه‌ها به روش کارگاهی شد. همچنین به دلایل متعددی از جمله وزن کم و مزایای دیگر از آلیاژهای آلومینیوم برای تهیه نمونه جاذبه‌های انرژی جدارنازک استفاده شد. نمونه‌های آزمایشگاهی از جنس آلومینیوم سری ۱۰۵۰ با زاویه نیم‌رأس ۵ درجه انتخاب شده است که به‌روش چرخ‌کاری دستی ساخته شده‌اند. جهت تعیین خواص مکانیکی ورق‌های مورد استفاده، آزمایش کشش مطابق استاندارد ASTM E8M-04 بر روی سه نمونه انجام شد. شکل (۲-الف) نمودار تنش- کرنش حقیقی یکی از نمونه‌های آزمایش شده را نشان می‌دهد. با میانگین گرفتن از نتایج آزمایش‌های انجام شده، مقادیر تنش تسلیم و تنش نهایی به ترتیب برابر ۸۳ و ۱۰۵ مگاپاسکال بدست آمد. خواص مکانیکی فوم پلی‌یورتان، با استفاده از آزمایش فشار براساس استاندارد ASTM D1621/69 تعیین شد. طول، عرض و ارتفاع این نمونه‌های فوم براساس این استاندارد به ترتیب ۵۰، ۳۰ و ۵۰ میلی‌متر تعیین شد.

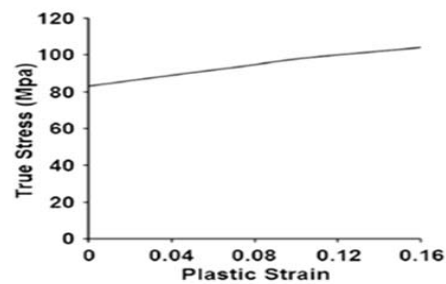
در این مطالعه، از فوم پلی یورتان سخت با دانسیته ۶۵ کیلوگرم بر مترمکعب استفاده شده است. مطابق شکل (۲-ب) نمودار تنش- کرنش مهندسی برای فوم مورد استفاده، دارای بخش الاستیک خطی اولیه، و سپس مسطح و در انتها با شیب تند است. در ناحیه مسطح با افزایش مقدار بار تا زمانی که دیواره سلولها با هم تماس پیدا می کند، ادامه دارد. در این ناحیه افزایش کرنش و تخریب سلولها تقریباً در یک تنش ثابت صورت می گیرد. با افزایش بار و تماس دیواره های سلولها، نمودار وارد ناحیه متراکم می شود که این ناحیه با رشد سریع تنش همراه است و در نتیجه منحنی در این ناحیه دارای شیب تند افزایشی می باشد.

همچنین شکل (۳)، نمونه فوم را قبل و بعد از بارگذاری نشان می دهد. نمونه ها از ورق آلومینیومی ۱۰۵۰ با ضخامت ۱ میلیمتر ساخته شده اند و سایر مشخصات نمونه ها نیز در جدول (۱) آورده شده است. از جمله معایب ساخت نمونه مخروطی به روش چرخ کاری دستی، تغییر شکل سطحی (برآمدگی یا تغییر شکل موجی) و تغییر ضخامت دیواره نمونه های مخروطی است. برای این منظور ضخامت و ابعاد نمونه های مخروطی به کمک دستگاه تعیین مختصات دقیق اندازه گیری شد. برخی از نمونه های تولید شده در شکل (۴) نشان داده شده است.

در این پژوهش، آزمایش ها بر روی سازه های جدارنازک دوجداره برای دو حالت خالی و تقویت شده با فوم انجام شده و به منظور ساده شدن شرایط، برای هر حالت مطابق جدول (۲) یک کد تعریف شده است. حروف BCTi مربوط به نمونه های توخالی و حروف FBCTi مربوط به نمونه های پر شده با فوم است. ستون اول در جدول (۲) برای حالتی است که لوله ها بدون فوم می باشند و ستون دوم برای حالت نمونه ها با فوم می باشد. در این پژوهش، برای مقید کردن نمونه های مخروطی ساخته شده از شرط تکیه گاهی یکسر گیردار استفاده می شود. همانطور که در شکل (۵) ملاحظه می شود، حرکت شعاعی در جهت افزایش قطر قاعده های بزرگ نمونه های دو جداره کاملاً به صورت یکسر گیردار مقید می شود.

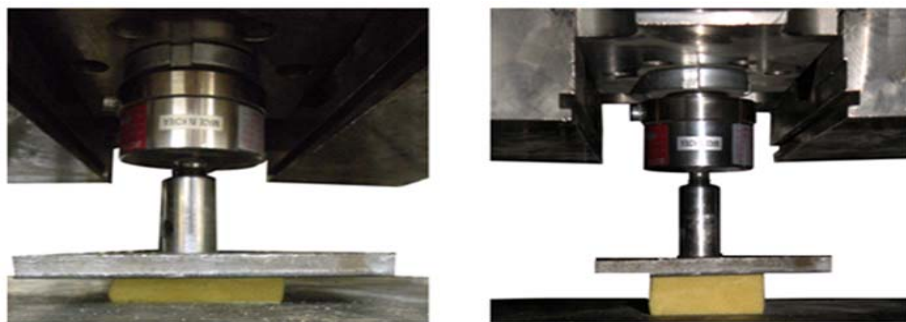


ب



الف

شکل ۲- الف) نمودار تنش-کرنش حقیقی ناحیه پلاستیک برای آلومینیوم (ب) نمودار تنش-کرنش مهندسی برای فوم



شکل ۳- نمونه فوم قبل و بعد از آزمایش بارگذاری فشاری



شکل ۴- نمونه‌های ساخته شده دوجداره توخالی و پر شده از فوم

جدول ۱- مشخصات نمونه‌های دو جداره بر حسب میلی‌متر

نام نمونه	ارتفاع	قطر بخش تحتانی	قطر بخش فوقانی	ضخامت بخش تحتانی	ضخامت بخش فوقانی
دو جداره	۵۵	۶۰	۵۰	۱/۰	۰/۹
مخروطی		۴۰	۳۰	۱/۰	۰/۷

برای برقراری این شرط مرزی از قطعه‌ای فولادی برای مقید کردن قاعده‌های بزرگ استفاده شده است. در سطح این قطعه دو شیار هم قطر با قاعده‌های بزرگ نمونه‌های مخروطی به عمق ۳ میلی‌متر تراشیده شده است تا از حرکت افقی و عمودی قاعده‌ها در طی فروریزش آن جلوگیری شود. برای اعمال بارگذاری مطابق شکل (۵) از دستگاه زوییک دانشگاه صنعتی امیرکبیر استفاده شده است. این دستگاه دارای دو فک یکی در بالا و دیگری در پایین است. فک پایین دستگاه ثابت بوده ولی فک بالا می‌تواند با سرعت ثابت یا متغیر، در مسافت تعریف شده حرکت کند. اعمال نیروی کششی و فشاری تا حداکثر ۶۰ تن در این دستگاه توسط سیستم هیدرولیک میسر است. نمونه‌های ساخته شده با در نظر گرفتن شرط تکیه‌گاهی، بین دو فک قرار گرفته و نمودار نیرو- جابجایی و یا تنش- کرنش در حین تغییر شکل توسط نرم‌افزار دستگاه استخراج می‌شود. در این آزمایش‌ها، سرعت بارگذاری ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه و مسافتی که فک طی می‌کند ۳۳ میلی‌متر، معادل ۶۰ درصد ارتفاع اولیه نمونه‌ها، انتخاب شده است.



شکل ۵- نحوه قرار گرفتن لوله مخروطی دوجداره یکسرگیردار در دستگاه یونیورسال برای انجام آزمون ها

جدول ۲- کدهای نمونه‌های دو جداره مخروطی

نوع نمونه	دوجداره بدون فوم	دوجداره با فوم
میانگین جرم نمونه (گرم)	۴۵	۴۷
کد آزمایش	BCT3 , BCT4	FBCT3 , FBCT4

### ۳- نتایج آزمایش

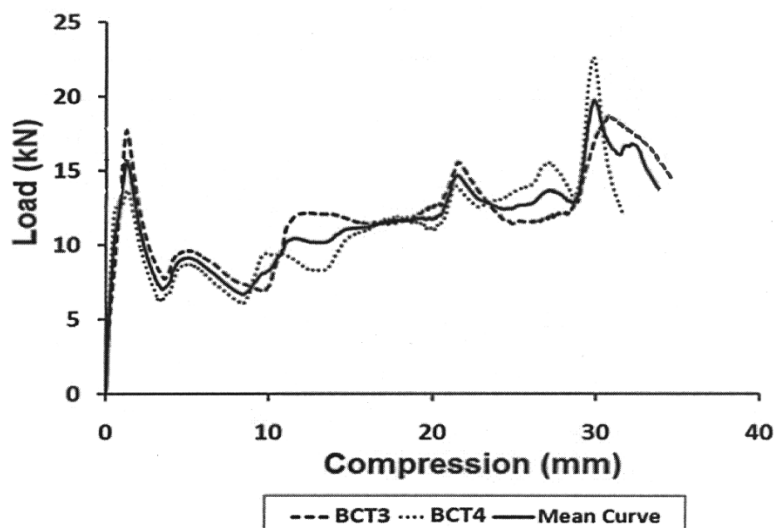
برای افزایش دقت نتایج، برای هر یک از دو حالت ارایه شده در جدول (۳) بیش از یک آزمایش انجام شده و سپس مقادیر میانگین کمیت‌های مورد نظر همانند انرژی جذب‌شده، نیروی میانگین لهیدگی، اولین نیروی بیشینه، و انرژی ویژه جذب محاسبه و ثبت شده است.

#### ۳-۱- نتایج آزمایش نمونه‌های بدون فوم

شیوه فروریزش این نمونه‌ها (BCT3 و BCT4)، مطابق شکل (۶) برای لوله‌های بیرونی به صورت متقارن محوری و لوله‌های داخلی به شیوه الماسی سه‌گوش حاصل شده است. نمودار نیرو- جابجایی فروریزش نمونه‌ها تحت اثر بارگذاری محوری و همچنین مقدار متوسط آنها در شکل (۷) آمده است.



شکل ۶- فروریزش لوله‌های مخروطی دوجداره یکسرگیردار بدون فوم تحت بارگذاری محوری



شکل ۷- نمودار نیرو- جابجایی فروریزش نمونه‌های مخروطی دوجداره یکسرگردار تحت اثر بارگذاری محوری

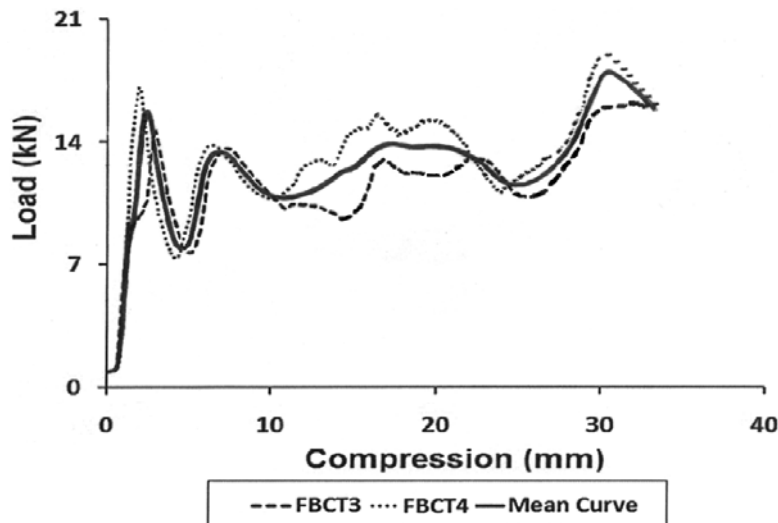
### ۳-۲- نتایج آزمایش نمونه‌های تقویت شده با فوم

فروریزش نهایی نمونه‌های مخروطی دوجداره پر شده از فوم پلی‌یورتان تحت بارگذاری محوری، در شکل (۸) نشان داده شده است. وجود فوم و مقاومت آن در برابر نیروی فروریزشی سبب شده است که نوع فروریزش پوسته مخروطی خارجی همواره به صورت متقارن محوری باشد از طرفی دیگر، فروریزش بیشتر لوله‌های داخلی به صورت الماسی سه‌گوش مشاهده شد. علت این امر را می‌توان در عیوب هندسی حاصل از چرخ‌کاری نمونه‌ها همانند برآمدگی‌های و موج‌دار بودن سطح نمونه‌ها جستجو کرد.

نمودار نیرو- جابجایی نمونه‌های دو جداره پر شده از فوم تحت بارگذاری محوری در شکل (۹) نشان داده شده است. همگرایی نتایج آزمایش‌ها بیانگر تزریق صحیح فوم و صحت نتایج تجربی می‌باشد. مطابق انتظار، وجود فوم پلی‌یورتان با چگالی ۶۵ کیلوگرم بر متر مکعب سبب افزایش سطح زیر نمودار یا به اصطلاح انرژی جذب شده در نمونه‌ها شده است. در این آزمایش‌ها، به دلیل استفاده از فوم با دانسیته کم، این میزان افزایش چشم‌گیر نیست. در این پژوهش، میزان افزایش جذب انرژی در حالت نمونه‌های دوجداره پر شده از فوم نسبت به حالت نمونه‌های بدون فوم تحت اثر بارگذاری محوری، حدود ۷ درصد و همچنین افزایش نیروی میانگین در نمونه‌های پر شده از فوم نسبت به حالت توخالی، حدود ۷ درصد است.



شکل ۸- فروریزش نمونه‌های دوجداره پر شده از فوم تحت بارگذاری محوری



شکل ۹- نمودار نیرو- جابجایی فروریزش نمونه‌های مخروطی دو جداره با فوم تحت اثر بارگذاری محوری

جدول ۳- نتایج آزمون های فروریزش نمونه‌های مخروطی دو جداره تحت بارگذاری محوری

MC	FBCT4	FBCT3	MC	BCT4	BCT3	نمونه
۱۵/۶	۱۶/۹	۱۴/۳	۱۵/۶	۱۳/۷	۱۷/۴	اولین بیشینه نیرو (کیلو نیوتن)
۱۷/۹	۱۸/۸	۱۷/۰	۱۹/۶	۲۱/۷	۱۷/۶	نیروی بیشینه لهیدگی (کیلو نیوتن)
۱۲/۴	۱۳/۰	۱۱/۷	۱۱/۶	۱۱/۱	۱۲/۱	نیروی میانگین لهیدگی (کیلو نیوتن)
۴۰.۸	۴۳.۰	۳۸.۷	۳۸.۳	۳۶.۷	۳۹.۸	انرژی جذب شده (ژول)
۸/۶۷			۸/۵۱			انرژی ویژه جذب شده (ژول بر گرم)

#### ۴- شبیه‌سازی عددی

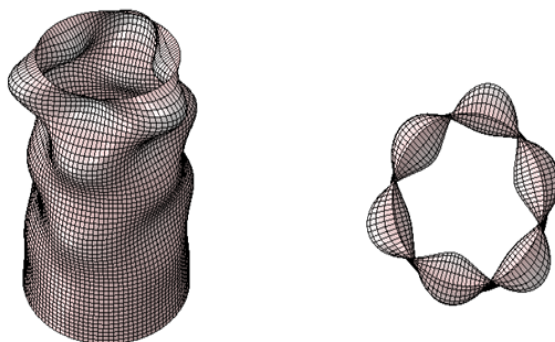
از نرم‌افزار المان محدود آباکوس برای تحلیل لهیدگی نمونه‌های دو جداره مخروطی تحت اثر بارگذاری محوری شبه‌استاتیکی استفاده شده است. از آنجا که فروریزش غیرمستقر محوری نمونه‌های مخروطی ناشی از عیوب هندسی است، لازم است در نرم‌افزار المان محدود این عیوب هندسی تعریف شود. بدین منظور در نرم‌افزار المان محدود از مقادیر ویژه بارگذاری کمانش نمونه مخروطی استفاده می‌شود.

شکل (۱۰) مود کمانشی فروریزش لوله های جدارنازک مخروطی را نشان می‌دهد که شیوه فروریزش آنها بر اساس نتایج تجربی نامتقارن است. حال پس از تعریف عیوب هندسی در نرم‌افزار اجزای محدود می‌توان مسئله فروریزش نمونه‌های دو جداره مخروطی را بررسی کرد. شکل (۱۱) بارگذاری و هندسه لوله های مخروطی دو جداره را نشان می‌دهد. رفتار غیرخطی مواد و اثر برخورد چروک‌های لوله‌های مخروطی و فوم با یکدیگر به نحوی طراحی شده تا شرایط تحلیل با شرایط آزمایشگاهی کاملاً منطبق باشند. شبیه‌سازی لهیدگی با فرض صلب بودن سطوح مسطح ابزار در مقایسه با نمونه آزمایشگاهی ارایه شده است.

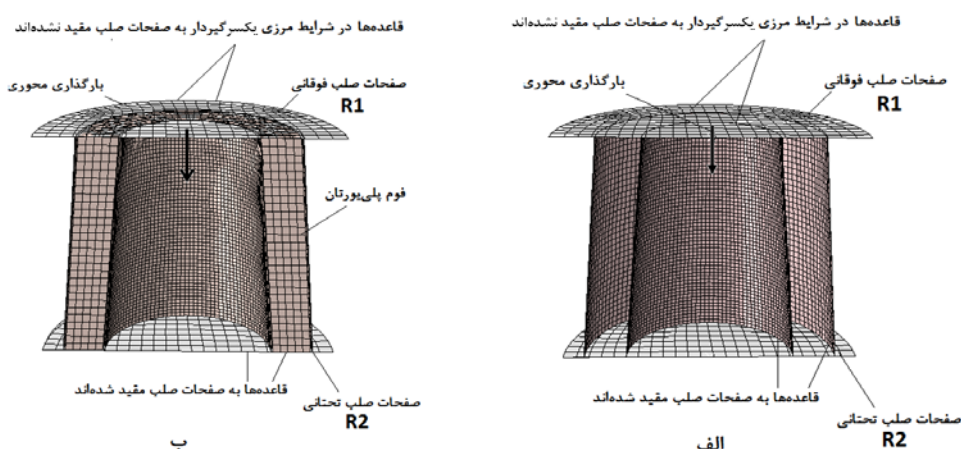


رفتار ناحیه پلاستیک آلومینیوم و فوم پلی‌یورتان به ترتیب با استفاده از منحنی تنش - کرنش حقیقی پلاستیک، نمونه‌های کشش (شکل ۲-الف) و فشار (شکل ۲-ب) تعیین شد. شرط مرزی تماسی برای جلوگیری از نفوذ نقاط مختلف لوله‌های مخروطی و همچنین فوم به داخل قطعات صلب و بین سطوح داخلی و خارجی فوم با لوله‌ها تعریف شده است. همچنین امکان لغزش لوله‌های دو جداره بر روی سطوح صلب تعریف شده است.

در این پژوهش بین سطح خارجی لوله‌های جدارنازک مخروطی با سطح  $R_1$  شرط تماس ایجاد شده و مقدار ضریب اصطکاک برای این نوع تماس  $0/3$  در نظر گرفته شده است. همچنین بین سطح فوقانی و تحتانی فوم پلی‌یورتان با سطوح صلب مجاورشان تماس تعریف شده و ضریب اصطکاک بین آنها نیز  $0/15$  در نظر گرفته شده است [۱۱]. برای شبیه‌سازی سه بعدی لوله‌های جدارنازک مخروطی، از المان‌های پوسته‌ای چهارگوش (S4R) استفاده شده است. به نحوی که المان‌های چهارگوش پوسته‌ای دارای چهار گره هستند. همچنین در شبیه‌سازی برای صفحات صلب از المان صلب (R3D4) استفاده شده است. فوم پلی‌یورتان نیز در مدل سه بعدی با المان هشت گره‌ای (C3D8R) مدل‌سازی شده است.



شکل ۱۰- مود کمانشی مورد استفاده در فروریزش لوله جدار نازک داخلی در نمونه‌های دو جداره

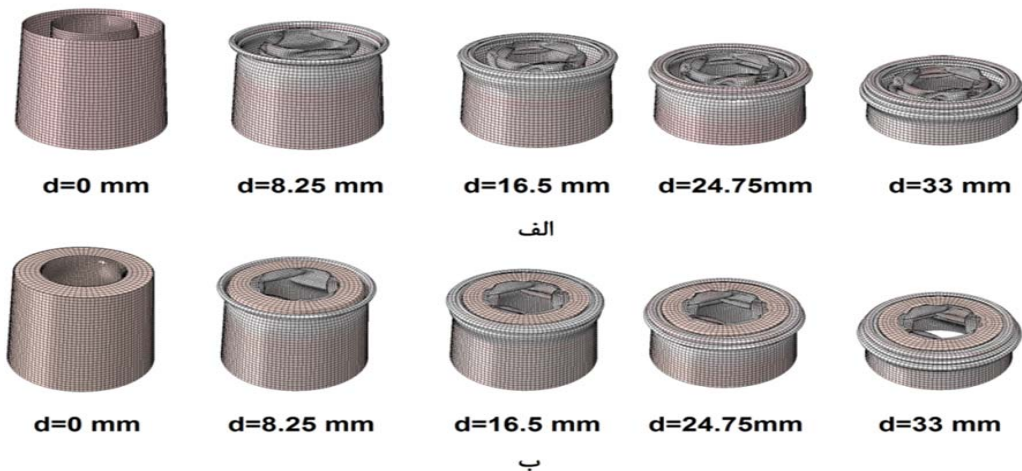


شکل ۱۱- هندسه لوله‌های مخروطی با شرایط مرزی یکسرگیردار (الف) دوجداره توخالی، (ب) دو جداره پر شده با فوم

در تحلیل عددی فروریزش لوله‌های مخروطی، سطح صلب پایینی به فک ثابت دستگاه متصل است. پس کلیه درجه‌های آزادی آن مقید می‌شود. از طرف دیگر، سطح صلب بالایی به فک متحرک متصل است پس کلیه درجه‌های آزادی مرتبط با آن غیر از جابجایی در راستای محوری باید مقید شود. همانطور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، بارگذاری به صورت جابجایی معین صفحه صلب بالایی (R1) است. شکل (۱۲) مراحل فروریزش لوله‌های جدارنازک مخروطی دو جداره را با شرایط مرزی یکسرگیردار نشان می‌دهد. در شبیه‌سازی فروریزش لوله‌های مخروطی از ناحیه فوقانی به صورت تاخوردگی شروع می‌شود و پشت سرهم ادامه می‌یابد. در شرایط مرزی یکسرگیردار قاعده‌های فوقانی تحت اثر نیروی فشاری تغییر شکل یافته که این نشان دهنده صحت شرایط مرزی در شبیه‌سازی عددی حاضر است.

### ۵- مقایسه نتایج

برای شبیه‌سازی فرآیند فرو ریزش از نرم افزار آباکوس استفاده می‌شود. برای صحت‌گذاری، نتایج عددی و نتایج تجربی با یکدیگر مقایسه می‌شود. شکل (۱۳) فروریزش نمونه دو جداره را در حالت شبیه‌سازی و تجربی تحت اثر بارگذاری شبه‌استاتیکی محوری نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود شکل تغییر شکل نمونه‌های شبیه‌سازی با حالت تجربی مشابه هستند و این خود نیز می‌تواند نشان دهنده صحت شبیه‌سازی‌های انجام شده باشد.



شکل ۱۲- مراحل فروریزش لوله‌های دو جداره مخروطی با شرایط مرزی یکسرگیردار (الف) توخالی، (ب) پر شده با فوم



شکل ۱۳- مقایسه فروریزش در حالت‌های تجربی و عددی، الف) نمونه دو جداره توخالی،

ب) نمونه دو جداره پر شده از فوم

شکل (۱۴) نمودار نیرو- جابجایی فروریزش سه بعدی نمونه‌های دو جداره بر اساس نتایج تجربی و شبیه‌سازی با شرایط مرزی یکسرگردار تحت اثر بارگذاری محوری را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، روند تغییر نیرو نیز تا حد قابل قبولی در هر دو نمودار مشابه است. دلایل تفاوت نمودارهای نیرو- جابجایی نمونه‌های مخروطی در دو حالت تجربی و شبیه‌سازی عددی را می‌توان به صورت زیر تشریح کرد:

الف- وجود عیوب هندسی در لوله‌ها: در شبیه‌سازی نقص‌های اولیه (شامل تغییر غیرخطی ضخامت، برآمدگی سطح و غیره) به صورت تقریبی به نرم‌افزار المان محدود اعمال شده است.

ب- تماس بین لوله و فوم: در شبیه‌سازی حاضر تماس بین پوسته مخروطی و فوم با تعریف ضریب اصطکاک و نیروی برشی مدل شده است، در صورتی که در حالت واقعی، به هنگام تشکیل فوم، نیروی فشاری به لوله مخروطی وارد می‌شود که باعث عدم جدایش فوم از پوسته مخروطی می‌شود.

ج- خطا در ساخت فوم: وجود خطا در نسبت یک به یک فوم‌های دو جزئی فوم پلی‌یورتان باعث ایجاد خطا در چگالی نسبی فوم پلی‌یورتان و تعیین خواص مکانیکی این فوم‌ها می‌شود. در نرم‌افزار، ساختار همگن برای ماده پلی‌یورتان تعریف شده است.

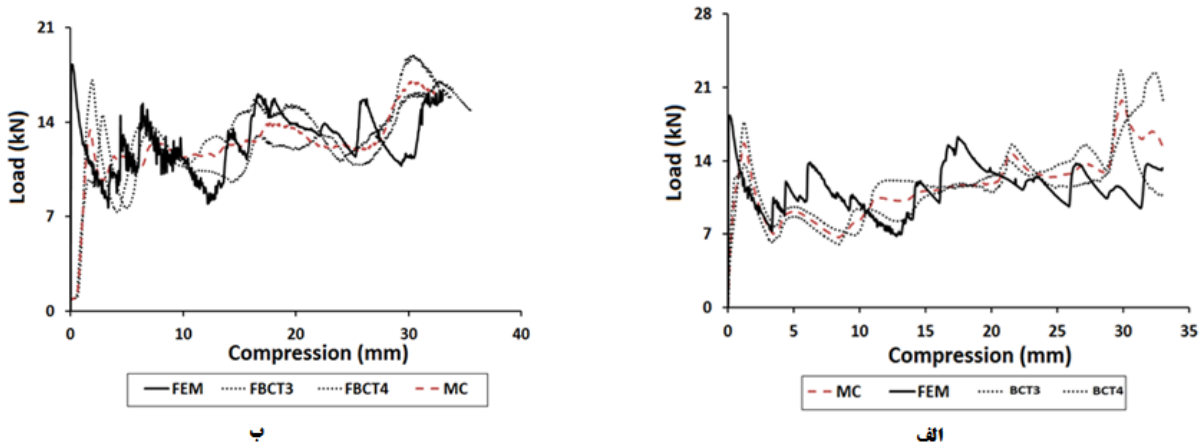
د- عدم مطابقت دقیق بین شرایط مرزی اعمال شده در آزمایش و نرم‌افزار المان محدود: در آزمایش، سطح قاعده‌های نمونه‌های مخروطی توسط شیار قطعه فولادی گیردار شده است این شرط مرزی اجازه حرکت افقی بسیار اندکی را برای نمونه‌های مخروطی فراهم می‌کند در حالی که این امر در نرم‌افزار المان محدود لحاظ نشده است.

## ۶- بررسی تغییر پارامترهای سیستم بر جذب انرژی

در بخش قبل، مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی نشان داد مدل اجزای محدود ارائه شده می‌تواند پدیده فروریزش لوله‌های جدار نازک مخروطی دو جداره تحت اثر بارگذاری محوری را با دقت قابل قبولی مدل‌سازی کند. اکنون می‌توان با استفاده از مدل ارائه شده، اثر پارامترهای اصلی بر فروریزش لوله‌های جدار نازک مخروطی را تحت اثر بارگذاری محوری مطالعه کرد. لازم به تاکید است که در بررسی پارامتری به منظور کاهش زمان تحلیل اثر عیوب هندسی لحاظ نشده و بررسی پارامتری تنها برای نمونه‌های دو جداره توخالی انجام شده است.

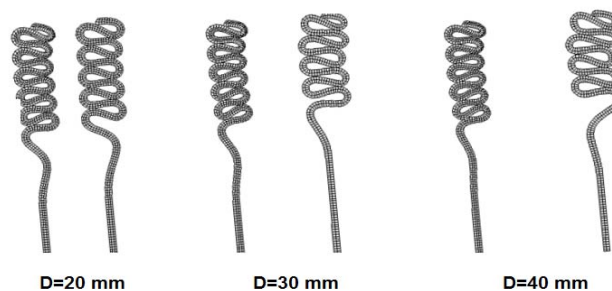
### ۶-۱- اثر اختلاف قطر لوله داخلی و خارجی بر انرژی جذب شده نمونه مخروطی دو جداره توخالی

در این بخش اثر پارامتر اختلاف قطر لوله داخلی و خارجی بر نمودار نیرو- جابجایی، میزان انرژی جذب شده و هندسه فروریزش نمونه‌های مخروطی دو جداره مطالعه می‌شود. سایر ابعاد هندسی و شرایط مرزی سیستم ثابت در نظر گرفته می‌شود. طول نمونه‌ها برابر ۱۰۰ میلی‌متر، زاویه نیم‌رأس ۵ درجه و ضخامت لوله‌های جدار نازک مخروطی دو جداره برابر یک میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. همچنین قطر تحتانی پوسته مخروطی داخلی ثابت در نظر گرفته می‌شود. اختلاف قطر لوله داخلی و خارجی برابر ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میلی‌متر انتخاب شده است لذا قطر تحتانی پوسته مخروطی خارجی ۶۰، ۷۰ و ۸۰ میلی‌متر خواهد بود.

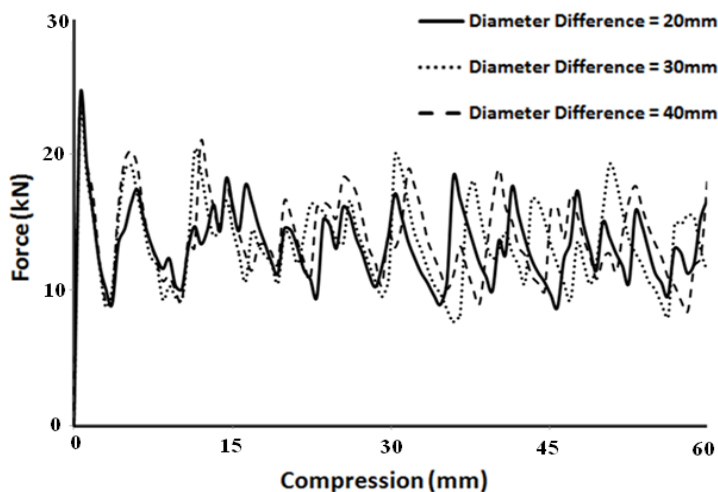


شکل ۱۴- مقایسه نمودار نیرو- جابجایی در حالت های تجربی و شبیه سازی برای نمونه های دوجداره (الف) توخالی، (ب) پر شده از فوم

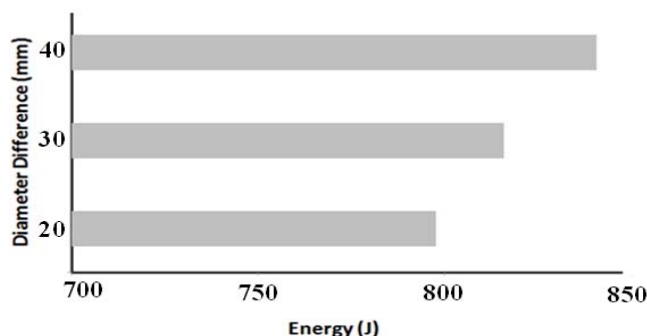
شکل (۱۵) تاثیر اختلاف قطر لوله داخلی و خارجی را بر نوع و شیوه فروریزش لوله های مخروطی دو جداره برای جابجایی ۶۰ میلیمتر نشان می دهد. شکل (۱۶) نیز اثر اختلاف قطر لوله داخلی و خارجی بر نمودار نیرو-جابجایی فروریزش متقارن محوری لوله های مخروطی دوجداره را تحت اثر بارگذاری محوری نشان می دهد. مطابق انتظار، افزایش اختلاف قطر لوله داخلی و خارجی در لوله های مخروطی جدارنازک دو جداره تاثیر ناچیزی بر اولین بیشینه نیروی فروریزش و مقدار متوسط نیروی فروریزش دارد. همان طور که در شکل (۱۷) مشاهده می شود انرژی جذب شده فروریزش، تابعی از اختلاف قطر لوله داخلی و خارجی است و نتایج نشان می دهد که افزایش اختلاف قطر لوله داخلی و خارجی باعث افزایش انرژی جذب شده می شود.



شکل ۱۵- تاثیر اختلاف قطر لوله داخلی و خارجی بر نوع و شیوه فروریزش لوله های جدارنازک مخروطی دوجداره



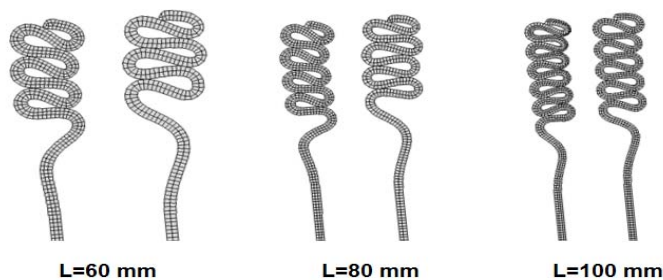
شکل ۱۶- اثر اختلاف قطر تحتانی لوله داخلی و خارجی بر نمودار نیرو-جابجایی فروریزش لوله های مخروطی جدارنازک دوجداره



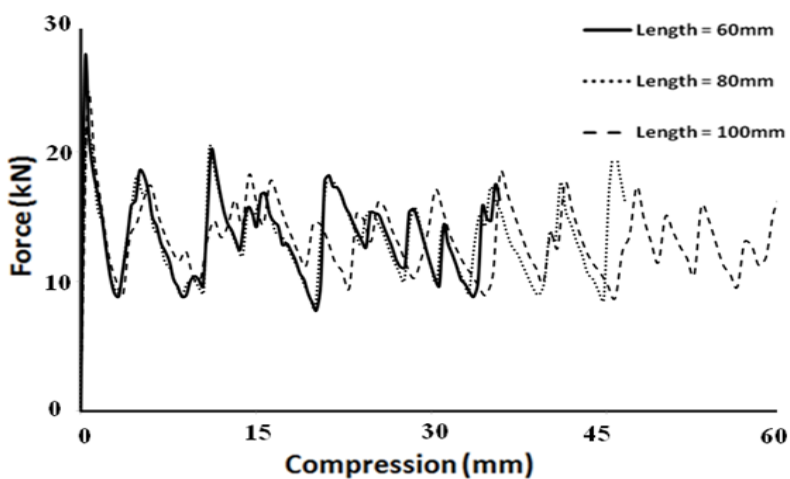
شکل ۱۷- اثر اختلاف قطر لوله داخلی و خارجی بر انرژی جذب شده لوله های مخروطی جدارنازک دوجداره

#### ۶-۲- بررسی اثر طول لوله بر رفتار فروریزش نمونه مخروطی دوجداره توخالی

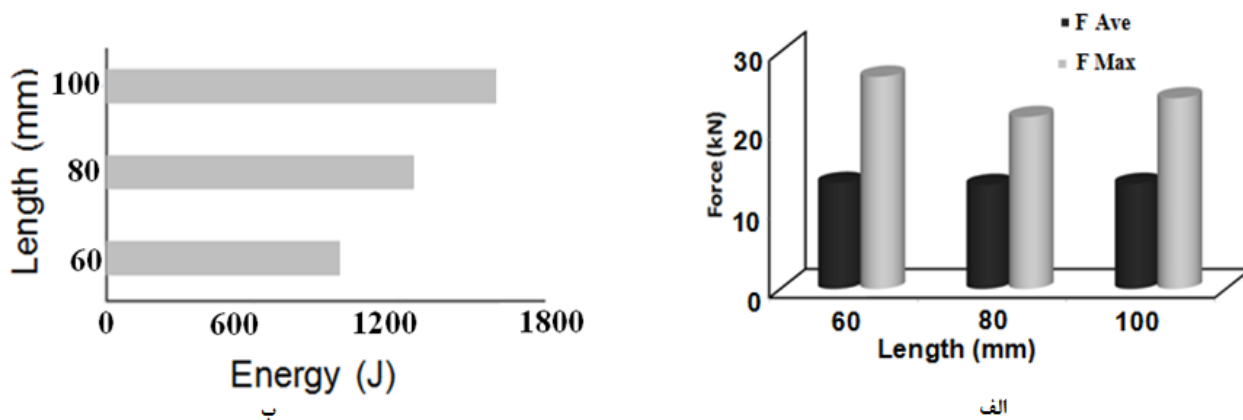
در این بخش اثر پارامتر اختلاف طول لوله بر متوسط نیروی فروریزش، میزان انرژی جذب شده و هندسه فروریزش نمونه های مخروطی دو جداره بررسی می شود. سایر ابعاد هندسی و شرایط مرزی ثابت در نظر گرفته می شود. اختلاف قطر تحتانی لوله مخروطی داخلی و خارجی برابر ۲۰ میلیمتر، زاویه نیم رأس ۵ درجه و ضخامت لوله های مخروطی موازی برابر یک میلیمتر در نظر گرفته می شود. طول لوله های مخروطی برابر ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ میلیمتر انتخاب شده است. شکل (۱۸)، اثر اختلاف طول لوله مخروطی بر نوع و شیوه فروریزش لوله های جدارنازک مخروطی دوجداره برای جابجایی طولی ۶۰ درصد نشان می دهد. شکل (۱۹) اثر طول لوله ها بر نمودار نیرو-جابجایی فروریزش لوله های مخروطی دو جداره تحت اثر بارگذاری محوری را نشان می دهد. همان طور که در شکل (۲۰) مشاهده می شود اولین بیشینه نیرو، متوسط نیروی فروریزش، و همچنین انرژی جذب شده فروریزش، تابعی از اختلاف طول لوله مخروطی دو جداره است. به نحوی که افزایش طول لوله باعث افزایش انرژی جذب شده می شود ولی بر متوسط نیروی فروریزش تاثیر چندانی ندارد.



شکل ۱۸- اثر طول لوله بر نوع و شیوه فروریزش متقارن محوری لوله های مخروطی دو جداره جدارنازک



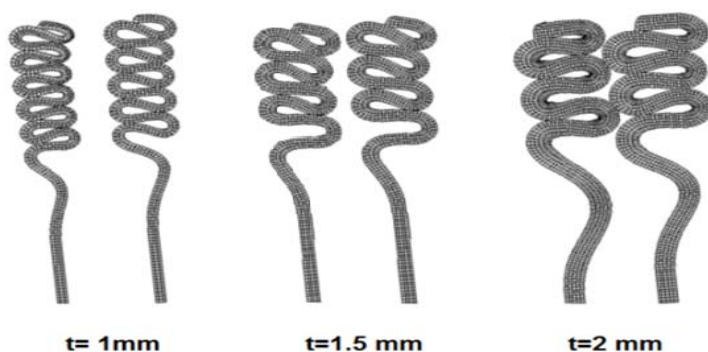
شکل ۱۹- اثر طول لوله بر نمودار نیرو- جابجایی فروریزش محوری لوله های مخروطی دو جداره جدارنازک



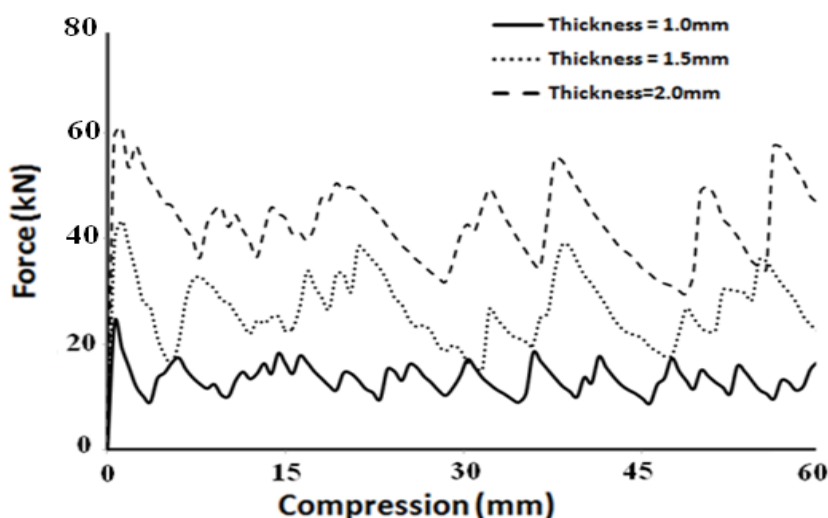
شکل ۲۰- اثر طول لوله بر الف) اولین بیشینه نیرو و متوسط نیروی فروریزش ب) انرژی جذب شده لوله های مخروطی دوجداره

### ۳-۶- اثر ضخامت لوله بر رفتار فروریزش نمونه‌ی مخروطی دو جداره توخالی

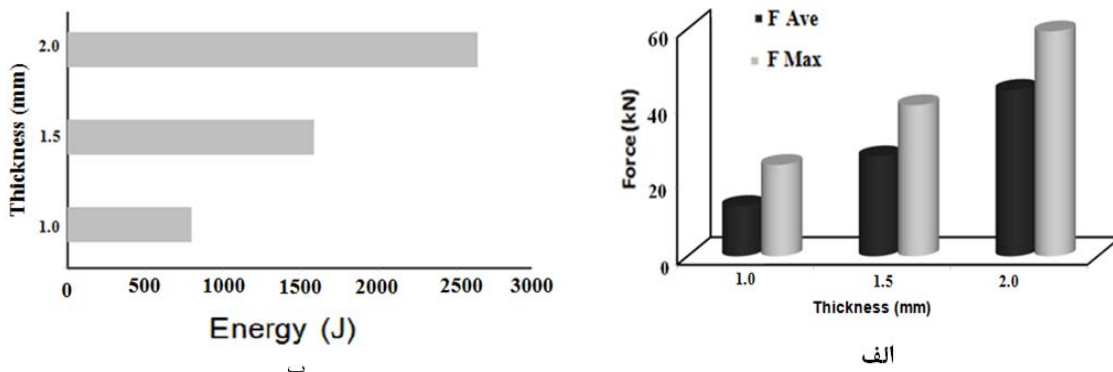
در این بخش اثر پارامتر اختلاف ضخامت لوله بر متوسط نیروی فروریزش، میزان انرژی جذب شده، و هندسه فروریزش نمونه‌های مخروطی دوجداره بررسی می‌شود. سایر ابعاد هندسی و شرایط مرزی ثابت در نظر گرفته می‌شود. اختلاف قطر لوله مخروطی داخلی و خارجی برابر ۲۰ میلی‌متر، زاویه نیم‌رأس ۵ درجه، و طول لوله‌های مخروطی دوجداره برابر ۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. ضخامت لوله‌های مخروطی برابر ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر انتخاب شده است. شکل (۲۱)، اثر اختلاف ضخامت لوله را بر شیوه فروریزش محوری لوله‌های مخروطی دوجداره برای جابجایی ۶۰ میلی‌متر نشان می‌دهد. نکته قابل توجه آن است که با افزایش ضخامت، طول چین نیز افزایش می‌یابد. شکل (۲۲) اثر اختلاف ضخامت لوله بر نمودار نیرو-جابجایی فروریزش لوله‌های مخروطی دو جداره را تحت اثر بارگذاری محوری نشان می‌دهد. مطابق انتظار، افزایش ضخامت لوله‌های مخروطی دو جداره باعث افزایش بیشینه نیروهای فروریزش می‌شود.



شکل ۲۱- اثر ضخامت لوله بر شیوه فروریزش محوری لوله‌های مخروطی دوجداره



شکل ۲۲- اثر ضخامت لوله بر نمودار نیرو-جابجایی فروریزش محوری لوله‌های مخروطی دوجداره



شکل ۲۳- اثر ضخامت لوله بر الف) اولین بیشینه نیرو و متوسط نیروی فروریزش،  
ب) انرژی جذب شده لوله های مخروطی دوجداره

همانطور که در شکل (۲۳) مشاهده می شود اولین بیشینه نیرو، متوسط نیروی فروریزش، و انرژی جذب شده فروریزش تابعی از اختلاف ضخامت لوله دوجداره مخروطی است. نتایج نشان می دهد که افزایش اختلاف ضخامت لوله های دوجداره مخروطی باعث افزایش اولین بیشینه نیرو، متوسط نیروی فروریزش، و در نتیجه انرژی جذب شده می شود.

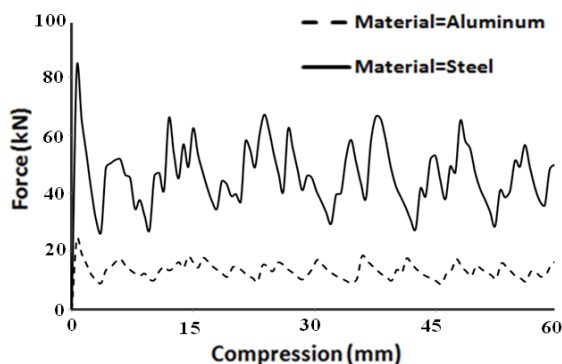
#### ۴-۶- اثر نوع ماده بر رفتار فروریزش نمونه مخروطی دوجداره توخالی

در صنعت اتومبیل استفاده از آلیاژهای آلومینیوم و فولاد بسیار مرسوم است. بنابراین در این بخش اثر دو نوع ماده بر رفتار فروریزش محوری نمونه های مخروطی دوجداره تحت اثر بارگذاری محوری بررسی می شود. در این بخش از پژوهش، ابعاد هندسی به صورت اختلاف قطر تحتانی لوله داخلی و خارجی برابر ۲۰ میلیمتر، طول ۱۰۰ میلیمتر، زاویه نیم رأس ۵ درجه، و ضخامت یک میلی متر انتخاب شده است. خصوصیات ماده این نمونه ها در جدول (۴) بیان شده است. شکل (۲۴) منحنی نیرو- جابجایی فروریزش لوله های مخروطی دوجداره فولادی و آلومینیومی تحت اثر بارگذاری محوری شبه استاتیکی را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، روند فروریزش نمونه مخروطی دوجداره آلومینیومی و فولادی بسیار مشابه یکدیگر هستند. اختلاف زیاد بیشینه و کمینه نیروهای فروریزش نمونه مخروطی فولادی نسبت به آلومینیومی به دلیل بالا بودن تنش تسلیم فولاد نسبت به آلومینیوم است، بنابراین برای کماتش لوله دو جداره فولادی نیروی بیشتری نسبت به نمونه دو جداره آلومینیوم لازم است.

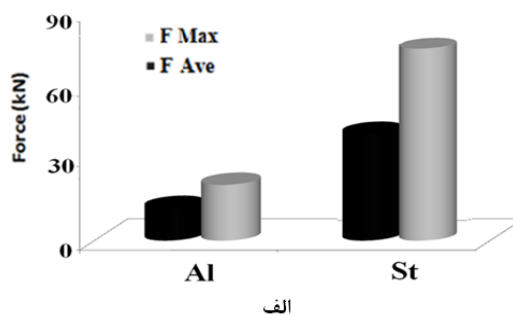
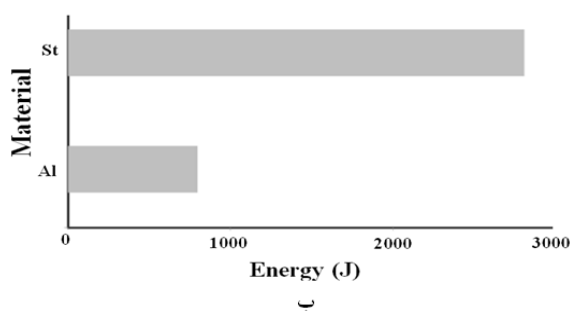
جدول ۴- خصوصیات ماده لوله مخروطی دوجداره آلومینیومی و فولادی

نوع ماده	$\rho$ ( $\frac{Kg}{m^3}$ )	E (GPa)	$\nu$	$\sigma_y$ (MPa)
فولاد	۷۸۰۰	۲۰۷	۰/۳	۳۰۰
آلومینیوم	۲۸۰۰	۵۷/۷	۰/۳	۷۰





شکل ۲۴- منحنی نیرو- جابجایی فروریزش لوله های مخروطی دو جداره فولادی و آلومینیومی تحت اثر بارگذاری محوری شبه‌استاتیکی



شکل ۲۵- اثر نوع ماده بر الف) اولین بیشینه و متوسط نیروی فروریزش و ب) انرژی جذب شده فروریزش لوله های مخروطی دو جداره

شکل (۲۵) نتایج اثر نوع ماده لوله مخروطی دو جداره را بر پارامترهای فروریزش آن نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، اولین بیشینه نیروی فروریزش، متوسط نیروی فروریزش و انرژی جذب شده با افزایش تنش تسلیم ماده افزایش می‌یابد. در پژوهش حاضر، انرژی جذب شده نمونه فولادی بیش از  $\frac{3}{5}$  برابر انرژی جذب شده در نمونه دو جداره آلومینیومی است.

## ۷- جمع بندی و نتیجه گیری

به طور خلاصه، با توجه به نتایج حاصل از آزمون های تجربی و همچنین شبیه سازی های عددی ارایه شده در این پژوهش، می‌توان موارد زیر را بیان کرد:

- میزان افزایش جذب انرژی در نمونه های دوجداره پر شده از فوم نسبت به نمونه های توخالی برای بارگذاری محوری، حدود ۷ درصد است.
- با توجه به چگالی پایین فوم پلی یورتان، میزان افزایش انرژی ویژه جذب در نمونه های دوجداره پر شده از فوم نسبت به نمونه های دوجداره توخالی، حدود ۲ درصد مشاهده شد.

- اختلافی که در نمودار نیرو- جابجایی نمونه‌های دو جداره در دو حالت تجربی و شبیه‌سازی عددی مشاهده می‌شود به دلایل مختلفی از جمله عدم مطابقت دقیق بین شرایط مرزی اعمال شده در آزمایش تجربی و نرم‌افزار المان محدود می‌باشد.
- افزایش اختلاف قطر لوله داخلی و خارجی لوله های مخروطی دو جداره اثر ناچیزی بر اولین بیشینه نیروی فروریزش و متوسط نیروی فروریزش دارد اما باعث افزایش انرژی جذب شده می‌شود.
- انرژی جذب شده تابعی از طول لوله مخروطی دو جداره می‌باشد. نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش طول لوله باعث افزایش انرژی جذب شده، می‌گردد ولی بر متوسط نیروی فروریزش تاثیر چندانی ندارد.
- اولین بیشینه نیرو، متوسط نیروی فروریزش و انرژی جذب شده، تابعی از ضخامت لوله دو جداره مخروطی است. افزایش ضخامت لوله دو جداره مخروطی باعث افزایش اولین بیشینه نیرو، متوسط نیروی فروریزش و در نتیجه افزایش انرژی جذب شده می‌شود.
- اولین بیشینه نیروی فروریزش، متوسط نیروی فروریزش، و انرژی ویژه جذب شده با افزایش تنش تسلیم ماده افزایش می‌یابد. در پژوهش حاضر مشاهده شد که انرژی جذب شده توسط نمونه فولادی بیش از ۳/۵ برابر انرژی جذب شده در نمونه آلومینیومی است.

## مراجع

- [1] Marzbanrad, J., and Ebrahimi, M.R., "Multi-objective Optimization of Aluminum Hollow Tubes for Vehicle Crash Energy Absorption using a Genetic Algorithm and Neural Networks", *Thin-Walled Structures*, Vol. 49, No. 12, pp. 1605-1615, (2011).
- [2] Alavi Nia, A., and Haddad Hamedani, J., "Comparative Analysis of Energy Absorption and Deformations of Thin-Walled Tubes with Various Section Geometries", *Thin-Walled Structures*, Vol. 48, No. 12, pp. 946-954, (2010).
- [3] Marzbanrad, J., Mehdikhanlo, M., and Saeedipour, A., "An Energy Absorption Comparison of Square, Circular, and Elliptic Steel and Aluminum Tubes under Impact Loading", *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, Vol. 33, No. 3, pp. 159-166, (2010).
- [4] Yan, L., Chouw, N., and Jayaraman, K., "Effect of Triggering and Polyurethane Foam-Filler on Axial Crushing of Natural Flax/Epoxy Composite Tubes", *Material and Design*, Vol. 56, pp. 528-541, (2014).
- [5] Arnold, B., and Altenhof, W., "Experimental Observations on the Crush Characteristics of AA6061 T4 and T6 Structural Square Tubes with and without Circular Discontinuities", *International Journal of Crash Worthiness*, Vol. 9, No. 1, pp. 73-87, (2004).
- [6] Cheng, Q., Altenhof, W., and Li, L., "Experimental Investigations on the Crush Behavior of AA6061-T6 Aluminum Square Tubes with Different Types of Through-hole Discontinuities", *Thin-Walled Structures*, Vol. 44, No. 4, pp. 441-454, (2006).

- [7] Tehrani, P.H., and Pirmohammad, S., "Collapse Study of Thin-walled Polygonal Section Columns Subjected to Oblique Loads", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol. 221, No. 7, pp. 801-810, (2007).
- [8] Azarakhsh, S., Rahi, A., and Ghamarian, A., "Experimental and Numerical Investigation of Crushing of Brass Cylindrical Tubes", Journal of Solid and Fluid Mechanics, Vol. 6, No. 2, pp. 181-196, (2016).
- [9] Azarakhsh, S., Rahi, A., Ghamarian, A., and Motamedi, H., "Axial Crushing Analysis of Empty and Foam-filled Brass Bitubular Cylinder Tubes", Thin-Walled Structures, Vol. 95, No. 3, pp. 60-72, (2015).
- [10] Azarakhsh, S., and Ghamarian, A., "Collapse Behavior of Thin-walled Conical Tube Clamped at Both Ends Subjected to Axial and Oblique Loads", Thin-Walled Structures, Vol. 112, pp. 1-11, (2017).
- [11] Zarei, H.R., and Ghamarian, A., "Experimental and Numerical Crashworthiness Investigation of Empty and Foam-Filled Thin-walled Circular Tubes with Shallow Spherical Caps", Experimental Mechanics, Vol. 54, No. 2, pp. 115-126, (2014).
- [12] Rahi, A., "Controlling Energy Absorption Capacity of Combined Bitubular Tubes under Axial Loading", Thin-Walled Structures, Vol. 123, pp. 222-231, (2018).

**Abstract**

To reduce the damage caused by sudden collisions, energy absorbers are used. In the present research, the effect of geometric parameters of bi-tubular conical tubes and effect under axial loading on energy absorption is investigated by experimental and numerical methods. Then, the effect of foam is also studied to absorb more energy. In the experimental section, firstly, conical tubes made of aluminum with empty and filled with polyurethane foam were prepared, and then the samples are experimentally tested and the displacement-force diagram is obtained in each test. In the numerical section, the simulation of the axial deformation phenomenon of the thin-walled conical tubes is carried out with the ABAQUS software.

The comparison of experimental and numerical results show that the proposed model is a suitable method for studying its collapse and amount of energy absorbed in the energy absorber system. Finally, the effect of the main system parameters, such as difference of inner and outer tube diameter, tube length, wall thickness, type of tube material, and the filling of foam, is studied on the energy absorption in thin-walled bi-tubular conical tubes absorber using numerical methods.