

## Study on the Impact of Shape and Double-Walled Structure on Energy Absorption in Thin-Walled Aluminum Tubes

Ali Shahrjerdi<sup>1\*</sup>, Milad Akbari<sup>2</sup>, Iman Jafari<sup>3</sup>

<sup>1</sup> \*Associate Professor, Faculty of Technical Engineering, Malayer University, Malayer, Iran. Email: shahrjerdi@malayeru.ac.ir

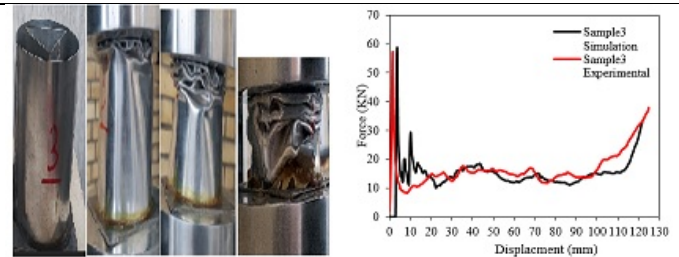
<sup>2</sup> Master's student, Faculty of Technical Engineering, Malayer University, Malayer, Iran Email: akbari.milad20@yahoo.com

<sup>3</sup> Master's student, Faculty of Technical Engineering, Malayer University, Malayer, Iran Email: imanjafari70@yahoo.com

### HIGHLIGHTS

- Investigation of the geometry of double-walled adsorbents
- Comparison of experimental tests and simulation
- Increasing the layer of absorbent pipes has a great impact on the energy absorbed and the force tolerated by the absorber

### GRAPHICAL ABSTRACT



### ARTICLE INFO

#### Article history:

Article Type: Research paper

Received: 26 April 2025

Received in revised form: 29 May 2025

Accepted: 07 June 2025

Available online: 08 July 2025

#### Keywords:

Energy Absorption, Thin-Walled Tube, Aluminum, Experimental Analysis, Static Crushing

### ABSTRACT

To mitigate the damage caused by collisions, energy absorbers are employed. Thin-walled structures, renowned for their energy absorption capabilities, are designed in various configurations. Due to their lightweight, high energy absorption capability, controlled crushing behavior, and superior energy-to-weight ratio, these structures are recognized as one of the best energy absorption systems. In this study, the effect of geometric shape variations in aluminum tubes with circular and triangular double-walled cross-sections on energy absorption and axial loading was investigated. In the experimental section, aluminum thin-walled tubes with circular and triangular double-walled cross-sections were prepared, followed by quasi-static tests under a constant loading rate on the samples, where force-displacement curves were measured in each test. A model was developed to simulate the crushing process using finite element analysis, considering nonlinear material behavior, contact, and large deformations. By comparing the experimental and numerical results, it was determined that the proposed model is suitable for predicting the crushing response and determining the force-displacement curve and absorbed energy. The mechanical properties of the samples and the compressive loading were tested using a servo-hydraulic testing machine manufactured by Santam. This study also examined the impact of double-walling with circular and triangular cross-sections on the energy absorption capacity of aluminum tubes, demonstrating that adding an extra layer significantly increases the absorbed energy and the load-bearing capacity of the absorber.

**Cite this article:** Shahrjerdi A , Akbari M , Jafari I . Study on the Impact of Shape and Double-Walled Structure on Energy Absorption in Thin-Walled Aluminum Tubes. Aerospace Mechanics. 2025; 21(2):67-79. DOI: <https://doi.org/10.47176/MAJ.2025.1490>

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

نویسندگان ©



OPEN ACCESS



## بررسی تأثیر شکل و ساختار دوجداره بر جذب انرژی در لوله‌های جدار نازک آلومینیومی

علی شهرجردی<sup>۱\*</sup>، میلاد اکبری<sup>۲</sup>، ایمان جعفری<sup>۳</sup>

<sup>۱\*</sup> استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر، ایران. رایانامه: shahrjerdi@malayeru.ac.ir

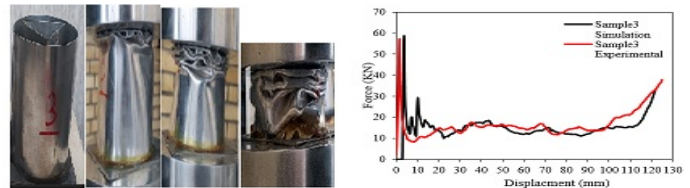
<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر، ایران رایانامه: akbari.milad20@yahoo.com

<sup>۳</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر، ایران رایانامه: imanjafari70@yahoo.com

### برجسته‌ها

- بررسی هندسه جاذب‌های دوجداره
- مقایسه آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی
- افزایش لایه لوله‌های جاذب تأثیر بسیار زیادی بر انرژی جذب شده و نیروی قابل تحمل توسط جاذب دارد

### چکیده گرافیکی



### مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۶

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۰۸

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۷

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۴/۱۷

کلیدواژه‌ها:

جذب انرژی،

لوله‌جدارنازک،

آلومینیوم،

تحلیل تجربی،

لهیدگی استاتیکی

### چکیده

برای کاهش آسیب‌های ناشی از تصادفات، از جاذب‌های انرژی استفاده می‌شود. سازه‌های جدا نازک به‌عنوان یکی از سازه‌های برجسته در جذب انرژی به روش‌های مختلف شناخته شده‌اند. این سازه‌ها به دلیل وزن کم، توانایی جذب انرژی، شکل‌دهیدگی و نسبت بالای جذب انرژی به وزن، به‌عنوان یکی از مؤثرترین سیستم‌های جذب انرژی در نظر گرفته می‌شوند. در این پژوهش، تأثیر تغییر شکل هندسی لوله آلومینیومی ۳۱۰۵ با مقطع دوجداره دایره‌ای و مثلثی بر میزان جذب انرژی و بارگذاری محوری مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله، یک سامانه نوآورانه جذب انرژی برای بهبود ایمنی فرود فضاپیماها در سطح ماه معرفی شده است. این سامانه مبتنی بر سازه‌های جدار نازک چندلایه آلومینیومی با هندسه ترکیبی و رفتار هوشمند طراحی شده است. با الهام از نتایج آزمایش‌های تجربی بر لوله‌های دوجداره، ساختاری سه‌لایه با مقاطع دایره‌ای، مثلثی و هشت‌ضلعی به‌منظور بهینه‌سازی توزیع تنش، جذب انرژی بالا و کاهش جرم ارائه می‌شود. استفاده از پوشش‌های خودترمیم شونده و لایه‌های پیژوالکتریک، این سامانه را قادر می‌سازد تا ضمن جذب بیش از ۹۰٪ انرژی ضربه، بخشی از انرژی را به‌صورت الکتریکی ذخیره کند. نتایج شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌ها بهبود چشم‌گیر عملکرد مکانیکی و کارایی چندمنظوره این ساختار را نشان می‌دهد. در بخش تجربی، لوله‌هایی با مقطع دوجداره دایره‌ای و مثلثی از جنس آلومینیوم جدار نازک تهیه شده و سپس آزمایش‌های شبه استاتیکی با نرخ بارگذاری ثابت بر روی نمونه‌ها انجام گردید. در هر آزمایش، نمودار نیرو برحسب جابه‌جایی اندازه‌گیری شد و نمونه‌های واقعی برای شبیه‌سازی فرایند لهیدگی با استفاده از برنامه آباکوس مدل شدند که در آن اثر رفتار غیرخطی مواد، تماس و تغییر شکل‌های بزرگ لحاظ گردیده است. با مقایسه نتایج تجربی و عددی، مشخص شد که مدل ارائه‌شده برای تعیین پاسخ لهیدگی، نمودار نیرو-جابه‌جایی و میزان انرژی جذب‌شده، مناسب است. همچنین، تأثیر دوجداره کردن با مقاطع دایره‌ای و مثلثی بر ظرفیت جذب انرژی لوله‌های آلومینیومی مورد بررسی قرار گرفت و مشخص گردید که افزایش تعداد لوله‌های جاذب تأثیر زیادی بر میزان انرژی جذب‌شده و نیروی قابل تحمل توسط جاذب‌ها دارد.

استاد: شهرجردی علی. اکبری میلاد. جعفری ایمان. بررسی تأثیر شکل و ساختار دو جداره بر جذب انرژی در لوله‌های جدارنازک آلومینیومی. مکانیک

هوافضا. مکانیک هوافضا. (۱۴۰۴) ۲۱(۲): ۶۷-۷۹. DOI: <https://doi.org/10.47176/MAJ.2025.1490>

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)



نویسندگان ©

## ۱- مقدمه

امروزه، سیستم‌های جذب انرژی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مولفه‌ها در بهبود ایمنی وسایل نقلیه و کاهش صدمات انسانی و مادی ناشی از تصادفات شناخته می‌شوند. این سیستم‌ها با طراحی مهندسی شده، فرود ایمن در سطح ماه با توجه به خلأ جو، ناهمواری‌های سطحی و نبود سیستم‌های ترمزی مبتنی بر مقاومت هوا، نیازمند طراحی پیشرفته جاذب‌های انرژی است. سازه‌های جدار نازک، به دلیل نسبت بالای استحکام به وزن و رفتار مناسب در لهیدگی کنترل شده، گزینه‌ای ایده‌آل برای جذب انرژی ضربه محسوب می‌شوند. این پژوهش با ترکیب طراحی هندسی بهینه، مواد سبک‌وزن و فناوری‌های هوشمند، راهکاری نوین برای چالش‌های سامانه‌های فرود ارائه می‌دهد. انرژی جنبشی حاصل از برخورد را به‌طور کامل یا جزئی به سایر اشکال انرژی، نظیر انرژی حرارتی یا تغییر شکل پلاستیک، تبدیل می‌کنند. بسته به نوع طراحی، تبدیل انرژی ممکن است بازگشت‌پذیر یا غیرقابل‌بازگشت باشد. در سیستم‌های جذب انرژی غیرقابل‌بازگشت، تغییر شکل پلاستیک دائمی باعث کاهش شدت ضربات وارده به سرنشینان و جلوگیری از آسیب‌های جدی به ساختار خودرو می‌شود که نقش کلیدی در افزایش ایمنی جاده‌ای ایفا می‌کند [۱]. افزایش نگرانی‌ها درباره ایمنی جاده‌ای و ضرورت کاهش صدمات جانی و مالی ناشی از تصادفات، موجب شده است که تلاش‌های گسترده‌ای برای توسعه و بهبود مواد و ساختارهای جاذب انرژی انجام شود. اجزای جاذب انرژی در خودروهای مدرن، مانند سپرها، ستون‌ها و سازه‌های داخلی، به استاندارد برای حفاظت از سرنشینان و عابران پیاده تبدیل شده‌اند. این اجزا از طریق تغییر شکل کنترل شده، انرژی ناشی از تغییرات ناگهانی سرعت در تصادفات را جذب می‌کنند و به حفظ جان افراد کمک می‌نمایند [۲].

در میان انواع سازه‌های جاذب انرژی، لوله‌های جدار نازک به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد خود، از جمله وزن سبک، هزینه تولید پایین، و توانایی جذب انرژی بالا، به‌طور گسترده در صنایع خودرو، هوافضا و ساختمان‌سازی استفاده می‌شوند. این لوله‌ها در شکل‌های هندسی مختلف مانند دایره‌ای، مربعی، مستطیلی و مخروطی طراحی می‌شوند و هر یک خصوصیات ویژه‌ای در نحوه جذب و توزیع

انرژی دارند. به‌عنوان مثال، مقاطع دایره‌ای به دلیل تقارن بیشتر در برابر بارهای محوری و شعاعی، عملکرد بهتری در جذب انرژی یکنواخت نشان می‌دهند، در حالی که مقاطع مربعی یا مستطیلی در برابر بارگذاری‌های خاص، قابلیت جذب انرژی بهینه‌تری دارند [۲]. تحقیقات فراوانی به بررسی عوامل موثر بر عملکرد مکانیکی و ظرفیت جذب انرژی لوله‌های جدار نازک اختصاص یافته است. این عوامل شامل جنس مواد، ضخامت جداره، شکل هندسی مقطع، نوع بارگذاری و شرایط مرزی می‌شوند. یافته‌ها حاکی از آن است که اصلاح این عوامل می‌تواند به بهبود قابل توجه کارایی لوله‌ها در جذب انرژی منجر شود [۳]. برای مثال، افزودن تقویت‌کننده‌های داخلی، ترکیبات جدید مواد و استفاده از فناوری‌های پیشرفته ساخت، امکان بهبود ظرفیت جذب انرژی را فراهم می‌کند. ساینی و همکاران [۴]، به بررسی رفتار نیروی محوری و جذب انرژی سازه‌های لوله‌ای جدار نازک تحت شرایط بارگذاری استاتیک و دینامیک پرداخته است. در این مطالعه، روش‌های انتخاب مواد مناسب و طراحی هندسی برای بهبود ایمنی سرنشینان و کاهش مصرف سوخت مورد بحث قرار گرفته است. همچنین، این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از این دستگاه‌های جذب انرژی می‌تواند به کاهش تغییر شکل‌های ساختاری و در نتیجه کاهش آسیب به قاب اصلی خودرو کمک کند. رن‌رنگ و همکاران [۵]، تأثیر استفاده از لوله‌های فومی پر شده با آلومینیوم در جعبه‌های ضربه‌گیر و همچنین تأثیر تغییرات مقطع عرضی این لوله‌ها بر عملکرد جذب انرژی مورد بررسی قرار دادند. پژوهش ذکر شده از نوع شبیه‌سازی عددی و تجربی بوده و در آن نمونه‌های آزمایشی شامل لوله‌های تک جداره، لوله‌های تک جداره پر شده با فوم، و لوله‌های دوجداره پر شده با فوم که در چهار ضخامت مختلف تغییر یافته بود، مورد بررسی قرار گرفتند. تمامی مدل‌ها با داده‌های تجربی از منابع معتبر مورد اعتبارسنجی قرار گرفتند و نتایج نشان‌دهنده همخوانی خوب بین شبیه‌سازی و نتایج تجربی بود. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که ساختار جعبه ضربه‌گیر آلومینیومی که با فوم آلومینیومی پر شده است، قادر به جذب انرژی بیشتری است و ضخامت پیشنهادی نباید خیلی نازک یا خیلی ضخیم باشد.

مطالعات مختلفی به بررسی رفتار مکانیکی و ظرفیت جذب انرژی لوله‌های جدار نازک تحت بارگذاری محوری

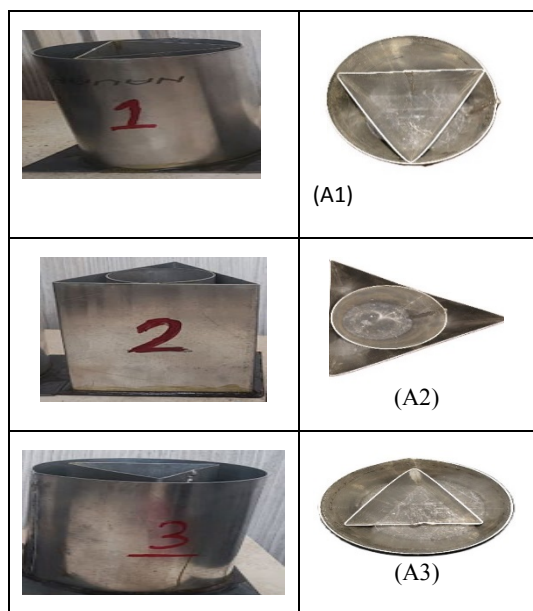
اجزای محدود مقایسه شدند. نتایج نشان دادند که افزایش تعداد حفره‌ها باعث کاهش نیروی بیشینه و جذب انرژی می‌شود، همچنین با کاهش حفره‌ها، مودهای خرابی از حالت نامتقارن به متقارن تغییر می‌کنند. ویرزبیک و آبرامویچ [۱۸]، برخورد سازه‌های جدار نازک چندضلعی مربوط به اجزای صفحات را با توجه به لوله‌های پلاستیک ثابت و نواحی باریک، کشش محیط‌های دایروی و خمش موجود در سازه‌ها مورد تحلیل قرار دادند، نتایج نشان داد که جذب انرژی در ستون‌های با مقطع شش‌گوش بیشتر از ستون با مقطع چهارگوش است. در ادامه آبرامویچ و جونز [۱۹]، نیروی برخورد استاتیکی را برای فروریزش محوری لوله مربعی را مورد بررسی دقیق قرار دادند و توانستند نیروی متوسط لهیدگی را محاسبه کنند و علاوه بر آن یک مدلپیش‌بینی نیروی محوری متوسط سلول لانه‌زنبوری (سازه شش‌ضلعی) بر اساس کار پلاستیک مستهلک‌شده در خمش و کشش ارائه دهند.

با توجه به اهمیت جاذب‌های انرژی در مطالعه حاضر، نحوه لهیدگی و مقدار جذب انرژی لوله‌های استوانه‌ای دوجداره با سطح مقطع دایره‌ای و مثلثی 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 انجام‌شده است. مطالعه تجربی و عددی قابلیت جذب انرژی مقدار نیروی متوسط، نحوه تغییرشکل سازه‌ها و همچنین تأثیر پارامترهای مؤثر بر عملکرد این سازه‌ها، از مهم‌ترین شاخصه‌های مورد بررسی در این پژوهش هستند

جدول ۱: ابعاد و اندازه‌ها برای تولید نمونه‌ها

نام نمونه	قطر دایره (میلی‌متر)	ضلع مثلث (میلی‌متر)	ضخامت (میلی‌متر)	ارتفاع (میلی‌متر)
A1	۹۵	۸۰	۱	۱۵۰
A2	۶۵	۱۲۲	۱	۱۵۰
A3	۱۱۵	۸۰	۱	۱۵۰

پرداخته‌اند و نشان داده‌اند که پارامترهای هندسی، جنس مواد، و تقویت‌های داخلی می‌توانند تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد این سازه‌ها داشته باشند. رید و همکاران [۶]، با تحلیل لوله‌های جدار نازک با مقاطع مستطیلی و مربعی، نشان دادند که تقویت این لوله‌ها با فوم موجب افزایش جذب انرژی و تقارن در چین‌خوردگی می‌شود. سیتزبرگر و همکاران [۷]، نیز با بررسی تجربی لوله‌های مربعی و دایره‌ای تقویت‌شده با فوم فلزی آلومینیومی دریافتند که استفاده از فوم علاوه بر کاهش فاصله چین‌ها، بهبود چشمگیری در جذب انرژی سازه‌ها ایجاد می‌کند. در ادامه، ژانگ و همکاران [۸]، لوله‌های دوجداره پر شده با فوم را به‌صورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار دادند و تأثیر هندسه مقاطع مختلف بر جذب انرژی را تحلیل کردند. صالح غفاری و همکاران [۹]، نیز نشان دادند که ایجاد شیار طولی در لوله‌های استوانه‌ای باعث کاهش نیروی الاستیک و نیروی برخورد می‌شود. به‌طور مشابه، علوی نیا و همدانی [۱۰]، در بررسی هندسه‌های متنوع مقاطع از جمله دایره، مربع، مستطیل، و شش‌ضلعی به این نتیجه رسیدند که مقطع دایره‌ای بهترین عملکرد را از نظر جذب انرژی و نیروی متوسط لهیدگی دارد. همچنین، علوی نیا و همکاران [۱۱]، با استفاده از شبیه‌سازی عددی دریافتند که فاصله بهینه بین لوله‌های دوجداره می‌تواند جذب انرژی را به حداکثر برساند. در سال‌های اخیر پژوهش‌های زیادی [۱۲-۱۵] در این زمینه انجام‌شده است که از جمله آن مگلیرو [۱۶]، یک سیستم ترکیبی شامل لوله‌های آلیاژی AA6061-T6 و AA6061-T4 با بارگذاری هیبریدی برش‌گیره و فشرده‌سازی فوم PVC در چگالی‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از آزمایش‌های شبه استاتیکی، شبیه‌سازی اجزای محدود و مدل‌سازی نشان داد که این سیستم ترکیبی، با حفظ مکانیزم‌های فروریزش پایدار و عدم حساسیت به تفاوت خواص مواد، عملکرد انرژی جذب بهتری نسبت به روش‌های رایج لهیدگی محوری ارائه می‌دهد. این سیستم، با بهبود ظرفیت جذب انرژی تا ۱۴٪ و بازده نیروی فشاری تا ۴۴٪، نویدبخش جایگزینی موثر برای سیستم‌های ایمنی سبک‌وزن متداول است. حسن‌زاده و همکارانش [۱۷]، به بررسی تجربی و عددی رفتار لهیدگی و کمانش پوسته‌های مخروطی ناقص با یا بدون حفره‌ها تحت بارگذاری محوری پرداختند. آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه Instron8802 انجام و نتایج شبیه‌سازی با نرم‌افزار



شکل ۲: لوله‌های دو جداره از جنس آلومینیوم ۳۱۰۵

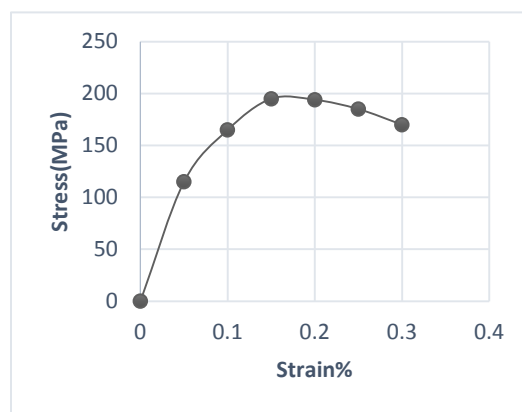
در این پژوهش، ورق آلومینیوم ۳۱۰۵ با دستگاه وایرکات برش داده شده و سپس با دستگاه خم و نورد، اشکال مثلثی و دایره‌ای مورد نظر آماده شده و جوشکاری‌های لازم به روش جوش آرگون انجام شده است. برای مقید کردن قاعده پایینی نمونه‌ها از شرط تکیه‌گاهی یکسر گیردار استفاده می‌شود. برای برقراری این شرط، از قطعه‌ای فولادی که با چسب آهن مخصوص و قوی به صفحه فولادی متصل گردیده به‌عنوان تکیه‌گاه استفاده شده است. این قطعه به‌گونه‌ای ثابت شده که از حرکت افقی و عمودی قاعده پایینی پوسته‌ها در طی فرایند لهیدگی جلوگیری می‌کند. نمونه‌های دو جداره بین دو فک دستگاه تست سنتام SAF-50 که در شکل ۳ نمایش داده شده، قرار گرفته و با حرکت محوری فک متحرک به سمت فک ثابت، نمونه دچار تغییر شکل می‌شود و نمودار نیرو - جابه‌جایی در حین تغییر شکل توسط نرم‌افزار دستگاه استخراج می‌شود. در این آزمایش‌ها، سرعت بارگذاری ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه و مسافتی که فک طی می‌کند ۱۳۰ میلی‌متر، معادل ۹۰٪ ارتفاع اولیه نمونه‌ها، انتخاب شده است.

جدول ۲: خواص مکانیکی نمونه‌ها

مدول الاستیسیته (GPa)	استحکام نهایی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	ضریب پواسون
۶۹	۱۹۵	۱۱۵	۰/۳۳

## ۲- آزمون تجربی

برای انجام آزمایش‌های تجربی سه نوع از لوله‌های استوانه‌ای دو جداره با سطح مقطع دایره‌ای و مثلثی از ورق آلومینیوم ۳۱۰۵ با ضخامت ۱ میلی‌متر استفاده شده است، عنصر آلیاژی اصلی گروه ۳۰۰۰ منگنز است که در آلیاژ ۳۱۰۵ حدود ۰/۳ تا ۰/۸ درصد از ترکیب آلیاژ را تشکیل می‌دهد. در شکل ۲، نمونه‌ها به‌طور واضح نشان داده شده‌اند. همچنین، در جدول ۱ مشخصات هندسی این سه نمونه ارائه شده است. به‌منظور ساده شدن شرایط، برای هر نمونه یک کد (مطابق جدول ۱) تعریف شده است که بانام‌های A3, A2, A1 مشخص شده است. در جدول ۲، خواص مکانیکی برای نمونه‌ها نشان داده شده است. آزمایش‌های تعیین خواص مکانیکی نمونه‌ها و اعمال بارگذاری فشاری بر روی آن‌ها با استفاده از دستگاه آزمایش سرو هیدرولیک ساخت شرکت سنتام (شکل ۳) انجام شده است.



شکل ۱.. نمودار تنش- کرنش آلومینیوم ۳۱۰۵

و قادر به مدل‌سازی انواع مختلف مواد است. در این شبیه‌سازی، با توجه به لهیدگی شبه‌استاتیک، از پلاستیسیته غیرحساس به نرخ کرنش (حلگر explicit) با تنظیمات پیش‌فرض آباکوس برای ماده آلومینیومی استفاده شده است. تنش حقیقی و کرنش پلاستیک از روابط زیر حاصل می‌شوند:

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

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

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

که  $\sigma_{tru}$  و  $\varepsilon_{tru}$  به ترتیب تنش و کرنش حقیقی،  $\sigma_{eng}$  و  $\varepsilon_{eng}$  به ترتیب تنش و کرنش مهندسی،  $\varepsilon_{pl}$  کرنش پلاستیک  $\sigma_y$  تنش تسلیم و  $E$  مدول الاستیسیته است. برای جلوگیری از نفوذ نقاط مختلف لوله دوجداره به داخل قطعات صلب و تعریف شرایط لغزش نمونه بر روی سطوح صلب نیاز است، در قسمت تعریف برهم‌کنش یا تعریف تماس بین سطح به سطح ایجاد شده است. شرایط اصطکاک در نیرو برای نمونه‌های سه‌گانه:

Type: genral contact (explicit)

Step: Step-1(dynamic, explicit)

و برای صفحه صلب (محل اعمال نیرو) به صورت زیر تعریف شده،

Type: Surface-to-surface contact(explicit)

Step: Step-1(dynamic, explicit)

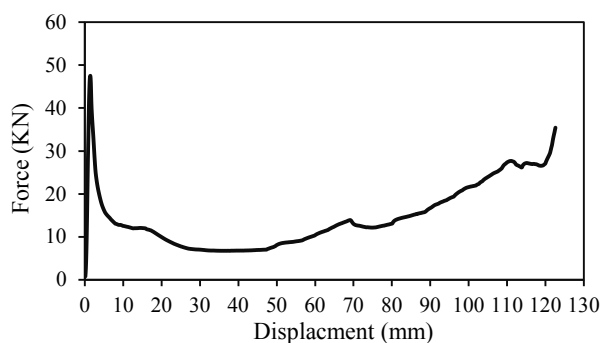
مقدار ضریب اصطکاک برای این نوع تماس  $0.3$  در نظر گرفته شده است. همچنین، به منظور عدم نفوذ صفحات تماس در یکدیگر به صورت پیش‌فرض تماس سخت تعریف شده، علاوه بر این تماس ممکن است در اثر نزدیک شدن نقاط واقع در یک سطح ایجاد شود که باید از نفوذ نقاط در داخل جسم در محل برخورد نقاط جلوگیری شود. در این شبیه‌سازی، به طور مجزا، احتمال تماس سطوح بیرونی و داخلی پوسته مثلثی با خودش پیش‌بینی شده است. در این تحقیق، فرض می‌شود ضریب اصطکاک برای این نوع تماس صفر است. هرکدام از صفحات صلب بالایی و پایینی دارای شش درجه آزادی شامل سه مؤلفه جابه‌جایی و سه مؤلفه دوران هستند. در تحلیل لهیدگی پوسته دوجداره، سطح صلب پایینی به فک ثابت دستگاه متصل است. درجات آزادی آن مقید می‌شود. از طرف دیگر، سطح صلب بالایی به فک متحرک متصل است که کلیه درجات آزادی آن غیر از جابه‌جایی در راستای محور پوسته مقید



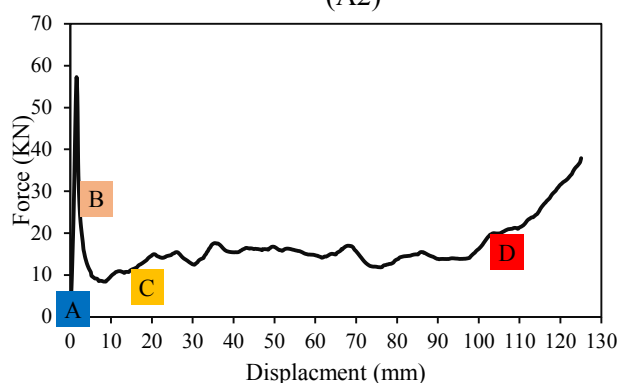
شکل ۳. دستگاه تست سنتام SAF-50

### ۳- شبیه‌سازی عددی

شبیه‌سازی عددی فروریزش لوله‌های دوجداره در نرم‌افزار غیرخطی آباکوس با نسخه ۲۰۲۱ و روش حل صریح برای شبیه‌سازی انتخاب شده است. برای مدل‌سازی دستگاه تست فشار، فقط فک بالا و پایین مدل شدند و نمونه نیز پس از مدل شدن در ماژول چیدمان قطعات، بین آن‌ها قرار گرفته است. فک بالا با جسم صلب ایجاد شدند و قسمت پایین قطعه که در آزمایشگاه به صفحه فولادی چسب شده بود در ماژول لود به طور کامل ثابت شده است. این قید به کاربر اجازه می‌دهد تا حرکت نواحی یک مدل را نسبت به حرکت یک نقطه مقید کند. همچنین، نمونه‌ها به صورت پوسته در ماژول قطعات ایجاد شدند. در لهیدگی پوسته دوجداره یکسر گیردار فرض می‌شود که سطح قاعده پایین نمونه‌ها گیردار است؛ لذا، برای مقید کردن قاعده پایین پوسته دوجداره به قابلیت بدون جابه‌جایی استفاده شده است. این قید به کاربر اجازه می‌دهد تا دو ناحیه با مش‌های متفاوت را با یکدیگر ترکیب کند به طوری که درجات آزادی، سطح پیرو توسط درجات آزادی سطح پایه مقید می‌شود. در این شبیه‌سازی، درجات آزادی تمامی گره‌هایی از پوسته دایره‌ای که با صفحه صلب پایینی در تماس هستند، نسبت به آن ثابت می‌شوند. نرم‌افزار المان محدود آباکوس برای مدل‌سازی رفتار پلاستیک مواد، چندین مدل در اختیار دارد

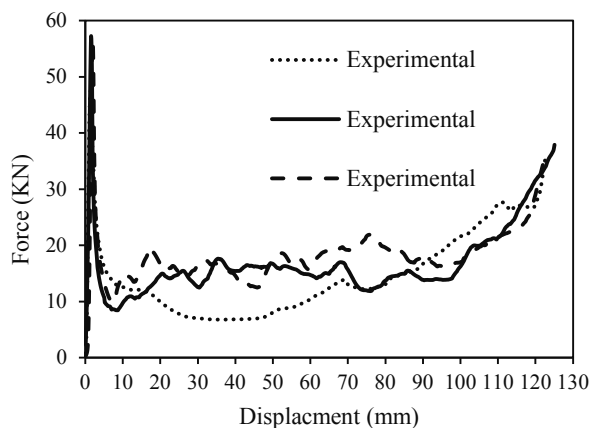


شکل ۶: نمودار نیرو-جابجایی لهیدگی محوری نمونه‌ی (A2)



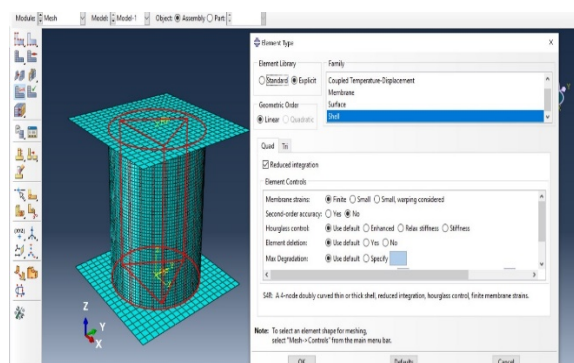
شکل ۷: نمودار نیرو-جابجایی لهیدگی محوری نمونه‌ی (A3)

همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود، در نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌ها به ترتیب چند بیشینه نیرو دیده می‌شود. نکته قابل توجه این است که بیش‌ترین نیروی لهیدگی و انرژی جذب‌شده نمونه (A1) بسیار نزدیک به (A3) است و نمونه (A2) جذب انرژی کم‌تری از خود نشان می‌دهد. در مدت‌زمانی بیش‌تر مقاومت استاتیکی نمونه (A1) که بیش‌تر از نمونه (A3) و (A2) است.



شکل ۸. مقایسه نمودار نیرو-جابجایی لهیدگی نمونه‌ها

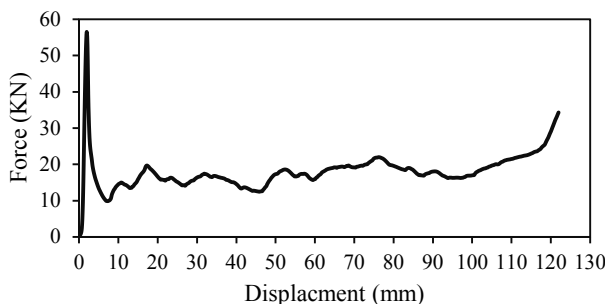
شده است. برای مدل کردن پوسته‌ها از المان پوسته (elements shell) با نام R4S استفاده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود برای استقلال حل عددی شبیه‌سازی، از چندین مش بندی انجام شد تا اندازه و نوع مش مناسب (سایز ۸ میلی‌متر، تعداد ۱۸۵۰ و المان مربعی (quadrilateral element) که منجر به همگرایی بهتر جواب می‌شود مشخص شود. این تحلیل با استفاده از سیستم لپ‌تاپ ASUS با پردازنده Core i5 و در مدت‌زمان حدود ۲۵ تا ۳۰ دقیقه انجام شد.



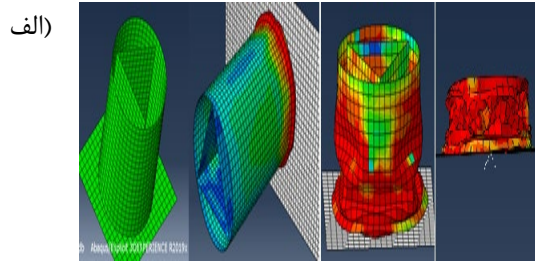
شکل ۴: نوع مش بندی نمونه A3

#### ۴- بحث و نتیجه‌گیری

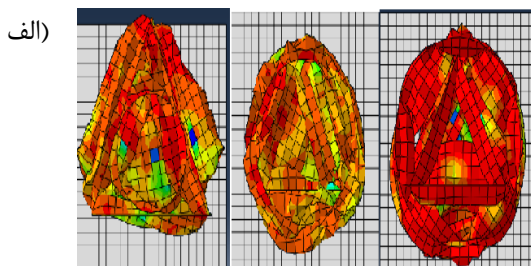
نمودار نیرو-جابجایی لهیدگی نمونه‌ها در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ نشان داده شده است. نیرو در ابتدای جابه‌جایی فک متحرک به‌طور چشمگیری افزایش یافته است که ناشی از رفتار الاستیک نمونه دو جداره تحت اثر بار فشاری، قبل از آغاز کمانش است. سپس نیرو با تشکیل چین خارجی کاهش می‌یابد. در لهیدگی‌های غیرمقارن محوری، پایداری نمونه پس از تشکیل چین خارجی کم‌تر می‌شود. بنابراین، در زمان تشکیل چین داخلی نیروی کم‌تری نسبت به لهیدگی‌های مقارن محوری نیاز است.



شکل ۵: نمودار نیرو-جابجایی لهیدگی محوری نمونه‌ی (A1)



شکل ۹. مراحل لهیدگی محوری پوسته دوجداره دایره‌ای و مثلثی A3



شکل ۱۰: تصاویر له شده هر سه نمونه از نمای بالا (الف) شبیه‌سازی (ب) تجربی

## ۴-۱ بررسی و تحلیل گزارشات آزمایش و شبیه‌سازی

### ۴-۱-۱ رفتار الاستیک و آغاز کمانش

در ابتدای فرایند لهیدگی، افزایش چشمگیر نیرو نشان‌دهنده رفتار الاستیک لوله‌های دوجداره است. این افزایش نیرو تا نقطه‌ای ادامه می‌یابد که نمونه شروع به کمانش کند. این رفتار کاملاً مطابق با انتظارات تئوری برای سازه‌های جدار نازک تحت بار فشاری است.

جدول ۳. نتایج تجربی لهیدگی نمونه‌ها شامل مقدار اولین بیشینه نیرو، متوسط نیروی فروریزش و انرژی جذب‌شده را نشان می‌دهد یکی از پارامترهای بسیار مهم در ضربه گیرها، افزایش بیشینه نیرو در منحنی‌های نیرو-جابجایی است در صورتی که این بیشینه نیروها افزایش چشم‌گیری داشته باشند باعث صدمه زدن به سلامت سرنشینان یا حسگرهای متصل به ضربه گیر می‌شود. بنابراین، گاهی لازم است این نیرو به شیوه‌های مختلفی از جمله وجود شیار و یا عیوبی مانند برش سطح مقطع ضربه‌گیر کاهش یابد در این مطالعه، ترکیب سازه‌های جدار نازک با یکدیگر نیز عاملی برای کاهش بیشینه نیروی اولیه محسوب می‌شود. به طوری که بیشینه نیروی لهیدگی نمونه دوجداره مطابق جدول ۳ است. بنابر این استفاده از ترکیب لوله‌های دوجداره A2 برای کاهش شوک پیشنهاد می‌شود.

جدول ۳: نتایج تجربی لهیدگی نمونه‌ها

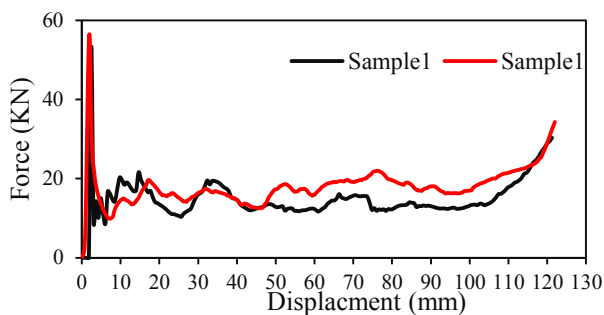
نمونه	اولین بیشینه نیرو (KN)	انرژی جذب‌شده (KJ)	متوسط نیروی لهیدگی (KN)
A1	۵۶/۶۲	۲۰۲۴	۳۳/۳۰
A2	۴۷/۵۱	۲۰۶۷	۳۳/۳۸
A3	۵۷/۲۷	۲۲۹۲	۳۶/۶۷

شکل ۹، هندسه پوسته دوجداره را نشان می‌دهد. مدل سه‌بعدی نیز برای لهیدگی پوسته‌های دوجداره در نظر گرفته شده است. و همچنین مراحل لهیدگی پوسته دوجداره نمونه A3 را تحت اثر بارگذاری شبه استاتیکی در شبیه‌سازی و آزمایشگاه را نشان می‌دهد. که مراحل لهیدگی، روی نمودار مربوط به نمونه A3 در شکل ۹ به ترتیب از راست به چپ با حروف A, B, C, D مشخص شده در شکل ۱۰، لهیدگی نمونه‌ها را در حالت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نحوه لهیدگی هر سه نمونه در حالت شبیه‌سازی و تجربی مشابه است. در حین لهیدگی پوسته دوجداره، به دلیل فاصله اندک بین پوسته‌های داخلی و خارجی، پوسته خارجی در بین چین‌های پوسته داخلی (سطح مقطع کوچک) نفوذ می‌کند

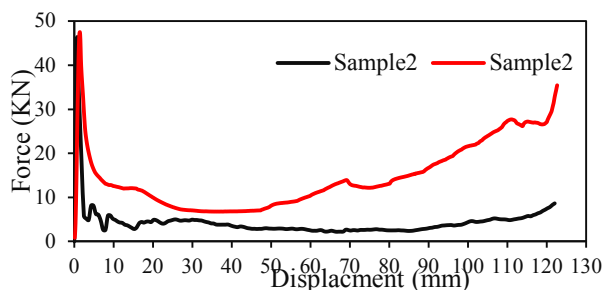
- برای درک بهتر رفتار لوله‌های دوجداره تحت بارهای دینامیکی، انجام آزمایش‌های ضربه‌ای با سرعت‌های مختلف پیشنهاد می‌شود. بررسی تأثیر پارامترهای هندسی مانند ضخامت دیواره، نسبت ابعاد و شکل مقطع بر روی عملکرد جذب انرژی نیز می‌تواند موضوع تحقیقات آینده باشد. استفاده از مواد کامپوزیتی یا ترکیبی در ساخت لوله‌های دوجداره نیز می‌تواند به بهبود عملکرد جذب انرژی و کاهش وزن سازه کمک کند.

#### ۴-۲. مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی

در این بخش، جهت اطمینان از صحت مدل‌سازی عددی، نتایج عددی و آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه می‌شود تا از عملکرد روش عددی اطمینان حاصل شود. در شکل ۹، ۱۰ و ۱۱ نمودار نیرو-جابجایی فروریزش نمونه‌های دوجداره را بر اساس نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، روند تغییر نیرو شبیه‌سازی نیز در هر سه نمودار مشابه آزمون تجربی است.



شکل ۱۱: نمودار نیرو-جابجایی فروریزش نمونه A1 را بر اساس نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی



شکل ۱۲: نمودار نیرو-جابجایی فروریزش نمونه A2 را بر اساس نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی

پس از آغاز کمانش، تشکیل چین خارجی باعث کاهش نیرو می‌شود، این کاهش نیرو نشان‌دهنده تغییر حالت از رفتار الاستیک به پلاستیک و شروع فرایند تغییر شکل دائمی در نمونه است.

#### ۴-۱-۲ تأثیر تقارن در لهیدگی

در لهیدگی‌های غیرمتقارن، پایداری نمونه پس از تشکیل چین خارجی کاهش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که توزیع نامتقارن بار باعث ایجاد تمرکز تنش در نقاط خاصی از سازه می‌شود و در نتیجه، نمونه به نیروی کمتری برای تشکیل چین داخلی نیاز دارد.

این یافته اهمیت طراحی تقارن در سازه‌های جذب انرژی را برجسته می‌کند. در کاربردهای عملی، مانند ضربه‌گیرها، طراحی متقارن می‌تواند به بهبود پایداری و عملکرد سازه کمک کند.

#### ۴-۱-۳ بیشینه نیرو و انرژی جذب‌شده

جدول ۳ نشان می‌دهد که بیشینه نیروی اولیه و انرژی جذب‌شده در نمونه‌های دوجداره به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر طراحی مقطع (دایره‌ای یا مثلثی) و ترکیب لوله‌ها قرار دارد.

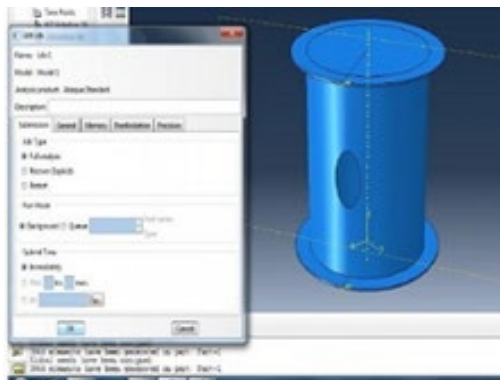
افزایش بیشینه نیرو در منحنی‌های نیرو-جابجایی می‌تواند برای سلامت سرنشینان یا حسگرها مضر باشد. بنابراین، کنترل این پارامتر از طریق طراحی مناسب مانند ایجاد شیار یا عیوب کنترل‌شده ضروری است.

ترکیب لوله‌های دوجداره مانند نمونه A2 به‌عنوان راه‌حل مؤثر برای کاهش بیشینه نیرو و بهبود عملکرد ضربه‌گیر پیشنهاد شده است. این ترکیب نه تنها بیشینه نیرو را کاهش می‌دهد، بلکه انرژی جذب‌شده را نیز بهینه می‌کند.

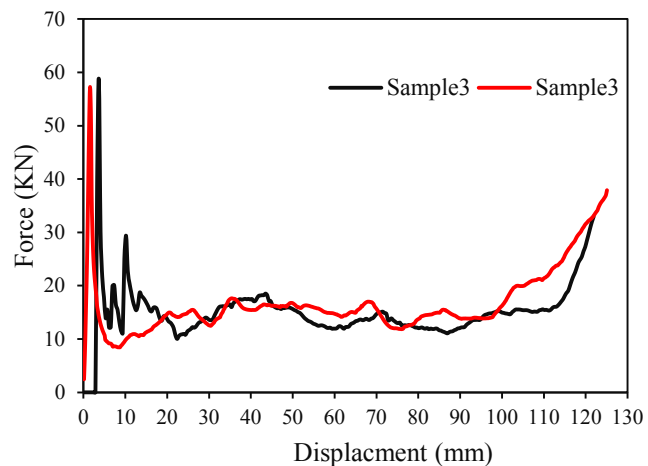
#### ۴-۱-۴ کاربردهای عملی

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که لوله‌های دوجداره با مقطع دایره‌ای یا مثلثی می‌توانند به‌عنوان جاذب‌های انرژی کارآمد در سیستم‌های ضربه‌گیر استفاده شوند. با این حال، طراحی این سازه‌ها باید به‌گونه‌ای باشد که بیشینه نیرو را کنترل کرده و از آسیب به اجزای حساس جلوگیری کند. استفاده از ترکیب لوله‌های دوجداره مانند A2 می‌تواند به کاهش شوک و بهبود ایمنی در کاربردهای مختلف، از جمله صنعت خودرو و هوافضا، کمک کند.

#### ۴-۱-۵ پیشنهادات برای تحقیقات آینده



شکل ۱۴: شبیه‌سازی ایجاد سوراخ در نمونه A3



شکل ۱۳: نمودار نیرو- جابه‌جایی فروریزش نمونه A3 را بر اساس نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی

### نوآوری‌های کلیدی

- طراحی جاذب‌های انرژی چندلایه با هندسه ترکیبی
- ساختار سه‌لایه متشکل از مقاطع دایره‌ای (خارجی)، مثلثی (میانی) و هشت‌ضلعی (داخلی) برای بهینه‌سازی توزیع تنش و بهبود مقاومت در برابر کماتش.
- استفاده از آلیاژ آلومینیوم-لیتیوم به‌عنوان ماده پایه، به دلیل چگالی کم، مقاومت بالا و عملکرد مطلوب در محیط خلأ.
- اعمال پوشش نانوکامپوزیتی خودترمیم‌شونده حاوی میکروکپسول‌های پلیمری برای ترمیم ترک‌های ناشی از ضربه‌های مکرر.
- سامانه هیبریدی جذب و ذخیره انرژی
- قرارگیری لایه‌های پیزوالکتریک در بین دیواره‌ها برای تبدیل انرژی مکانیکی ضربه به الکتریسیته.
- ذخیره‌سازی انرژی تولیدشده در ابرخازن‌های کوچک تعبیه‌شده در ساختار داخلی لوله‌ها جهت استفاده اضطراری پس از فرود.
- بهینه‌سازی عملکرد با الگوریتم‌های یادگیری ماشین
- استفاده از داده‌های تجربی و نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود (FEM) برای آموزش مدل‌های پیش‌بینی رفتار نیرو- جابه‌جایی.
- پیاده‌سازی الگوریتم‌های تطبیقی جهت تنظیم پارامترهای ساختار بر اساس شرایط متغیر فرود (مانند سرعت برخورد و زاویه تماس).

### تحلیل رفتار دینامیکی

### ۵- کنترل لهیدگی با تحلیل و شبیه‌سازی

پس از تأیید قابلیت اطمینان نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها، این تحقیق با هدف توسعه و تعمیق یافته‌ها، به بررسی رفتار جذب انرژی لوله‌های دوجداره با سطح مقطع دایره‌ای پرداخته است. در این مرحله، با ایجاد سوراخ‌های کنترل‌شده در بدنه‌ی استوانه‌ای نمونه‌ی A3 (شکل ۱۴)، تأثیر این تغییرات بر لهیدگی و جذب انرژی نمونه‌ها مورد تحلیل قرار گرفته است. این پژوهش به دنبال ارائه‌ی راهکارهایی برای بهبود طراحی لوله‌های دوجداره با هدف افزایش مقاومت و کارایی آن‌ها در کاربردهای مهندسی، به ویژه در شرایطی که جذب انرژی و کنترل لهیدگی اهمیت بالایی دارد، است.

بررسی‌های اولیه نشان می‌دهد که ایجاد سوراخ‌های کنترل‌شده در بدنه‌ی استوانه‌ای لوله‌های دوجداره می‌تواند بر روند لهیدگی و میزان جذب انرژی تأثیر بگذارد. این تغییرات می‌تواند منجر به بهبود عملکرد سازه در شرایط بارگذاری فشاری شود. به‌طور خاص، سوراخ‌ها باعث ایجاد تمرکز تنش در مناطق مشخصی شده و فرایند لهیدگی را به‌صورت کنترل‌شده‌تری هدایت می‌کنند. به‌طوری‌که شوک اولیه را کاهش داده و میزان جذب انرژی را در حد نمونه‌های قبلی حفظ کرده است.

جذب مؤثر انرژی ضربه است، بلکه با استفاده از فناوری‌های نوین، امکان ذخیره و بهره‌برداری از انرژی تولیدشده را نیز فراهم می‌آورد. آزمون‌های آتی در محیط شبیه‌سازی شده کم‌گران‌ش و توسعه نمونه‌های چاپ‌شده در مقیاس واقعی پیشنهاد می‌گردد

## ۶- نتیجه‌گیری

این پژوهش به تحلیل عملکرد لوله‌های دوجداره با سطح مقطع‌های دایره‌ای و مثلثی تحت بارگذاری محوری پرداخته و به بررسی دو جنبه اصلی یعنی رفتار لهدیگی و ظرفیت جذب انرژی این سازه‌ها تمرکز داشته است. نتایج این مطالعه به شرح زیر است:

۱- نتایج تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی نشان داد که ترکیب لوله‌های دوجداره می‌تواند به بهبود کارایی جذب انرژی و کاهش شوک وارده در سیستم‌های ایمنی خودرو کمک کند.

۲- هر سه نمونه مورد بررسی دارای رفتار مشابهی در لهدیگی بودند و نتایج شبیه‌سازی به‌خوبی با نتایج تجربی مطابقت داشت. در بررسی نتایج، مشخص شد که نمونه (A2) با کاهش ۱۶ درصدی در بیشینه نیروی اولیه نسبت به نمونه‌های (A1) و (A3)، عملکرد بهتری در کاهش شوک دارد. این نتیجه نشان می‌دهد که استفاده از ترکیب دوجداره (A2) می‌تواند گزینه مناسبی برای کاهش شوک‌های ناگهانی در حوادث تصادف باشد، که می‌تواند به بهبود ایمنی سرنشینان خودروها کمک کند.

۳- از سوی دیگر، نمونه (A3) که نسبت به نمونه (A1) از قطر خارجی بزرگ‌تری برخوردار است، نشان داد که این افزایش قطر تأثیر قابل‌توجهی در بهبود ظرفیت جذب انرژی دارد. در حالی که بیشینه نیروی اولیه در این نمونه تقریباً ثابت باقی‌مانده است (با افزایش ۲ درصدی)، جذب انرژی آن حدود ۲۰ درصد افزایش یافت. این امر نشان می‌دهد که در طراحی سازه‌های جدار نازک برای جذب انرژی، می‌توان با تغییرات کوچک در ابعاد هندسی، بهبود فراوانی در عملکرد جذب انرژی دست‌یافت.

۴- نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که طراحی و بهینه‌سازی لوله‌های دوجداره با سطوح مقطع مختلف می‌تواند به‌طور

مدلسازی ماده

- استفاده از مدل Johnson-Cook برای پیش‌بینی رفتار ماده تحت نرخ کرنش بالا.
- اعمال مدل تخلخل GTN برای پیش‌بینی رشد حفره‌ها و شکست.
- مشخصات مکانیکی آلیاژ: Al-Li  
 $A = 350 \text{ MPa}$ ,  $B = 426 \text{ MPa}$ ,  $n = 0.34$ ,  $C = 0.015$ ,  $m = 1.0$

شبیه‌سازی اجزای محدود با LS-DYNA

- مش‌بندی تطبیقی در نواحی تمرکز تنش.
- ضریب اصطکاک سطحی  $\mu = 0.2$ ،  
 الگوریتم تماس Surface-to-Surface Penalty
- استفاده از معیار شکست Cockcroft-Latham ( $W_{cr} = 120 \text{ MJ/m}^3$ )

نتایج تحلیل دینامیکی

کاربرد عملی در مأموریت‌های ماه

- نصب سامانه در پایه‌های فرودگر جهت جذب ضربه اولیه
- ذخیره‌سازی انرژی تولیدی برای تأمین برق تجهیزات پس از فرود
- قابلیت استفاده مجدد با عملکرد پایدار در چند چرخه فرود

دستورالعمل طراحی برای مهندسان

- انتخاب مواد با حداقل  $\sigma_y = 350 \text{ MPa}$  و ازدیاد طول  $> 8\%$
- ضریب اطمینان  $SF = 1.5$ : برای بار استاتیک،  
 $SF = 2.0$  برای بار دینامیک
- توصیه ساخت: جهت چاپ موازی با محور بارگذاری، حداقل ضخامت  $1.0 \text{ mm}$

جمع‌بندی

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از سازه‌های جدار نازک چندلایه با هندسه ترکیبی و مواد هوشمند، رویکردی مؤثر برای ارتقای ایمنی و کارایی سیستم‌های فرود فضاپیماهاست. طراحی ارائه‌شده نه تنها قادر به

[7] Seitzberger M, Rammerstorfer FG, Degischer HP, Gradinger R. Crushing of axially compressed steel tubes filled with aluminium foam. *Acta Mechanica*. 1997;125:93-105.

[8] Zhang Y, Sun G, Li G, Luo Z, Li Q. Optimization of foam-filled bitubal structures for crashworthiness criteria. *Materials & Design*. 2012;38:99-109.

[9] Salehghaffari S, Tajdari M, Mokhtarneshad F. The collapse of thick-walled metal tubes with wide external grooves as controllable energy-dissipating devices. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2009;223(11):2465-80.

[10] Nia AA, Hamedani JH. Comparative analysis of energy absorption and deformations of thin walled tubes with various section geometries. *Thin-Walled Structures*. 2010;48(12):946-54.

[11] Nia AA, Badnava H, Nejad KF. An experimental investigation on crack effect on the mechanical behavior and energy absorption of thin-walled tubes. *Materials & Design*. 2011;32(6):3594-607.

[12] Xiang X, Zou S, San Ha N, Lu G. Energy absorption of bio-inspired multi-layered graded foam-filled structures under axial crushing. *Composites Part B: Engineering*. 2020;198:108216.

[13] Ab Rahim Nib. crash performance of polyurthane foam-filled aluminium column.

[14] Xiang X, Shao D, Pang T, Ngo TT, Ha NS, Zhang S. Energy absorption of multilayer aluminum foam-filled structures under lateral compression loading. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2024;31(3):659-75.

[15] San Ha N, Lu G. Thin-walled corrugated structures: A review of crashworthiness designs and energy absorption characteristics. *Thin-Walled Structures*. 2020;157:106995.

[16] Magliaro J, Mohammadkhani P, Rahimidehgolan F, Altenhof W, Alpas AT. Influence of Extruded Tubing and Foam-Filler Material Pairing on the Energy Absorption of Composite AA6061/PVC Structures. *Materials*. 2023;16(18):6282.

[17] Hasanzadeh H, Mohtarami E, Ebadati M, Kashyzadeh KR, Omidi Bidgoli M. Collapse analysis of Al 6061 alloy conical shells with circular cutouts under axial loading: experiment and simulation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2022;236(4):704-14.

مؤثری به بهبود قابلیت‌های جذب انرژی و کاهش آسیب در سیستم‌های ایمنی خودرو کمک کند. بر اساس این نتایج، توصیه می‌شود که در طراحی سیستم‌های جذب انرژی، از مدل (A3) به دلیل جذب انرژی بالاتر استفاده شود. همچنین، مدل (A2) به‌عنوان گزینه مناسب برای کاهش شوک‌های ناگهانی در نظر گرفته شود. این نتایج می‌تواند راهنمایی مفیدی برای مهندسان و طراحان در بهبود طراحی سیستم‌های جذب انرژی در صنعت خودرو باشد.

## ۷- فهرست علائم

تنش حقیقی	$\sigma_{tru}$
کرنش حقیقی	$\epsilon_{tru}$
مدول الاستیسیته	E
تنش مهندسی	$\sigma_{eng}$
کرنش مهندسی	$\epsilon_{eng}$
کرنش پلاستیک	$\epsilon_{pl}$
تنش تسلیم	$\sigma_y$
گیگاپاسکال	GPa
مگاپاسکال	MPa

## ۸- مراجع

[1] Cetin E, Baykasoğlu C. Energy absorption of thin-walled tubes enhanced by lattice structures. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019;157:471-84.

[2] Jones N. *Structural Impact*. Cambridge University Press 1989. 1997.

[3] Langseth M, Hopperstad O, Hanssen A. Crash behaviour of thin-walled aluminium members. *Thin-walled structures*. 1998;32(1-3):127-50.

[4] Saini A, Tak SK, Loda A, Dev A, Dipali BP, editors. *A Review on Performance of Thin-Walled Metallic Tubes as Energy Absorbing Structures*. Proceedings of International Conference of Undergraduate Students.

[5] Renreng I, Djmaluddin F, Furqani F, editors. *Energy Absorption Analysis of aluminum Filled Foam Tube Under Axial Load using Finite Element Method with Cross Section Variations*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; 2020: IOP Publishing.

[6] Reid SR, Reddy T, Gray M. Static and dynamic axial crushing of foam-filled sheet metal tubes. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1986;28(5):295-322.

[18] Wierzbicki, Tomasz, and Wlodzimierz Abramowicz. "On the crushing mechanics of thin-walled structures." (1983): 727-734.

[19] Abramowicz, Wlodzimierz, and Norman Jones. "Dynamic axial crushing of square tubes." *International Journal of Impact Engineering* 2, no. 2 (1984): 179-208