

## تحلیل تجربی و عددی کمانش و کنترل میزان جذب انرژی ضربه‌گیرهای دوجداره مربعی تحت بارگذاری محوری شبه‌استاتیک و دینامیک

سجاد آذرخش\*، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اراک  
علی پورکمالی انارکی، دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

Email: Sajad\_Azarakhsh@Yahoo.com

دریافت: ۱۳۹۷/۰۱/۳۰ - پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۱۱

### چکیده

امروزه، به منظور کاهش خسارات ناشی از برخورد از جاذب‌های انرژی استفاده می‌کنند. سازه‌های جدارنازک محبوب‌ترین سازه‌هایی هستند که به‌عنوان جاذب انرژی در شکل‌های مختلف ساخته می‌شوند. سازه‌های جدارنازک به‌خاطر سبکی، ظرفیت جذب انرژی، طول لهیدگی و نسبت جذب انرژی به وزن زیاد به‌عنوان یکی از کارآمدترین سیستم‌های جذب انرژی کاربرد روزافزونی پیدا کرده‌اند. هدف از انجام این تحقیق، بررسی اثر تغییرشکل هندسی لوله برنجی با سطح مقطع مربعی بر میزان جذب انرژی و بررسی اثر ترکیب دوجداره آن‌ها برای جذب انرژی بیشتر ناشی از بارگذاری محوری است. در بخش تجربی، ابتدا لوله‌هایی با سطح مقطع مربعی از جنس برنج تهیه شده و سپس آزمایش‌های شبه‌استاتیک با نرخ بارگذاری ثابت روی نمونه‌ها انجام گرفته است و نمودار نیرو برحسب جابجایی در هر آزمایش اندازه‌گیری شده است. مدلی برای شبیه‌سازی فرایند 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. با مقایسه نتایج تجربی و عددی مشخص گردید که مدل ارائه شده برای تعیین پاسخ فروریزش و تعیین نمودار نیرو-جابجایی و میزان انرژی جذب شده مناسب است. از مدل اجزای محدود صحت‌گذاری شده در مطالعه پارامتری برای تعیین اثر پارامترهای هندسی (از جمله عیوب هندسی و ضخامت) و پارامترهای بارگذاری دینامیک (از جمله جرم برخورد کننده و سرعت برخورد کننده) بر انرژی جذب شده استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: لوله‌های دوجداره مربعی، بارگذاری شبه‌استاتیک، انرژی جذب شده، روش اجزای محدود، بارگذاری دینامیک

## ۱. مقدمه

بررسی قرار دادند. در این تحقیق، تأثیر سطح مقطع لوله بر میزان جذب انرژی نیز بررسی شد. صالح غفاری و همکاران (۲۰۰۹) لهیدگی لوله‌های جدارنازک استوانه‌ای دارای شیار را تحت بارگذاری محوری مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که ایجاد شیار در طول لوله باعث کاهش نیروی الاستیک و نیروی برخورد می‌شود.

علوی‌نیا و حداد همدانی (۲۰۱۰) نحوه تغییرشکل و ظرفیت جذب انرژی لوله جدارنازک با هندسه‌های مختلف مقطع (دایره، مربع، مستطیل، شش ضلعی، مثلث، هرمی و مخروطی) را به صورت تجربی و عددی بررسی نمودند و نشان دادند که در بین مقاطع مورد بررسی، مقطع دایره دارای بیشترین میزان جذب انرژی و نیروی متوسط لهیدگی است.

علوی‌نیا و همکاران (۲۰۱۱) قابلیت جذب انرژی و نحوه فروپاشی مقاطع جدارنازک آلومینیومی با مقطع دایره و مربع را، که دارای یک آغازگر فروریزش به شکل ترک بودند، مورد مطالعه قرار داده و نشان دادند که ترک می‌تواند بر فرایند فروریزش و حالت تغییرشکل تأثیر گذاشته و راندمان نیروی لهیدگی و جذب انرژی را افزایش دهد.

آذرخش و همکاران (۲۰۱۵) به روش تجربی و عددی، جذب انرژی لوله‌های دوجداره استوانه‌ای را تحت بارگذاری محوری مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، اثر پارامترهای مختلفی از جمله ضخامت، زاویه نیم‌رأس و همچنین سرعت و جرم برخورد کننده بر نسبت انرژی جذب شده دینامیک به استاتیک (ضریب DAF) مورد بررسی واقع شد.

آذرخش و قمریان (۲۰۱۷) رفتار لهیدگی لوله‌های تک‌جداره مخروطی دوسرگیردار را تحت بارگذاری محوری و مورب به روش آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق، اثر پارامترهای هندسی (از جمله زاویه نیم‌رأس) و پارامترهای بارگذاری (از

ضربه‌گیرهای فلزی به‌عنوان یکی از انواع گاردریل‌ها و حفاظ‌های ایمنی، انرژی جنبشی وسیله نقلیه منحرف شده را با تغییرشکل خود جذب می‌کنند. لوله‌های جدارنازک با هندسه‌های مختلف از جمله دایروی، مربعی و مخروطی به‌عنوان یکی از انواع ضربه‌گیرها کاربرد فراوانی در صنایع مختلف دارند. رفتار مکانیکی لوله‌های جدارنازک فلزی سال‌های متمادی مورد بررسی قرار گرفته است. وزن کم، قابلیت جذب بالای انرژی و صرفه اقتصادی مزیت‌هایی است که باعث شده تحقیقات برای استفاده از این سازه‌ها همچنان ادامه داشته باشد.

رید و همکاران (۱۹۸۶) نحوه فروریزش و میزان جذب انرژی لوله‌های جدارنازک با سطح مقطع مستطیل و مربع به‌صورت خالی و تقویت شده با فوم را تحت بارگذاری محوری مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق نشان داد که جذب انرژی با افزایش چگالی فوم، افزایش می‌یابد. همچنین، در نمونه‌های تقویت شده با فوم نحوه چین‌خوردگی متقارن و منظم‌تر بود.

سیتزبرگر و همکاران (۱۹۹۷) رفتار لهیدگی و میزان انرژی جذب شده لوله‌های جدارنازک استوانه‌ای با مقطع مربعی و دایروی به‌صورت تقویت شده با فوم فلزی آلومینیومی را به‌طور تجربی مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق نشان داد که وجود فوم، در افزایش میزان جذب انرژی و نحوه چین‌خوردن سازه‌ها مؤثر بوده و فاصله چین‌ها را کاهش می‌دهد.

فان و همکاران (۲۰۱۳) رفتار مکانیکی سازه‌های جدارنازک با سطح مقطع شش ضلعی، هشت ضلعی و ستاره‌ای را تحت بارگذاری شبه‌استاتیک بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش تعداد ضلع‌ها، بهبود جذب انرژی سازه را در پی دارد.

ژانگ و همکاران (۲۰۱۲) به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی عددی، رفتار مکانیکی لوله‌ها و ستون‌های دوجداره پر شده از فوم را تحت بارگذاری محوری مورد

تک‌جداره و دوجداره 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 تغییرشکل سازه‌ها و همچنین تأثیر پارامترهای مؤثر بر عملکرد این سازه‌ها، از مهم‌ترین شاخصه‌های مورد بررسی در این پژوهش می‌باشند.

## ۲. معرفی نمونه‌ها

برای انجام آزمایش‌های تجربی سه نوع از لوله‌های استوانه‌ای با سطح مقطع مربعی (لوله تک‌جداره بزرگ و کوچک و همچنین لوله دوجداره) از جنس برنج مورد آزمایش قرار گرفتند. در شکل ۱، این لوله‌ها نشان داده شده‌اند. همچنین، در جدول ۱، مشخصات هندسی این سه نوع لوله ارائه شده است. به منظور ساده شدن شرایط، برای هر نمونه یک کد (مطابق جدول ۱) تعریف شده است. حرف S-1 مربوط به نمونه مربعی تک‌جداره بزرگ، حرف S-2 مربوط به نمونه تک‌جداره کوچک و حرف BS مربوط به نمونه دوجداره است. برای شناسایی خواص مکانیکی، ابتدا از پوسته برنجی با روش وایرکات و طبق استاندارد JANAF تعداد سه نمونه استاندارد برش داده شد. سپس آزمایش کشش مطابق استاندارد ASTM E8M روی نمونه‌ها انجام گرفت. از پارامترهای مهم در بررسی خواص مکانیکی مواد، تعیین مدول الاستیسیته، تنش تسلیم، ضریب پواسون و میزان استحکام کششی است که دستگاه قابلیت تعیین فاکتورهای ذکر شده را دارد. در جدول ۲، خواص مکانیکی به‌دست آمده برای نمونه‌ها نشان داده شده است. دستگاه تست شامل دو فک است که فک پایینی همواره ساکن بوده و فک بالایی با سرعت ثابتی حرکت داده می‌شود و طول نمونه آزمایشگاهی را افزایش می‌دهد. حداقل سرعت فک

جمله زاویه بارگذاری) بر میزان جذب انرژی و متوسط نیروی لهیدگی مطالعه گردید.

همچنین، در تحقیقی دیگر، آذرخش و همکاران (۱۳۹۶) به روش تجربی و عددی، نحوه فروریزش و میزان جذب انرژی لوله‌های متداخل مخروطی تحت بارگذاری محوری و مورب را مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش، اثر شرایط تکیه‌گاهی و زاویه بارگذاری نیز بر نحوه فروریزش و ویژگی‌های جذب انرژی لوله‌های متداخل مورد بررسی قرار گرفت.

رضوانی و همکاران (۱۳۹۵) جذب انرژی در لوله‌های استوانه‌ای پر شده از فوم پلی‌اورتان با آغازگر تحت بارگذاری محوری را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق که به روش تجربی و عددی صورت گرفت، با به‌کار بردن یک آغازگر در بالای لوله، از اعمال نیروی ناگهانی به قسمت اصلی سازه جلوگیری شد.

علوی‌نیا و خدابخش (۱۳۹۵) به روش اجزای محدود، تأثیر فاصله لوله‌های جدارنازک متداخل را بر رفتار مکانیکی و جذب انرژی سازه بررسی نمودند. در این پژوهش، با شبیه‌سازی سازه (لوله‌های متداخل) تحت بارگذاری محوری، میزان جذب انرژی مشخص گردید و فاصله بهینه لوله‌ها از یکدیگر برای بیشینه کردن مقدار جذب انرژی نیز با انجام شبیه‌سازی‌های مختلف تعیین شد.

پیرمحمد و اسماعیلی مرزده‌شتی (۱۳۹۶) به روش عددی، رفتار جذب انرژی سازه‌های دوجداره با مقاطع مربعی و دایروی را مورد بررسی قرار دادند. بارگذاری به‌صورت محوری و مایل شبه‌استاتیک روی سازه اعمال گردید. جهت شبیه‌سازی این سازه‌ها از نرم‌افزار ال اس داینا استفاده شد. همچنین، روش رتبه‌بندی کپراس جهت پیدا کردن بهترین سازه از نقطه نظر جذب انرژی روی نتایج ال اس داینا پیاده‌سازی گردید.

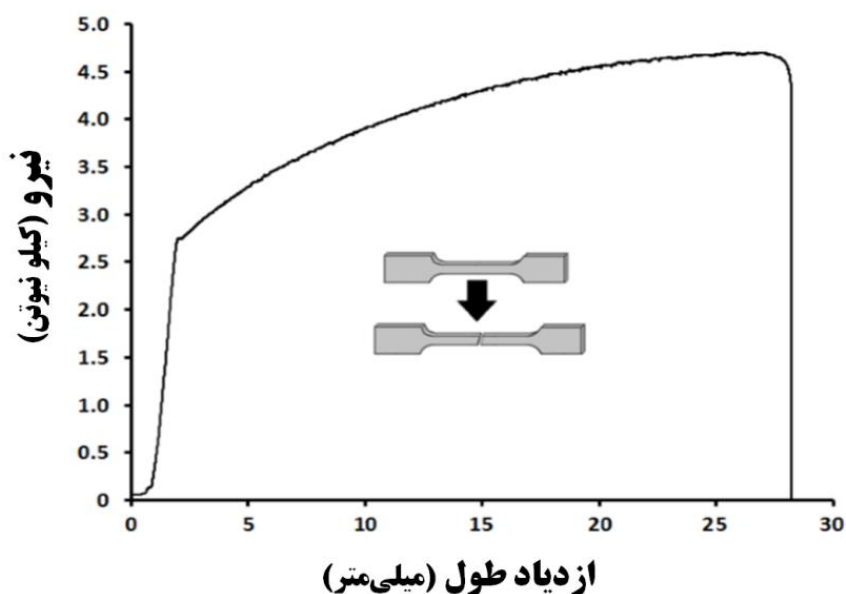
در مقاله حاضر، نحوه لهیدگی و مقدار جذب انرژی لوله‌های استوانه‌ای با سطح مقطع مربعی به‌صورت

تحلیل تجربی و عددی کماتش و کنترل میزان جذب انرژی ضربه‌گیرهای دوجداره مربعی تحت بارگذاری محوری شبه‌استاتیکی و دینامیک

بالایی بر طبق استاندارد طوری تعیین می‌شود که ۵ درصد طول سنجش در مدت زمان یک دقیقه طی شود. بنابراین، آزمایش کشش برای نمونه‌های برنجی با سرعت ۲/۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت. شکل ۲ نمودار نیرو-ازدیاد طول نمونه برنجی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. لوله‌های مربعی تک‌جداره و دوجداره از جنس برنج



شکل ۲. نمودار نیرو-ازدیاد طول مهندسی نمونه تخت برنجی

جدول ۱. مشخصات هندسی نمونه‌ها

نام نمونه	طول × عرض	ضخامت	طول
S-1	۵۰×۵۰	۱	۵۵
S-2	۲۰×۲۰		
S-1	۵۰×۵۰		
S-2	۲۰×۲۰		

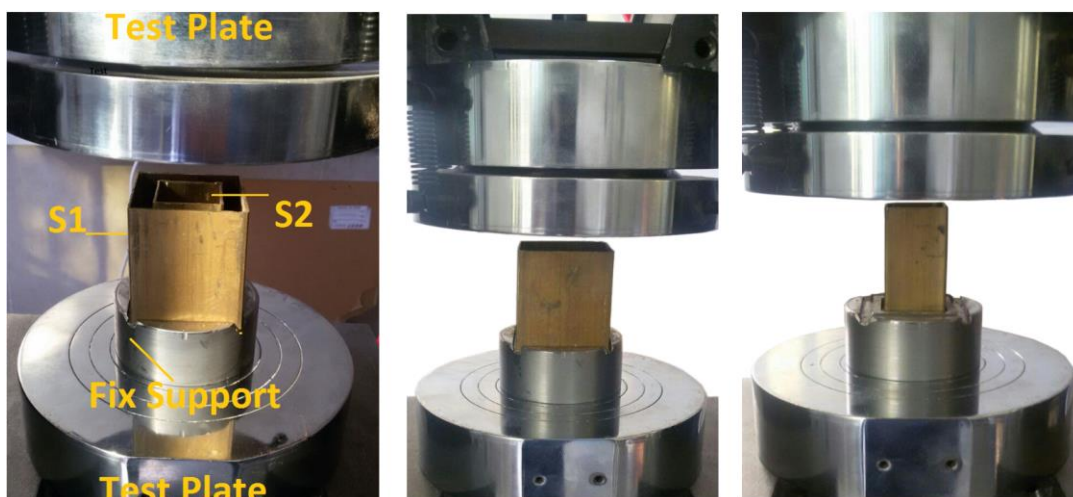
جدول ۲. خواص مکانیکی نمونه‌ها

مدول الاستیسیته (GPa)	استحکام نهایی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	ضریب پواسون
۹۷	۳۹۸	۲۳۶	۰/۳

توسط نرم‌افزار مربوط به آن صورت می‌گیرد. این نرم‌افزار قادر به تهیه گزارش کاملی از آزمایش‌های انجام شده است و توانایی ثبت داده‌های حاصل از آزمایش را به صورت نمودار دارد. اعمال نیروی فشاری تا سقف ۲۵ تن در این دستگاه توسط سیستم هیدرولیک با سرعت ۰/۵ تا ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه میسر است. شکل ۳ نحوه قرارگیری نمونه‌ها را در دستگاه تست کشش- فشار نشان می‌دهد. روی سه نمونه، تعداد ۹ آزمایش انجام شد که به منظور صحت و دقت نتایج، هر آزمایش سه مرتبه تکرار شد.

### ۳. روش انجام آزمایش‌ها

برای انجام آزمایش‌ها از دستگاه تست کشش- فشار ساخت شرکت سنتام (در آزمایشگاه مقاومت مصالح دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان) استفاده شد. این دستگاه مجهز به نرم‌افزار اعمال بار استاتیک و شبه‌استاتیک بوده و قابلیت اخذ نتایج خروجی را دارا می‌باشد. دستگاه شامل دو فک است که پایینی همواره ساکن بوده و فک بالایی با سرعت ثابت یا متغیر می‌تواند مسافت تعریف شده را طی کند. کنترل دستگاه



شکل ۳. نحوه قرارگیری نمونه‌ها در دستگاه تست کشش- فشار

شدند و نمونه نیز پس از مدل شدن در ماژول چیدمان قطعات، بین آن‌ها قرار گرفته است. فک بالا و پایین با قید جسم صلب<sup>۲</sup> ایجاد شدند. این قید به کاربر اجازه می‌دهد تا حرکت نواحی یک مدل را نسبت به حرکت

### ۴. شبیه‌سازی عددی فروریزش لوله‌های

#### مربعی تک‌جداره و دوجداره

نرم‌افزار غیرخطی آباکوس با نسخه ۶،۱۴ و روش حل صریح<sup>۱</sup> برای شبیه‌سازی انتخاب شده است. برای مدل‌سازی دستگاه تست فشار، فقط فک بالا و پایین مدل

<sup>۲</sup>- Rigid Body

<sup>۱</sup>- Explicit

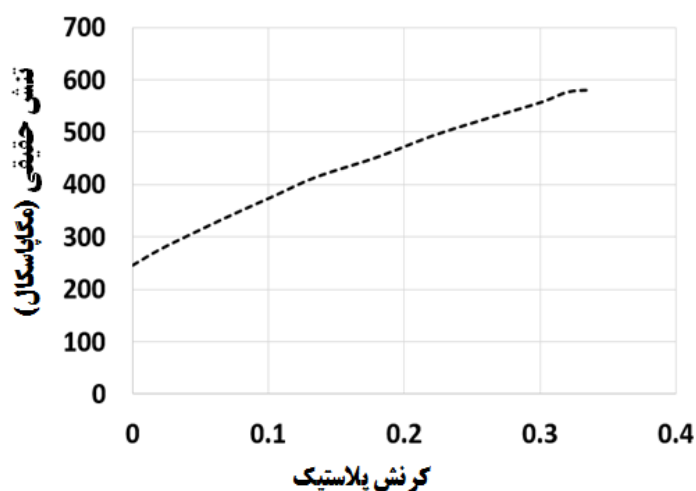
غیرحساس به نرخ کرنش برای ماده برنجی استفاده شده است. در ماژول خصوصیات مواد<sup>۲</sup>، برای خواص الاستیک ماده برنجی از داده‌های جدول ۲ و برای خواص پلاستیک آن از نمودار تنش حقیقی-کرنش پلاستیک، که در شکل ۴ آمده، استفاده شده است. تنش حقیقی و کرنش پلاستیک از روابط زیر حاصل می‌شوند:

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

$$\epsilon_{tru} = \ln(1 + \epsilon_{eng}) \quad (2)$$

$$\epsilon_{pl} = \epsilon_{tru} - \frac{\sigma_y}{E} \quad (3)$$

که  $\sigma_{tru}$  و  $\epsilon_{tru}$  به ترتیب تنش و کرنش حقیقی،  $\sigma_{eng}$  و  $\epsilon_{eng}$  به ترتیب تنش و کرنش مهندسی،  $\epsilon_{pl}$  کرنش پلاستیک،  $\sigma_y$  تنش تسلیم و  $E$  مدول الاستیسیته است. مطابق شکل ۴، تنش متناظر با کرنش پلاستیک صفر بیانگر تنش تسلیم است.



شکل ۴. نمودار تنش حقیقی-کرنش پلاستیک ماده برنجی

یک نقطه مقید کند. همچنین، نمونه‌ها به صورت پوسته<sup>۱</sup> در ماژول قطعات<sup>۲</sup> ایجاد شدند. در فروریزش پوسته مربعی یک سرگردار فرض می‌شود که سطح قاعده پایین نمونه‌های مربعی گردار است. لذا، برای مقید کردن قاعده پایین پوسته مربعی به صفحه صلب پایینی از قابلیت قید بستن<sup>۳</sup> 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<sup>۴</sup> توسط درجات آزادی سطح پایه<sup>۵</sup> مقید می‌شود. در این شبیه‌سازی، تمامی درجات آزادی گره‌هایی از پوسته مربعی 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 و قادر به مدل‌سازی انواع مختلف مواد است. در این شبیه‌سازی، با توجه به فروریزش شبه‌استاتیک، از پلاستیسیته

با یکدیگر تعریف شوند. لذا، در قسمت تعریف برهمکنش یا تعریف تماس بین قطعات<sup>۶</sup>، بین سطح بالایی پوسته مربعی با سطح صلب بالایی شرط تماس

برای جلوگیری از نفوذ نقاط مختلف پوسته مربعی به داخل قطعات صلب و تعریف شرایط لغزش پوسته مربعی بر روی سطوح صلب نیاز است سطوح در تماس

<sup>5</sup>- Master  
<sup>6</sup>- Property  
<sup>7</sup>- Interaction

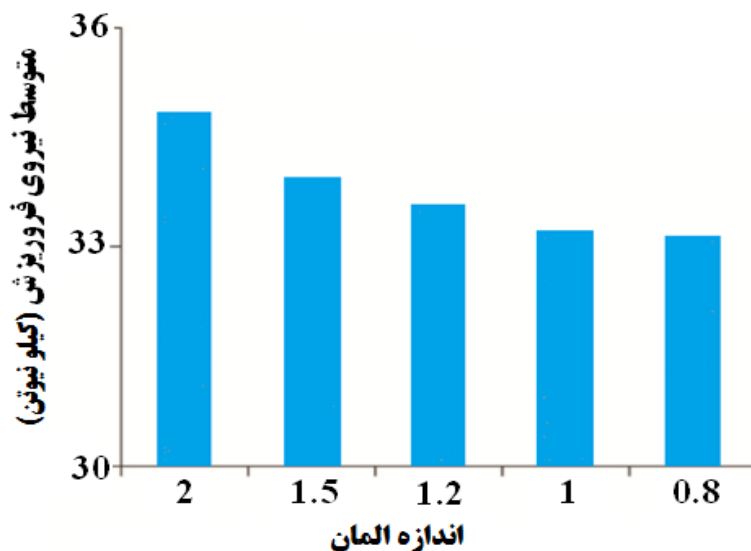
<sup>1</sup>- Shell  
<sup>2</sup>- Part  
<sup>3</sup>- Tie  
<sup>4</sup>- Slave

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 شده است.

برای استقلال حل عددی از مش‌بندی، چندین شبیه‌سازی انجام شد تا اندازه مش مناسب که منجر به همگرایی جواب می‌شود مشخص شود. مطابق شکل ۵، اثر اندازه المان بر متوسط نیروی فروریزش (MCL) لوله‌های دوجداره بررسی شده است. بنابراین، المان‌بندی با اندازه مش  $1 \times 1$  میلی‌متر برای نمونه‌ها در نظر گرفته شد. نوع المان به کار رفته در لوله‌ها و صفحه صلب به ترتیب از نوع المان پوسته با کد S4R و المان صلب با کد R3D4 است که المان پوسته دارای چهار گره و المان صلب دارای دو گره است و روش انتگرال‌گیری روی نقاط گوسی آن از نوع کاهش یافته است.

سطح به سطح<sup>۱</sup> ایجاد شده است. مقدار ضریب اصطکاک برای این نوع تماس ۰/۱۵ در نظر گرفته شده است. همچنین، به منظور عدم نفوذ صفحات تماس در یکدیگر، به صورت پیش‌فرض، تماس سخت تعریف شده است. بعلاوه، تماس ممکن است در اثر نزدیک شدن نقاط واقع در یک سطح ایجاد شود. 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 مربعی با خودش پیش‌بینی شده است. در این تحقیق، فرض می‌شود ضریب اصطکاک برای این نوع تماس صفر است.

هر کدام از صفحات صلب بالایی و پایینی دارای شش درجه آزادی شامل سه مؤلفه جابه‌جایی و سه مؤلفه دوران می‌باشند. در تحلیل فروریزش پوسته مربعی، سطح صلب پایینی به فک ثابت دستگاه متصل است. پس کلیه



شکل ۵. اثر اندازه المان بر متوسط نیروی فروریزش لوله‌های دوجداره

## ۵. نتایج و بحث

### ۵-۱. نتایج آزمایش‌های تجربی

برای برقراری این شرط تکیه‌گاهی از قطعه‌ای فولادی استفاده شده است. در سطح این قطعه، شیارهایی هم‌عرض و هم‌طول با پوسته‌های مربعی داخلی و خارجی به عمق ۵ میلی‌متر ایجاد شده است تا از حرکت افقی و عمودی قاعده پایینی پوسته‌ها طی فروریزش آن‌ها

در این پژوهش، برای مقید کردن قاعده پایینی نمونه‌های مربعی، از شرط تکیه‌گاهی یک‌سرگردار استفاده می‌شود.

<sup>1</sup> - Surface to surface

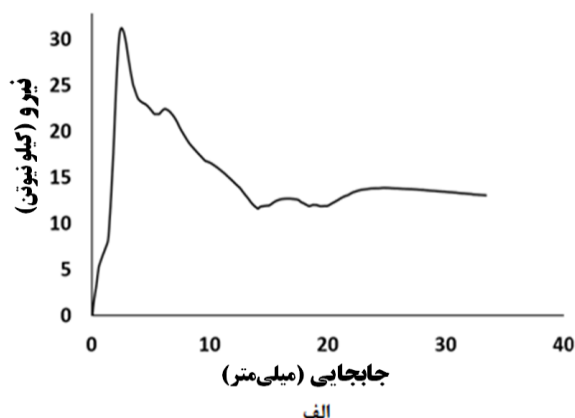
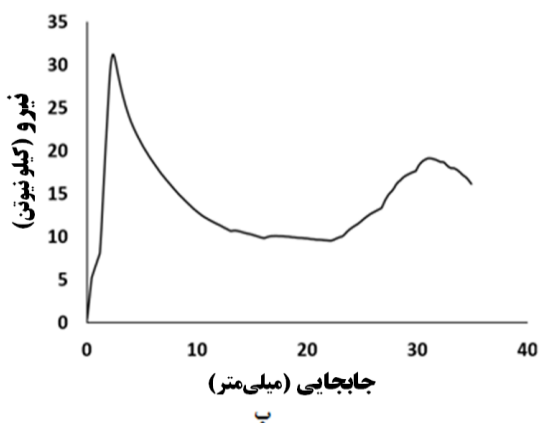
تک‌جداره مربعی بزرگ و کوچک آورده شده است. در این نمودارها، نیرو در ابتدای جابه‌جایی فک متحرک به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته است که ناشی از رفتار الاستیک نمونه مربعی تحت اثر بار فشاری، قبل از آغاز کماتش است. سپس نیرو با تشکیل چین خارجی کاهش می‌یابد. در فروریزش‌های غیرمقارن محوری، پایداری نمونه پس از تشکیل چین خارجی کمتر می‌شود. بنابراین، در زمان تشکیل چین داخلی، نیروی کمتری نسبت به فروریزش‌های مقارن محوری نیاز است.

جلوگیری شود. نمونه‌های مربعی تک‌جداره و دوجداره بین دو فک دستگاه تست قرار گرفته و با حرکت محوری فک متحرک به سمت فک ثابت، نمونه دچار تغییرشکل می‌شود و نمودار نیرو- جابه‌جایی در حین تغییرشکل توسط نرم‌افزار دستگاه استخراج می‌شود. در این آزمایش‌ها، سرعت بارگذاری ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه و مسافتی که فک طی می‌کند ۳۳ میلی‌متر، معادل ۶۰٪ ارتفاع اولیه نمونه‌ها، انتخاب شده است.

### ۱-۱-۵. نتایج آزمایش تجربی فروریزش لوله‌های

#### تک‌جداره

در شکل ۶، نمودار نیرو- جابه‌جایی فروریزش نمونه‌های



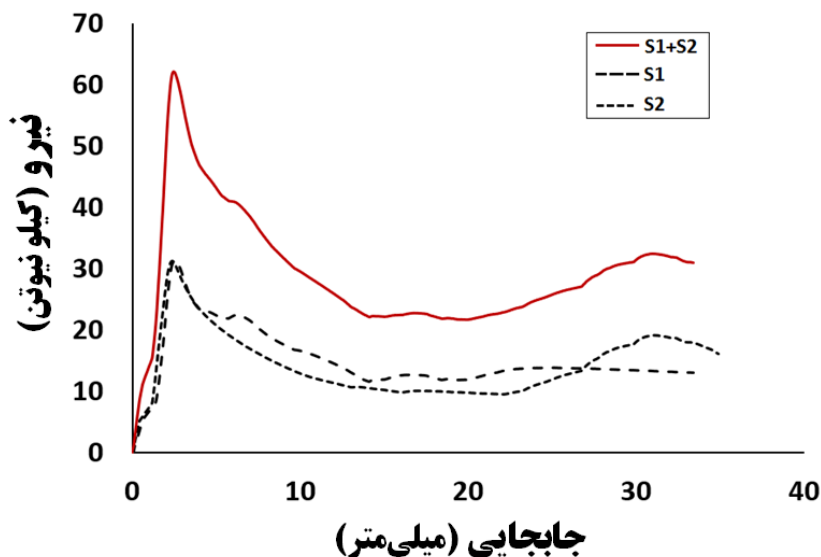
شکل ۶. نمودار نیرو- جابه‌جایی فروریزش محوری نمونه تک‌جداره مربعی با سطح مقطع الف) بزرگ و ب) کوچک

و ۴۷۶ ژول است. براساس مطالعه حاضر، نتیجه می‌شود که با افزایش سطح مقطع لوله مربعی، انرژی جذب شده بدون تغییر نیروی اولیه افزایش می‌یابد.

در شکل ۷، نمودار نیرو- جابه‌جایی فروریزش مجموع پوسته‌های استوانه‌ای با سطح مقطع کوچک و بزرگ به‌منظور مقایسه با لوله دوجداره مربعی آورده شده است. بیشینه نیروی فروریزش مجموع این پوسته‌ها ۶۱/۲ کیلو نیوتن و انرژی جذب شده آن در حدود ۹۷۹ ژول است.

همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود، در نمودار نیرو- جابه‌جایی نمونه با سطح مقطع بزرگ و کوچک به ترتیب یک و دو بیشینه نیرو دیده می‌شود. بنابراین، انتظار می‌رود تعداد چین‌های چهارگوش این پوسته‌ها به ترتیب یک و دو عدد باشد. نکته قابل توجه این است که بیشینه نیروی فروریزش و انرژی جذب شده پوسته مربعی با سطح مقطع بزرگ و کوچک بسیار نزدیک به یکدیگر است. نتایج نشان می‌دهد که بیشینه نیروی فروریزش این نمونه‌ها مطابق شکل ۷ برابر ۳۱/۲ کیلو نیوتن و مقدار انرژی جذب شده آن‌ها به ترتیب ۵۰۳





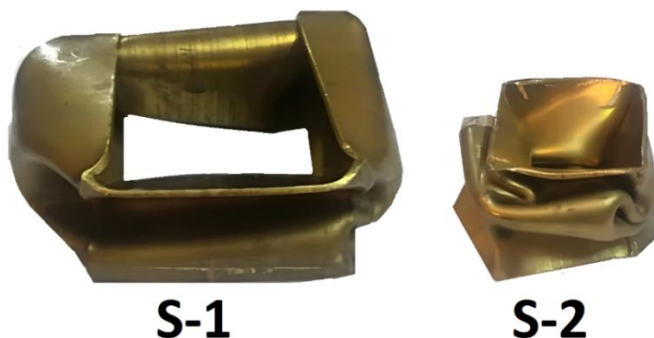
شکل ۷. مقایسه نمودار نیرو- جابه‌جایی فروریزش نمونه تک‌جداره مربعی با سطح مقطع بزرگ و کوچک به‌همراه مجموع نمودارهای آن

#### ۲-۱-۵. نتایج آزمایش تجربی فروریزش لوله‌های

##### دوجداره

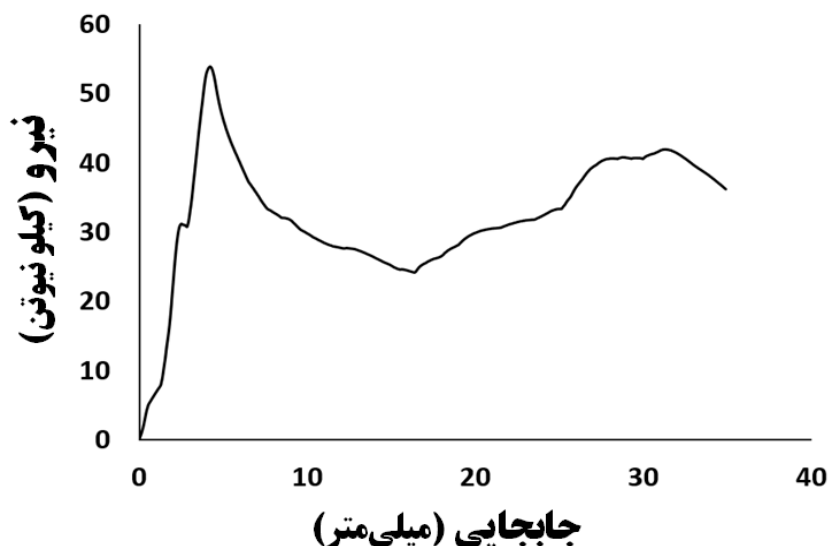
شکل ۹، نمودار نیرو- جابه‌جایی نمونه‌های دوجداره مربعی را تحت شرایط مرزی یک‌سرگیردار نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در شروع بارگذاری، نیرو به طور تقریباً خطی تا یک مقدار ماکزیمم افزایش می‌یابد. این روند تغییر نیرو ناشی از رفتار الاستیک نمونه‌ها تحت اثر بار فشاری، قبل از آغاز کماتش است. در این نمونه‌ها، فروریزش به‌صورت چهارگوش آغاز می‌شود که با تشکیل تغییرشکل داخلی نیرو افزایش می‌یابد. سپس نیرو با تشکیل تغییرشکل خارجی کاهش می‌یابد و این روند به صورت تناوبی ادامه می‌یابد.

شکل ۸، مقایسه فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای مربعی با سطح مقطع بزرگ و کوچک را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، طول چین‌های چهارگوش تشکیل شده با افزایش سطح مقطع (با ثابت نگه‌داشتن پارامترهای ابعادی دیگر) افزایش می‌یابد. بنابراین، بدیهی است که با افزایش طول چین چهارگوش، تعداد آن نیز کاهش می‌یابد. بر این اساس، نمونه مربعی با سطح مقطع بزرگتر تعداد چین کمتری نسبت به نمونه دیگر دارد.



شکل ۸. مقایسه فروریزش نمونه‌های تک‌جداره مربعی با سطح مقطع بزرگ و کوچک

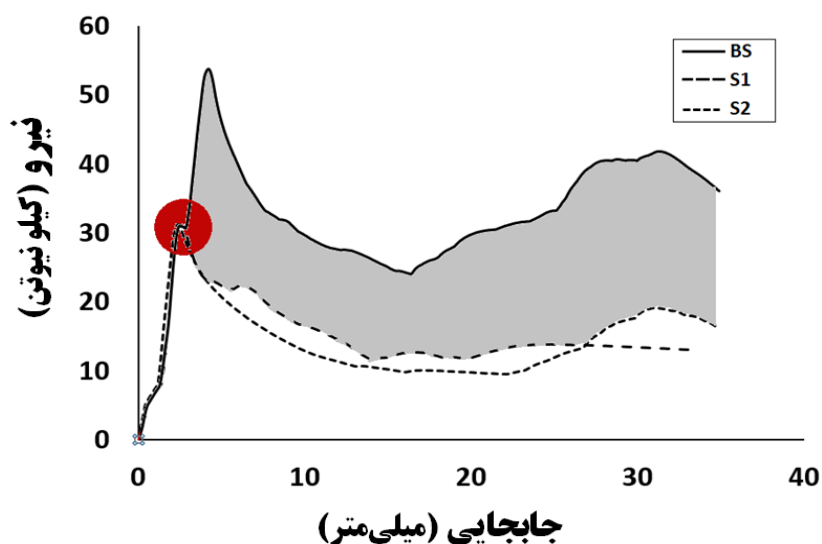
تحلیل تجربی و عددی کمانش و کنترل میزان جذب انرژی ضربه‌گیرهای دوجداره مربعی تحت بارگذاری محوری شبه‌استاتیکی و دینامیک



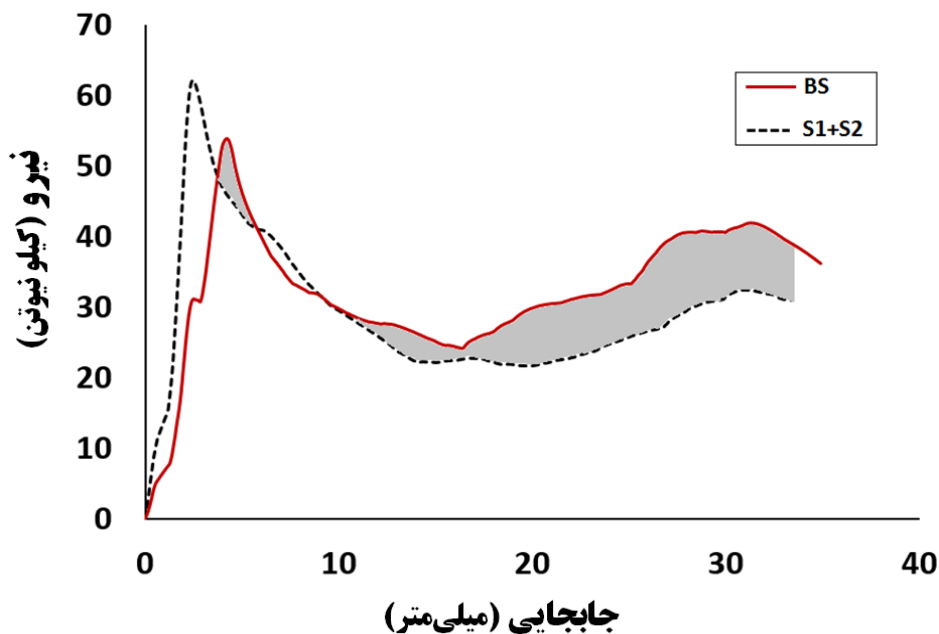
شکل ۹. نمودارهای نیرو- جابه‌جایی فروریزش محوری نمونه‌های استوانه‌ای دوجداره مربعی

۱۱، مجموع انرژی جذب شده فروریزش نمونه‌های تک‌جداره (۹۷۹ ژول) کمتر از انرژی جذب شده فروریزش نمونه دوجداره تشکیل شده از نمونه‌های تک-جداره (۱۱۳۳ ژول) است. به عبارت دیگر، در این مطالعه، انرژی جذب شده لوله دوجداره مربعی در حدود ۱۶٪ بیشتر از مجموع انرژی لوله‌های تک‌جداره آن است. علت این امر را باید در نحوه فروریزش لوله‌های دوجداره جستجو کرد.

مطابق شکل ۱۰، آنچه منحنی‌های نیرو- جابه‌جایی نمونه دوجداره را از نمونه‌های تک‌جداره متفاوت می‌کند، بیشینه و کمینه نیروهای هر تغییرشکل است به طوری که با ترکیب نمونه‌های مربعی، بیشینه و کمینه نیروهای منحنی نیرو- جابه‌جایی افزایش می‌یابد. این امر به معنای افزایش سطح زیر نمودار نیرو- جابه‌جایی و یا به عبارت دیگر افزایش قابلیت جذب انرژی در نمونه‌های دوجداره است. نکته قابل ذکر این است که مطابق شکل



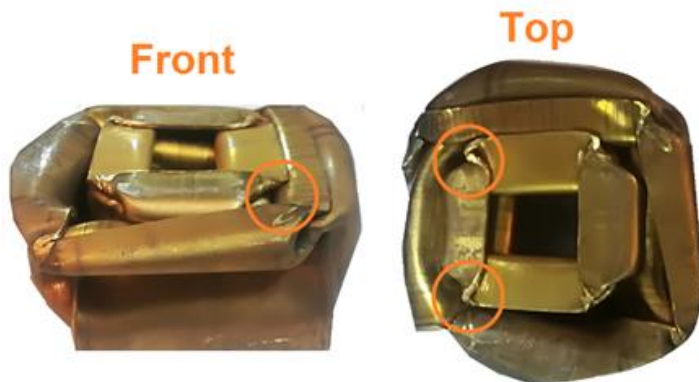
شکل ۱۰. مقایسه نمودارهای نیرو- جابه‌جایی فروریزش نمونه‌های دوجداره مربعی و تک‌جداره تشکیل دهنده آن



شکل ۱۱. مقایسه نمودارهای نیرو-جابجایی فروریزش نمونه‌های دوجداره مربعی و مجموع لوله‌های تک‌جداره تشکیل دهنده آن

پوسته مربعی بیرونی تغییرشکل یافته با پوسته مربعی داخلی است. به عبارت دیگر، چین‌های داخلی پوسته بیرونی، پوسته داخلی را تحت فشار خارجی قرار داده و آن را مطابق خود تغییر می‌دهند.

شکل ۱۲، فروریزش نمونه‌های دوجداره مربعی را تحت شرایط مرزی یک‌سرگیردار نشان می‌دهد. مشاهدات نشان می‌دهد که تعداد چین‌های نمونه‌های مربعی داخلی و خارجی مشابه و برابر دو چین چهارگوش است. نکته قابل توجه تماس چین‌های داخلی



شکل ۱۲. فروریزش نمونه‌های دوجداره مربعی

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 محموله متصل به ضربه‌گیر می‌شود. بنابراین، گاهی لازم است این نیرو به شیوه‌ای از جمله وجود شیار،

جدول ۳، نتایج تجربی فروریزش نمونه‌های دوجداره مربعی و تک‌جداره تشکیل‌دهنده آن شامل مقدار اولین بیشینه نیرو، متوسط نیروی فروریزش، انرژی جذب شده و جذب انرژی ویژه را نشان می‌دهد. یکی از پارامترهای بسیار مهم در ضربه‌گیرها،

عیوب هندسی (مانند برش سطح مقطع ضربه‌گیر) کاهش یابد. در این مطالعه، ترکیب سازه‌های جدارنازک با یکدیگر نیز عاملی برای کاهش بیشینه نیروی اولیه محسوب می‌شود. به طوری که بیشینه نیروی فروریزش لوله دوجداره مربعی مطابق جدول ۳ در حدود ۱۴٪ کمتر از مجموع بیشینه نیروی لوله‌های تک‌جداره تشکیل‌دهنده آن است. بنابراین، استفاده از ترکیب لوله‌ها (دوجداره) برای کاهش شوک پیشنهاد می‌شود.

جدول ۳. نتایج تجربی فروریزش نمونه‌های استوانه‌ای دوجداره مربعی و تک‌جداره تشکیل‌دهنده آن (طول لهدیگی تمامی نمونه‌ها ۳۳ میلی‌متر)

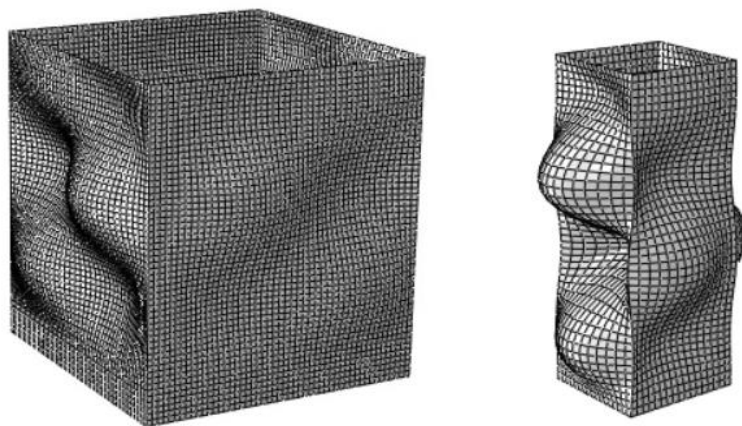
نام نمونه	اولین بیشینه نیرو (کیلو نیوتن)	انرژی جذب شده (ژول)	متوسط نیروی فروریزش (کیلو نیوتن)	جذب انرژی ویژه (ژول بر گرم)
S1	۳۱/۲	۵۰۳	۱۵/۲۴	۵/۳۸
S2	۳۱/۱	۴۷۶	۱۴/۴۲	۱۲/۷۲
S1+S2	۶۲/۳	۹۷۹	۲۹/۶۶	۷/۴۸
BS	۵۳/۷	۱۱۳۳	۳۴/۳۳	۸/۶۶

## ۲-۵. نتایج شبیه‌سازی عددی

با توجه به این که هندسه پوسته‌ها در فرایند ساخت دارای عیوب هندسی اولیه (شامل برآمدگی سطحی و تغییر ضخامت در طول) است، در آزمایش فشار محوری، شیوه فروریزش پوسته‌ها به صورت چهارگوش نامتقارن شده است. بنابراین، در شبیه‌سازی، از مدل‌های سه‌بعدی استفاده شده است. بهترین روش برای ایجاد عیوب هندسی در شبیه‌سازی عددی، استفاده از مودهای کمانش است.

برای به دست آوردن مودهای کمانش و مقادیر ویژه، پوسته‌های مربعی با سطح مقطع کوچک و بزرگ تحت اثر نیروی واحد قرار داده می‌شود. شکل ۱۳، مود کمانشی مورد استفاده برای فروریزش پوسته‌های مربعی را نشان می‌دهد که شیوه فروریزش آن‌ها براساس نتایج تجربی نامتقارن است.

با توجه به اینکه اثر وزن در بسیاری از صنایع، به خصوص صنایع فضایی، از اهمیت زیادی برخوردار است بایستی مقایسه جذب انرژی ویژه (انرژی بر واحد جرم) نمونه‌های مربعی نیز مد نظر قرار گیرد. از آنجا که، از یک طرف، وزن نمونه تک‌جداره مربعی بزرگ در حدود ۲/۵ برابر لوله تک‌جداره مربعی کوچک است، و از طرف دیگر، انرژی جذب شده آن‌ها تقریباً برابر است (با نسبت ۱/۰۶)، بنابراین، بدیهی است که جذب انرژی ویژه نمونه مربعی کوچک بیشتر از نمونه دیگر باشد. در این مطالعه، این مقدار افزایش در حدود ۵۸٪ است. نکته قابل توجه دیگر، افزایش ۱۴ درصدی جذب انرژی ویژه لوله دوجداره مربعی نسبت به لوله‌های تک‌جداره تشکیل‌دهنده آن است. بنابراین، استفاده از ترکیب لوله‌های مربعی نسبت به استفاده مجزای آن و همچنین استفاده از لوله تک‌جداره با سطح مقطع کوچکتر نسبت به بزرگتر پیشنهاد می‌شود.

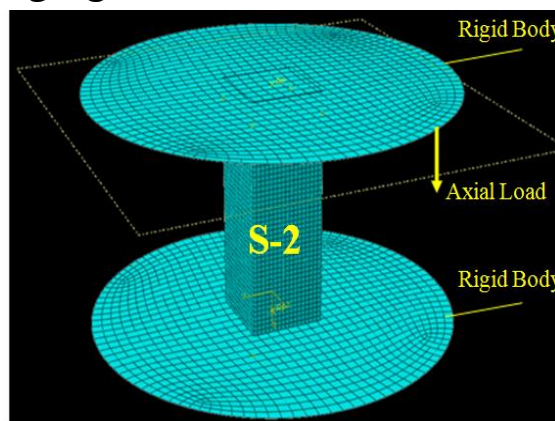
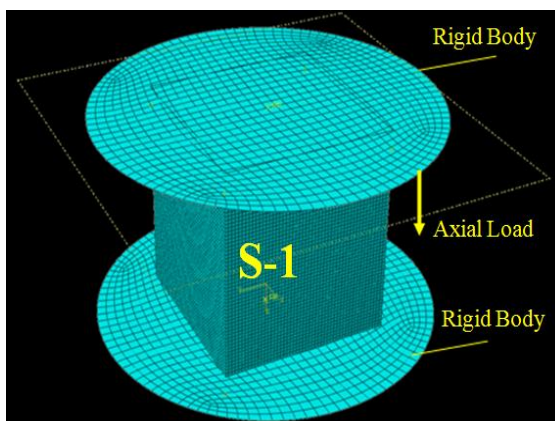


شکل ۱۳. مود کمانشی مورد استفاده در فروریزش نمونه‌های مربعی با سطح مقطع کوچک و بزرگ

بزرگ و کوچک را نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود، پوسته مربعی بین دو قطعه مسطح متصل به فک‌های متحرک و ثابت دستگاه فشار فشرده می‌شود که این قطعات در مقایسه با پوسته صلبیت بیشتری دارند.

### ۱-۲-۵. نتایج شبیه‌سازی عددی فروریزش لوله‌های تک‌جداره

شکل ۱۴، هندسه و بارگذاری نمونه مربعی با سطح مقطع

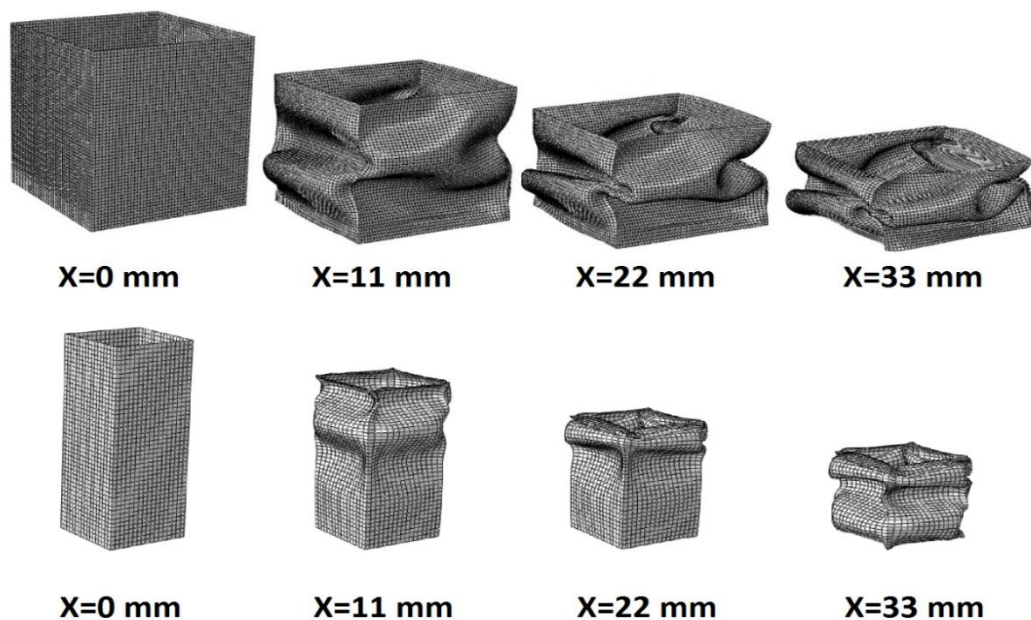


شکل ۱۴. نمایی از هندسه و نحوه بارگذاری نمونه مربعی با سطح مقطع کوچک و بزرگ

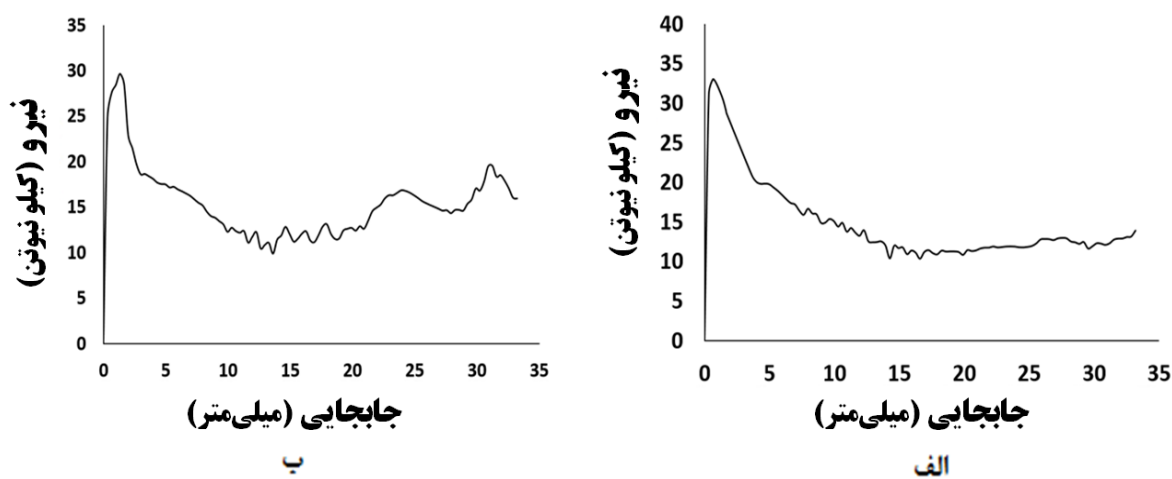
نمونه‌ها را نشان می‌دهد. همان طور که دیده می‌شود، در شروع بارگذاری، نیرو به‌طور تقریباً خطی تا یک مقدار حداکثر افزایش می‌یابد. این روند تغییر نیرو ناشی از رفتار الاستیک پوسته مربعی تحت اثر بار فشاری، قبل از آغاز کمانش است. با شروع کمانش سطح فوقانی پوسته مربعی، نیرو افت می‌کند که در نمونه‌های مربعی کوچک با تشکیل چین داخلی افزایش می‌یابد.

شکل ۱۵، مراحل فروریزش پوسته مربعی تک‌جداره کوچک و بزرگ را تحت شرایط مرزی یک‌سرگیردار نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی‌ها، فروریزش پوسته مربعی بزرگ از ناحیه وسط به‌صورت تاخوردگی نامتقارن شروع می‌شود و به شیوه خمیدگی رو به داخل ادامه می‌یابد. این در حالی است که فروریزش پوسته مربعی کوچک از ناحیه فوقانی به‌صورت تاخوردگی چهارگوش است که چین‌های آن پشت سرهم ادامه می‌یابد. شکل ۱۶ نیز نمودار نیرو-جابجایی فروریزش این

تحلیل تجربی و عددی کماتش و کنترل میزان جذب انرژی ضربه‌گیرهای دوجداره مربعی تحت بارگذاری محوری شبه‌استاتیک و دینامیک



شکل ۱۵. مراحل فروریزش محوری پوسته مربعی بزرگ و کوچک

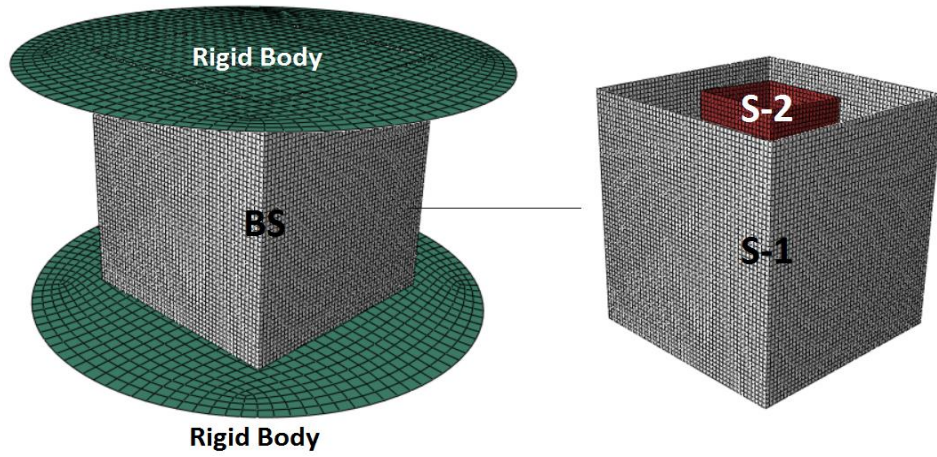


شکل ۱۶. نمودار نیرو-جابجایی فروریزش پوسته مربعی (الف) بزرگ و (ب) کوچک تحت بارگذاری محوری

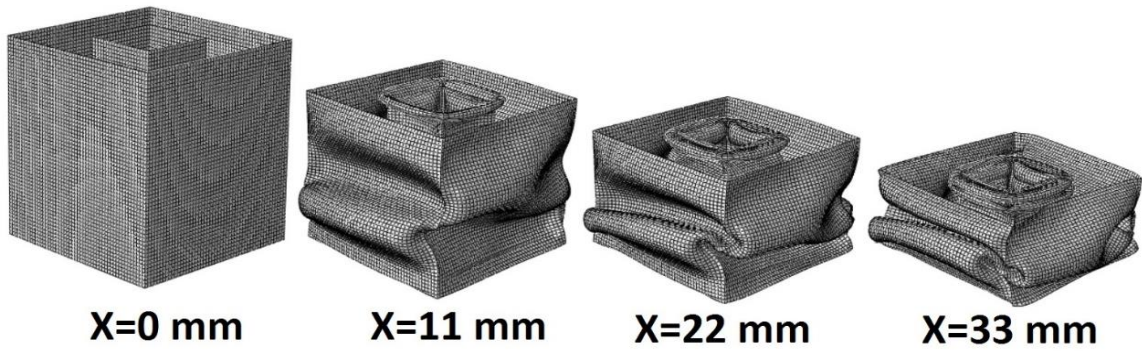
شکل ۱۸، مراحل فروریزش پوسته مربعی دوجداره را تحت اثر بارگذاری شبه‌استاتیک نشان می‌دهد. شکل ۱۹ نیز نمودار نیرو-جابجایی فروریزش نمونه مربعی دوجداره را نشان می‌دهد. به‌طور کلی، در این فروریزش، نیرو با تشکیل چین داخلی و خارجی به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد در نتیجه، منحنی نیرو-جابجایی فروریزش همواره به صورت تناوبی است.

۲-۲-۵. نتایج شبیه‌سازی عددی فروریزش لوله‌های دوجداره  
شکل ۱۷، هندسه پوسته مربعی دوجداره را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل سه‌بعدی نیز برای فروریزش پوسته‌های مربعی دوجداره در نظر گرفته شده است.

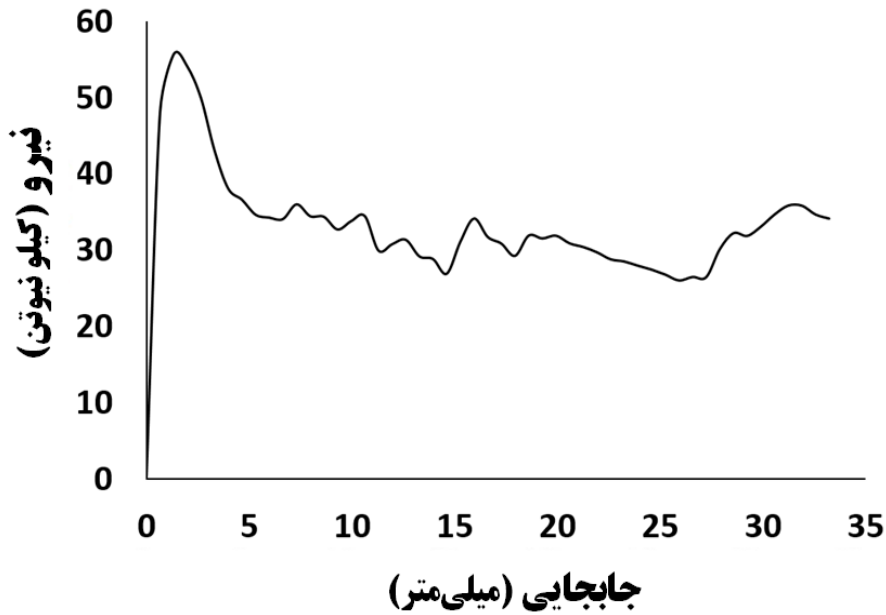




شکل ۱۷. شمایی از هندسه پوسته مربعی دوجداره



شکل ۱۸. مراحل فروریزش پوسته مربعی دوجداره مربعی تحت بارگذاری محوری



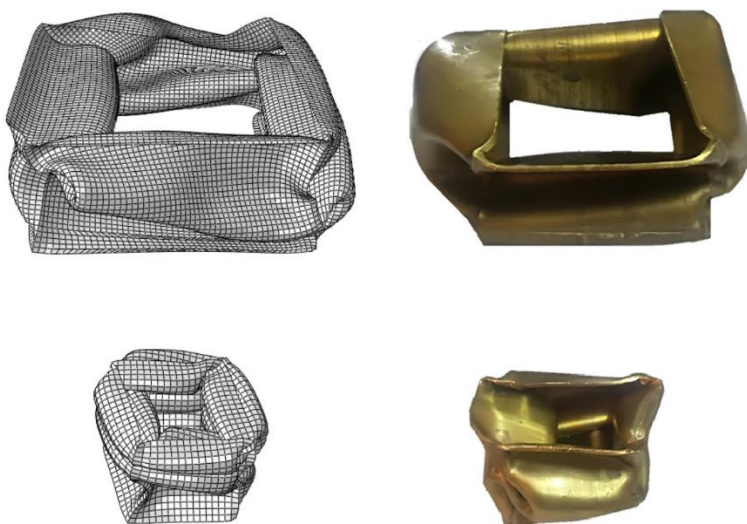
شکل ۱۹. نمودار نیرو- جابه‌جایی فروریزش پوسته مربعی دوجداره تحت بارگذاری محوری

## ۶. مقایسه نتایج تجربی با شبیه‌سازی عددی

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.

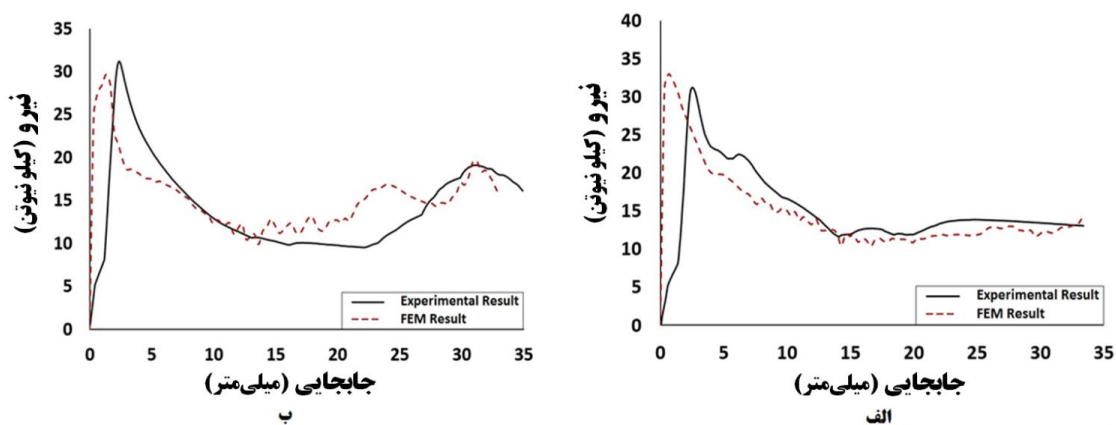
## ۶-۱. نمونه‌های مربعی تک‌جداره

شکل ۲۰، فروریزش نمونه مربعی تک‌جداره را در حالت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نحوه فروریزش در هر دو نمونه مربعی در حالت شبیه‌سازی و تجربی مشابه است.



شکل ۲۰. مقایسه هندسه فروریزش نمونه‌های مربعی تک‌جداره براساس نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی

شکل ۲۱، نمودار نیرو-جابجایی فروریزش نمونه‌های مربعی تک‌جداره را براساس نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، روند تغییر نیرو و شبیه‌سازی نیز در هر دو نمودار مشابه تجربی است.



شکل ۲۱. مقایسه نمودار نیرو-جابجایی پوسته مربعی تک‌جداره (الف) بزرگ و (ب) کوچک در حالت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی

فروریزش پوسته مربعی تک‌جداره تحت اثر بارگذاری شبه‌استاتیک به یکدیگر نزدیک است. در تحقیق حاضر، خطای ناشی از انرژی جذب شده شبیه‌سازی نسبت به

مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی پوسته مربعی تک-جداره در جدول ۴ نشان داده شده است. مقایسه این مقادیر نشان می‌دهد که نتایج تجربی و شبیه‌سازی



آزمایشگاهی در بدترین حالت در حدود ۳٪ است که مربوط به نمونه مربعی کوچک است.

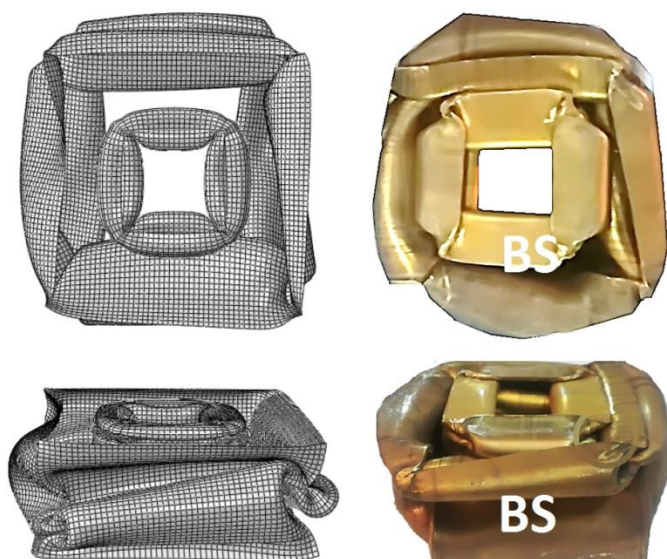
جدول ۴. مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی و تجربی پوسته مربعی تک‌جداره تحت اثر بارگذاری محوری

نوع پوسته مربعی	نتایج براساس	اولین بیشینه نیرو (کیلو نیوتن)	انرژی جذب‌شده (ژول)	متوسط نیروی فروریزش (کیلو نیوتن)	جذب انرژی ویژه (ژول بر گرم)
بزرگ	شبیه‌سازی	۳۲/۹	۵۰۱	۱۵/۱۸	۵/۳۶
	آزمایشگاهی	۳۱/۲	۵۰۳	۱۵/۲۴	۵/۳۸
کوچک	شبیه‌سازی	۲۹/۸	۴۸۹	۱۴/۸۱	۱۳/۰۷
	آزمایشگاهی	۳۱/۱	۴۷۶	۱۴/۴۲	۱۲/۷۲

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در حین فروریزش پوسته مربعی دوجداره، به دلیل فاصله اندک بین پوسته‌های داخلی و خارجی، پوسته خارجی در بین چین‌های پوسته داخلی (سطح مقطع کوچک) نفوذ می‌کند.

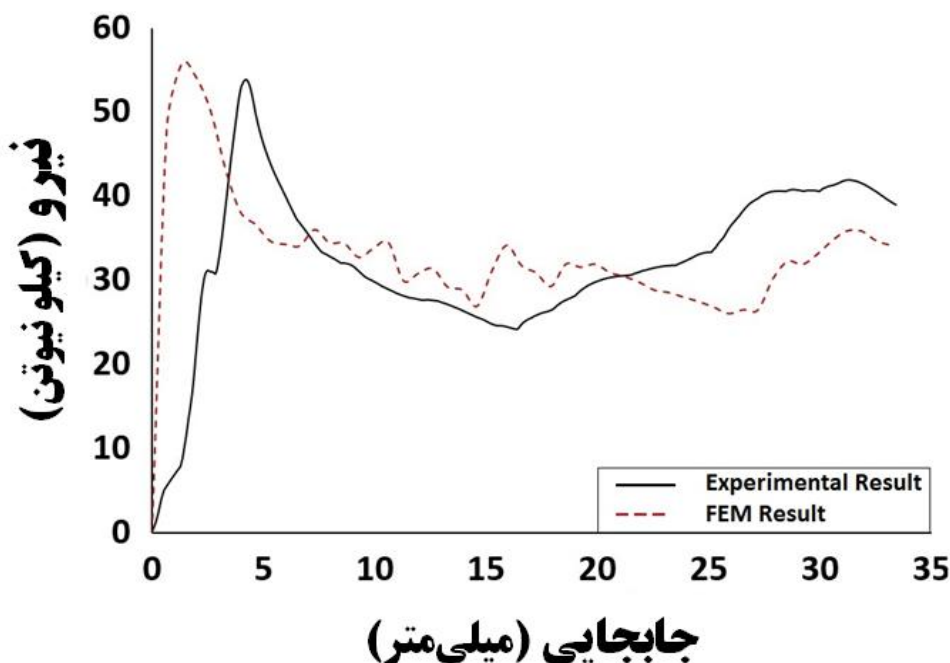
## ۶-۲. نمونه‌های مربعی دوجداره

شکل ۲۲، فروریزش نمونه مربعی دوجداره آزمایشگاهی و شبیه‌سازی را تحت اثر بارگذاری محوری نشان می‌دهد.



شکل ۲۲. مقایسه هندسه فروریزش نمونه مربعی دوجداره براساس نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی

شکل ۲۳، نمودار نیرو-جاب‌جایی فروریزش نمونه مربعی دوجداره را در حالت تجربی و مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، روند تغییر نیرو نمونه‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی مشابه است.



شکل ۲۳. مقایسه نمودار نیرو-جابجایی نمونه دوجداره مربعی در حالت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی

مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی پوسته مربعی دوجداره در جدول ۵ آورده شده است. در تحقیق حاضر، خطای ناشی از انرژی جذب‌شده شبیه‌سازی پوسته مربعی دوجداره نسبت به آزمایشگاهی در حدود ۴٪ است.

جدول ۵. مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی و تجربی پوسته مربعی دوجداره تحت اثر بارگذاری محوری

نوع هندسه پوسته	نتایج براساس	اولین پیشینه نیرو (کیلو نیوتن)	انرژی جذب‌شده (ژول)	متوسط نیروی فروریزش (کیلو نیوتن)	جذب انرژی ویژه (ژول بر گرم)
دوجداره	شبیه‌سازی	۵۵/۵	۱۰۹۱	۳۳/۰۶	۸/۳۴
مربعی	آزمایشگاهی	۵۳/۷	۱۱۳۳	۳۴/۳۳	۸/۶۶

#### ۷. بررسی پارامتری

بررسی آزمایشگاهی پارامترهای مختلف بر نحوه فروریزش پوسته‌های مربعی تحت اثر بارگذاری محوری، مستلزم انجام تعداد زیادی آزمایش و صرف هزینه و زمان زیادی است. لذا، جهت صرف‌جویی در زمان و هزینه، از مدل عددی صحت‌گذاری شده برای بررسی پارامترهای مختلف بر نحوه فروریزش پوسته‌های مربعی دوجداره

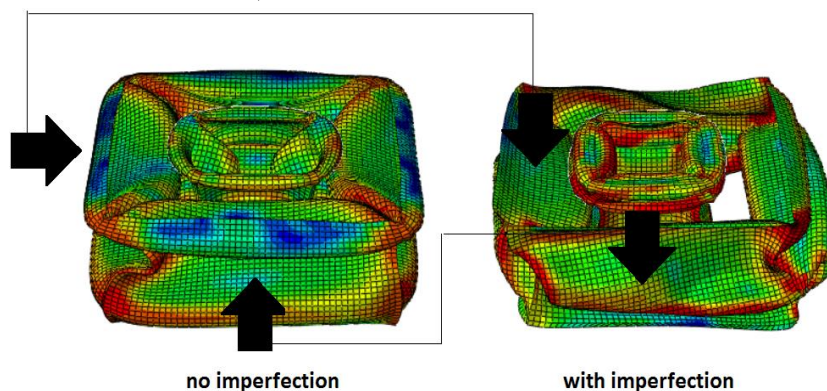
وجود عیوب و نقص اولیه در نمونه‌ها، عدم مطابقت دقیق بین شرایط مرزی اعمال شده در آزمایش و نرم‌افزار المان محدود و خطای حسگر موجود در دستگاه آزمایش از جمله عواملی هستند که باعث اختلاف در پیشینه نیروها و میزان انرژی جذب‌شده پوسته مربعی (تک-جداره و دوجداره) در حالت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی می‌شود.

استفاده می‌شود.

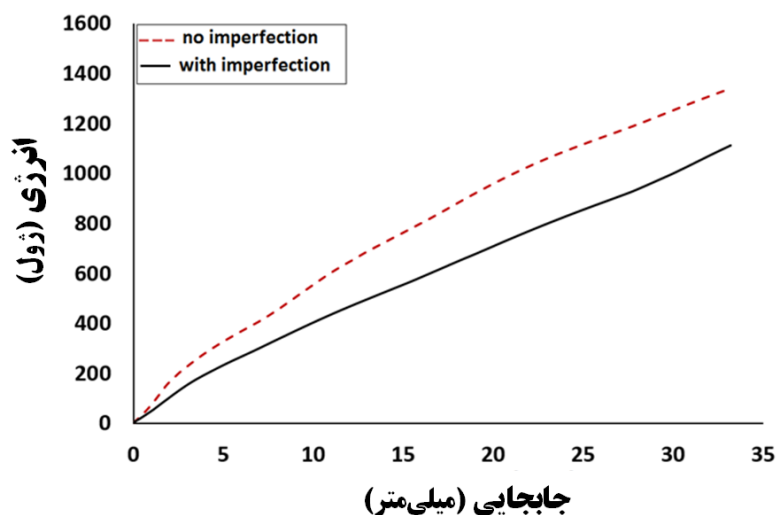
بود. مقایسه نمودار انرژی جذب شده- جابه‌جایی فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای همراه با عیوب هندسی و بدون آن در شکل ۲۵ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هر نقطه از جابه‌جایی، تفاوتی بین منحنی‌ها وجود دارد که علت آن در بیشتر بودن بیشینه و کمینه نیروها در منحنی نیرو- جابه‌جایی است. با این حال، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که عیوب هندسی علاوه بر تغییر شیوه فروریزش پوسته‌های مربعی دوجداره برنجی، بر انرژی جذب شده آن نیز مؤثر است. بنابراین، در ادامه تحقیق، به منظور تحلیل دقیق‌تر رفتار فروریزشی محوری پوسته‌های مربعی دوجداره، تمامی پارامترهای مورد بررسی بدون در نظر گرفتن عیوب هندسی انجام می‌شود.

### ۷-۱. اثر عیوب هندسی

در این بخش، اثر عیوب هندسی ناشی از برآمدگی موجی سطح دیواره پوسته مربعی دوجداره بر فروریزش آن بررسی می‌شود. برای این منظور، مطابق شکل ۱۳، عیوب هندسی در پوسته‌های مربعی کوچک و بزرگ به ترتیب برای مود هفتم و دهم کمانش و برابر درصدی از ضخامت آن در نظر گرفته شده است. این عیوب مطابق شکل ۲۴ سبب فروریزش چهارگوش نامتقارن پوسته مربعی دوجداره می‌شود. این در حالی است که اگر در سازه جدارنازک مقدار این عیوب هندسی اندک باشد، آن‌گاه فروریزش به صورت چهارگوش متقارن خواهد



شکل ۲۴. اثر عیوب هندسی بر فروریزش پوسته مربعی دوجداره برنجی با و بدون عیوب هندسی



شکل ۲۵. اثر عیوب هندسی بر نمودار انرژی- جابه‌جایی پوسته دوجداره برنجی تحت بارگذاری محوری

## ۷-۲. اثر سرعت و جرم بر ضریب شدت

### (افزایشی) دینامیک

ضریب شدت دینامیک برابر نسبت انرژی جذب شده تحت اثر بارگذاری دینامیک بر انرژی جذب شده تحت اثر بارگذاری شبه‌استاتیک است. این ضریب در طراحی ضربه‌گیرهای فروریزی بسیار اهمیت دارد که برای بررسی اثر دینامیک بر تحلیل‌های استاتیک بدون نیاز به انجام آزمایش‌های دینامیک استفاده می‌شود.

در نرم‌افزار المان محدود، برای شبیه‌سازی دینامیک فروریزش پوسته‌های مربعی دوجداره، اثر نرخ کرنش پوسته مربعی با استفاده از مدل کوپر<sup>۱</sup> - سایموند به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{pl} &= D \left( \frac{\dot{\sigma}_0}{\sigma_0} - 1 \right) \varphi_0 \\ &\geq \sigma_0 \end{aligned} \quad (4)$$

که در آن  $\dot{\sigma}_0$  نرخ تنش سیلان دینامیک<sup>۲</sup>،  $\dot{\varepsilon}_{pl}$  نرخ کرنش پلاستیک محوری،  $\sigma_0$  تنش سیلان استاتیک<sup>۳</sup> و  $D$  و  $q$  پارامترهای ماده برنجی هستند. بنابراین، در شبیه‌سازی دینامیک فروریزش پوسته‌های مربعی، خواص مکانیکی پوسته برنجی با نقاط تنش حقیقی - کرنش پلاستیک و ثابت‌های رابطه ۱ به نرم‌افزار المان محدود معرفی می‌شود. در این شبیه‌سازی، ثابت‌های  $D$  و  $q$  به ترتیب برابر ۴۷۲۲۰۰ و ۴/۴۴۶ بر ثانیه است که در مطالعات پیشین برای فروریزش دینامیک پوسته‌های استوانه‌ای برنجی استفاده شده است (آذرخش و همکاران، ۲۰۱۵).

در این بخش، جرم برخورد کننده ۵۰ و ۱۰۰ کیلوگرم و محدوده سرعت ۱۰ و ۲۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است تا انرژی جنبشی کافی برای فروریزش

پوسته‌های دوجداره مربعی فراهم شود. اثر سرعت برخورد بر پوسته‌های مربعی دوجداره برای جرم‌های مختلف در شکل ۲۶ آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، در هر مورد، افزایش سرعت برخورد باعث افزایش ضریب شدت دینامیک می‌شود. یکی از دلایل افزایش ضریب افزایشی دینامیک تحت اثر تأثیر سرعت برخورد، اثر نرخ کرنش ماده برنجی بر پاسخ دینامیک فروریزش پوسته‌های مربعی دوجداره است.

با رجوع به شکل ۲۶ می‌توان دریافت که ضریب شدت دینامیک برای پوسته‌های مربعی دوجداره با کاهش ارتفاع پوسته بیشتر می‌شود. همان طور که مشاهده می‌شود، این ضریب در محدوده‌هایی از منحنی‌ها برای سرعت ۱۰ متر بر ثانیه تقریباً ثابت است. یکی از دلایل این امر ناشی از چین چهارگوش متقارن یکنواخت در بارگذاری دینامیک و شبه‌استاتیک است. به عبارت دیگر، در محدوده‌ای از نمودار نیرو- جابه‌جایی فروریزش پوسته‌های مربعی دوجداره به دلیل تشکیل چین‌های چهارگوش متقارن روند ثابتی مشاهده می‌شود. همچنین، بیشترین افزایش ضریب شدت دینامیک در انتهای جابه‌جایی پوسته‌های مربعی دوجداره تحت اثر سرعت-های ۱۰ و ۲۰ متر بر ثانیه به ترتیب در حدود ۲/۷ و ۴/۹ است.

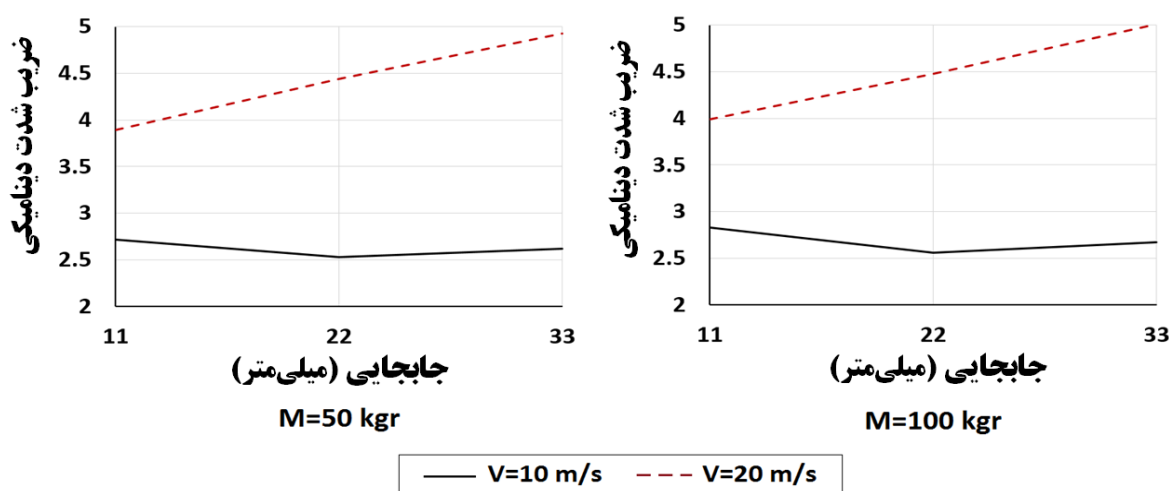
همان طور که در شکل ۲۶ ملاحظه می‌شود، افزایش جرم برخورد کننده اثر قابل توجهی بر نمودار نیرو- جابه‌جایی فروریزش پوسته‌های مربعی دوجداره ندارد. به عبارت دیگر، جرم برخورد کننده جزء پارامترهای ظاهری به شمار می‌آیند که ممکن است تأثیری در طراحی پوسته مربعی دوجداره نداشته باشد.

<sup>3</sup>. static flow stress

<sup>1</sup>- Cowper- Symonds

<sup>2</sup>. dynamic flow stress

تحلیل تجربی و عددی کمانش و کنترل میزان جذب انرژی ضربه‌گیرهای دوجداره مربعی تحت بارگذاری محوری شبه‌استاتیک و دینامیک



شکل ۲۶. اثر سرعت و جرم برخورد بر ضرب شدت دینامیک برای پوسته‌های مربعی دوجداره برنجی

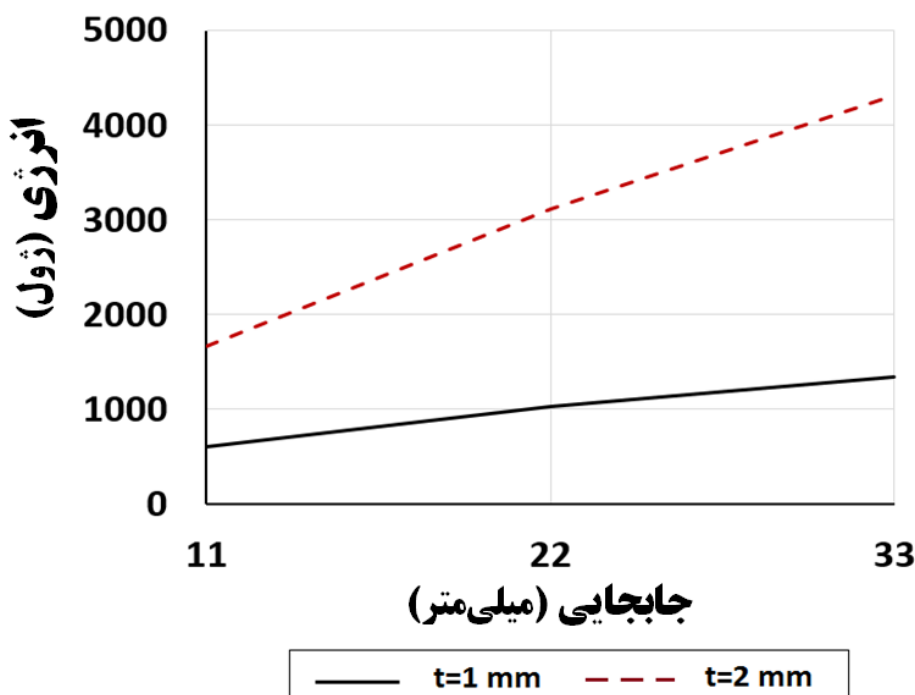
دوجداره برابر ۱ و ۲ میلی‌متر انتخاب شده است.

شکل ۲۷، اثر ضخامت را بر انرژی جذب فروریزش پوسته‌های مربعی در طول جابه‌جایی مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود، با افزایش ضخامت، میانگین مقدار انرژی افزایش قابل توجهی می‌یابد. در این مطالعه، انرژی جذب شده فروریزش محوری پوسته دوجداره مربعی با ضخامت ۲ میلی‌متر در حدود ۲/۷ برابر ضخامت ۱ میلی‌متر است.

### ۳-۷. اثر ضخامت

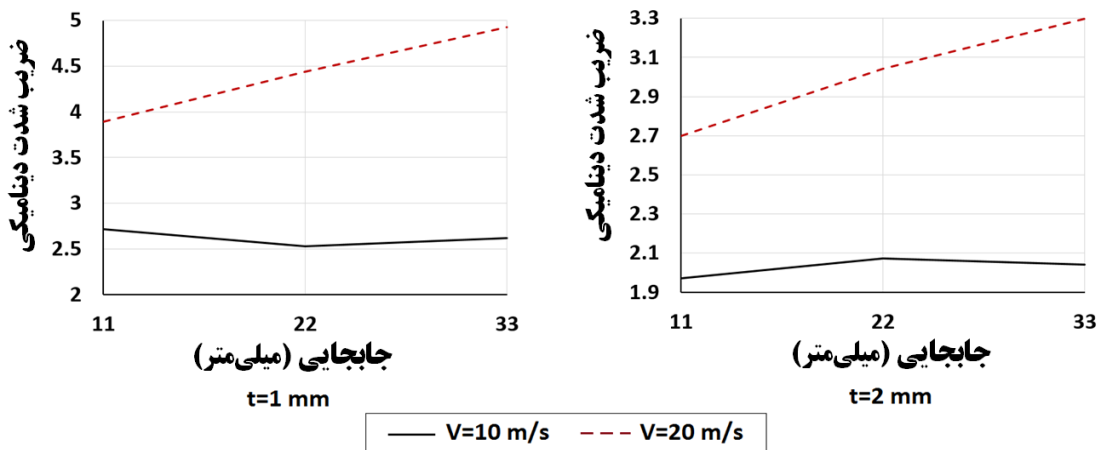
#### ۳-۷-۱- اثر ضخامت بر میزان انرژی جذب شده

پوسته دوجداره تحت بارگذاری شبه‌استاتیک در این بخش، اثر ضخامت بر میزان انرژی جذب شده پوسته دوجداره تحت بارگذاری محوری شبه‌استاتیک مورد بررسی قرار گرفته است. ضخامت نمونه‌های مربعی



شکل ۲۷. اثر ضخامت بر انرژی جذب شده فروریزش محوری شبه‌استاتیک پوسته‌های دوجداره مربعی

ضخامت اثر محسوسی بر روند افزایشی ضریب شدت دینامیک ندارد. اما مقادیر آن با افزایش ضخامت کاهش می‌یابد. این امر مطابق شکل ۲۸ به دلیل افزایش قابل توجه انرژی جذب شده پوسته دوجداره مربعی (با ضخامت ۲ میلی‌متر) در حالت شبه‌استاتیک است.



شکل ۲۸. اثر ضخامت بر ضریب شدت دینامیک فروریزش پوسته‌های دوجداره مربعی

## ۸. نتیجه‌گیری

به طور خلاصه، با توجه به نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی و همچنین شبیه‌سازی‌های عددی ارائه شده در این پژوهش، می‌توان موارد زیر را بیان کرد:

- بیشینه نیروی فروریزش پوسته تک‌جداره با سطح مقطع بزرگ و کوچک بسیار نزدیک به یکدیگر است. بنابراین، نتیجه می‌شود که با افزایش سطح مقطع لوله تک‌جداره، انرژی جذب شده بدون تغییر نیروی اولیه افزایش می‌یابد.
- انرژی جذب شده لوله دوجداره مربعی در حدود ۱۶٪ بیشتر از مجموع انرژی لوله‌های تک‌جداره آن است.
- بیشینه نیروی فروریزش لوله دوجداره در حدود ۱۴٪ کمتر از مجموع بیشینه نیروی لوله‌های تک‌جداره تشکیل‌دهنده آن است. بنابراین، استفاده از ترکیب لوله‌ها (دوجداره) برای کاهش شوک پیشنهاد می‌شود.
- وزن نمونه تک‌جداره با سطح مقطع بزرگ در حدود ۲/۵ برابر نمونه کوچک است و از طرف دیگر، انرژی جذب شده آن‌ها تقریباً برابر است. لذا، جذب انرژی ویژه نمونه تک‌جداره با سطح مقطع کوچک بیشتر از نمونه بزرگ است. این مقدار افزایش در حدود ۵۸٪ است.
- جذب انرژی ویژه لوله دوجداره ۱۴٪ بیشتر از مجموع لوله‌های تک‌جداره تشکیل‌دهنده آن است. بنابراین، استفاده از ترکیب لوله‌ها نسبت به استفاده مجزای آن پیشنهاد می‌شود.
- وجود عیوب هندسی در نمونه‌ها سبب فروریزش چهارگوش نامتقارن می‌شود. این در حالی است که اگر در نمونه مقدار این عیوب هندسی اندک باشد، آن‌گاه فروریزش به صورت چهارگوش متقارن خواهد بود.
- یکی از دلایل افزایش ضریب افزایشی دینامیک تحت اثر افزایش سرعت برخورد، اثر نرخ کرنش ماده برنجی بر پاسخ دینامیک فروریزش پوسته‌های دوجداره است.

- افزایش جرم برخورد کننده اثر قابل توجهی بر نمودار نیرو- جابه‌جایی (جذب انرژی) پوسته‌های دوجداره ندارد.
- انرژی جذب شده پوسته دوجداره با ضخامت ۲ میلی‌متر (تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی) در حدود ۲/۷ برابر انرژی جذب شده پوسته با ضخامت ۱ میلی‌متر است.
- با افزایش ضخامت از ۱ به ۲ میلی‌متر، ضریب افزایشی دینامیک کاهش می‌یابد. این امر به دلیل افزایش قابل توجه انرژی جذب شده پوسته دوجداره در حالت شبه‌استاتیکی (برای ضخامت ۲ میلی‌متر) است.

## ۹. مراجع

- آذرخش، س.، رهی، ع.، دریکوندی، س. و قمریان، ع. ۱۳۹۶. "تحلیل تجربی و عددی رفتار فروریزش محوری و مایل لوله‌های دوجداره مخروطی تحت شرایط مرزی دوسرگیردار". دانش و فناوری هوافضا، ۶(۱): ۶۷-۷۹.
- رضوانی، م. ج.، نگهبان واشقانی، ن. و دامغانی نوری، م. ۱۳۹۵. "بررسی تجربی و شبیه‌سازی عددی جذب انرژی در لوله استوانه‌ای پر شده از فوم پلی‌اورتان با استفاده از آغازگر". مجله مدل‌سازی در مهندسی، ۱۴(۴۴): ۶۹-۷۸.
- علوی نیا، ع. و خدابخش، ح. ۱۳۹۵. "بررسی عددی تأثیر فاصله‌ی لوله‌های جدارنازک متداخل بر رفتار مکانیکی و جذب انرژی آن‌ها". مجله مدل‌سازی در مهندسی، ۱۴(۴۵): ۳۳-۴۷.
- پیرمحمد، س. و اسماعیلی مرزدشتی، س. ۱۳۹۶. "مقایسه عملکرد جذب انرژی سازه‌های چند جداره مربعی و دایروی با استفاده از روش کپراس و بهینه‌سازی سازه دایروی با استفاده از روش پاسخ سطح". مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها، ۷(۳): ۱۳۳-۱۴۷.

- Alavi Nia, A. and Haddad Hamedani, J. 2010. "Comparative analysis of energy absorption and deformations of thin walled tubes with various section geometries". *Thin-Walled Struct.*, 48: 946-954.
- Alavi Nia, A., Badnava, H. and Fallah Nejad, Kh. 2011. "An experimental investigation on crack effect on the mechanical behavior and energy absorption of thin-walled tubes". *Mater. Design*, 32: 3594-3607.
- Azarakhsh, S., Rahi, A., Ghamarian, A. and Motamedi, H. 2015. "Axial crushing analysis of empty and foam-filled brass bitubular cylinder tubes". *Thin-Walled Struct.*, 95(3): 60-72.
- Azarakhsh, S. and Ghamarian, A. 2017. "Collapse behavior of thin-walled conical tube clamped at both ends subjected to axial and oblique loads". *Thin-Walled Struct.*, 12: 1-11.
- Fan, Z., Lu, G. and Liu, K. 2013. "Quasi-static axial compression of thin-walled tubes with different cross-sectional shapes". *Eng. Struct.*, 55: 80-89.
- Reid, S. R., Reddy, T. Y. and Gray, M. D. 1986. "Static and dynamic axial crushing of foam-filled sheet metal tubes". *Int. J. Mech. Sci.*, 28: 295-322.
- Salehghaffari, S., Tajdari, M. and Mokhtarnezhad, F. 2009. "The collapse of thick-walled metal tubes with wide external grooves as controllable energy dissipating devices". *J. Mech. Eng. Sci.*, 233: 2465-2480.
- Seitzberger M., Rammerstorfer, F. G., Degischer, H. P. and Gradingner, R. 1997. "Crushing of axially compressed steel tubes filled with aluminium foam". *Acta Mech.*, 125(1-4): 93-105.
- Zhang, Y., Sun, G., Li, G., Luo, Z. and Li, Q. 2012. "Optimization of foam-filled bitubal structures for crashworthiness criteria". *Mater. Design*, 38: 99-109.

