

## تحلیل تجربی و عددی رفتار فروریزش محوری و مایل لوله‌های دوجداره مخروطی تحت شرایط مرزی دوسرگیردار

سجاد آذرخش<sup>۱</sup>، عباس رهی<sup>۲</sup>، سامان دریکوندی<sup>۳</sup>، علی قمریان<sup>۴</sup>

۱ باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک

۲ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، a\_rahi@sbu.ac.ir

۳ کارشناس ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج، سنندج

۴ باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۰۹

### چکیده

لوله‌های جدارنازک به دلیل ارزانی و وزن اندک طی سالیان متمادی به عنوان جاذب انرژی و وسائل نقلیه همچون قطار، خودرو، کشتی و جز این‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این مقاله پاسخ انرژی جذب شده لوله‌های مخروطی دوجداره تحت بارگذاری محوری و مایل بررسی شده است. در مطالعه آزمایشگاهی لوله‌های دوجداره مخروطی آلومینیمی به روش چرخ کاری ساخته شده‌اند. لوله‌های دوجداره از هر دو انتها ثابت شده و بین دو صفحه صلب تحت اثر بارگذاری شبه‌استاتیک قرار گرفته‌اند و بار محوری و مایل با اعمال نیرو به انتهای بخش فوقانی نمونه‌ها اعمال می‌شود. سپس نحوه فروریزش نمونه، تغییرات نیرو و مقدار انرژی لازم تعیین می‌شود. مدلی برای شبیه‌سازی فرایند فروریزش با استفاده از تحلیل اجزای محدود ارائه و اثر رفتار غیرخطی مواد، تماس و تغییر شکل بزرگ در این شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مدل ارائه شده برای تعیین پاسخ فروریزش و تعیین نمودار نیرو - جابه‌جایی و میزان انرژی جذب شده مناسب است. از مدل صحنه‌گذاری شده برای بررسی پارامتری چون شرایط تکیه‌گاهی و زاویه بارگذاری استفاده شده است. نتایج این مطالعه به‌وضوح مزیت استفاده از لوله‌های مخروطی دوجداره را به عنوان جاذب نشان می‌دهد.

### واژگان کلیدی

لوله‌های مخروطی گیردار، بارگذاری محوری و مایل، جذب انرژی، روش اجزای محدود

## ۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر همراه با توسعه صنعتی، تقاضا برای ایمنی در سازه‌های رایج مانند خودروها، نرده‌های محافظ بزرگراه‌ها، آسانسورها، هواپیماها و کشتی‌ها روبه افزایش بوده است. برخورد تجهیزات متحرک و توقف آنها در مدت زمانی کوتاه، گاهی موجب اعمال شتاب بیش از حد و تخریب تجهیزات و یا صدمه جانی به سرنشینان می‌شود. مهندسان و طراحان، طراحی سازه‌های تضعیف‌کننده شدت ضربه و مستهلک‌کننده انرژی را با هدف کاهش این آسیب‌ها انجام می‌دهند [۱].

جاذب‌های انرژی، با هدف اتلاف انرژی جنبشی ناشی از ضربه‌های کوچک و اتلاف تمام یا بخشی از انرژی جنبشی در ضربه‌های بزرگ، به دو نوع برگشت‌پذیر و برگشت‌ناپذیر تقسیم می‌شوند [۲]. ضربه‌گیرها، انرژی جنبشی را به دیگر انواع انرژی تبدیل می‌کنند. در این سیستم‌ها، انرژی جنبشی صرف غلبه بر اصطکاک، تغییر شکل پلاستیک یا شکست در قطعات می‌شود [۳]. انرژی مستهلک‌شده در محدوده رفتار الاستیک سازه، ناچیز است، اما وقتی نیروهای بزرگی به سازه اعمال می‌شود، تغییر شکل‌های بزرگی در سازه ایجاد می‌گردد. این‌گونه بارگذاری‌ها موجب ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک در نقاطی از سازه می‌شوند [۴]. فرایند تغییر شکل پلاستیک در یک جاذب انرژی به اندازه و نوع بارگذاری، نرخ بارگذاری، الگوی تغییر شکل، خواص ماده و موارد دیگری چون شرایط تکیه‌گاهی بستگی دارد. برای یک جاذب انرژی بازگشت‌ناپذیر که تحت بارگذاری‌های مختلف مانند بارگذاری محوری، عرضی و مایل قرار می‌گیرد، سازوکار تغییر شکل پلاستیک متعددی به‌منظور تخمین میزان انرژی جذب‌شده آن ارائه شده است که از متداول‌ترین آنها می‌توان به مچالگی محوری [۵]، وارونگی [۶]، پهن‌شدگی جانبی [۷] و پارگی محوری [۸] اشاره کرد.

تاکنون مباحث متنوعی پیرامون روش‌های حل عددی ضربه‌گیرهای فروریزشی مطرح شده است. اما آنچه مسلم است، اهمیت و گسترش روش‌های تجربی در طراحی و تحلیل چگونگی فروریزش ضربه‌گیرهاست و هنوز نیز محققان، تلاش‌های زیادی را برای شناخت ماهیت فروریزش جاذب‌های انرژی به روش تجربی به‌کار می‌برند.

پوسته‌های مخروطی از جمله سازه‌های جدارنازک هستند که به‌دلیل صرفه اقتصادی، وزن پایین و کارآمدی در گستره وسیعی

از صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرند، لذا بررسی رفتار آنها تحت بارگذاری محوری و مایل دارای اهمیت بسیاری است که در همین راستا، مطالعاتی روی آنها صورت گرفته است.

گوپتا و عباس (۲۰۰۰) رفتار فروریزش<sup>۱</sup> متقارن محوری مخروط ناقص تحت اثر بارگذاری محوری را تحلیل کردند [۹]. در مدل ارائه‌شده توسط این محققان تغییرات کرنش جانبی در لحظه تغییر شکل چین‌ها لحاظ شده است. همچنین در این مدل برخلاف مدل‌های پیشین بین چین آغازین و چین‌های دیگر تفاوت وجود دارد. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند اولین چین ایجادشده در فروریزش نمونه مخروطی تحت اثر بارگذاری محوری به‌صورت مستقیم باقی می‌ماند، لذا انرژی که در اثر خمیدگی بخش کوچکتر چین آغازین پدید می‌آید، تنها در لحظه اتصال دو بخش چین به هم جذب می‌شود. گوپتا و ونکاش (۲۰۰۷) در پژوهشی با عنوان مطالعه آزمایشگاهی و عددی پوسته‌ی مخروطی جدارنازک تحت اثر بارگذاری محوری بارگذاری پوسته مخروطی آلومینیومی برای زاویه نیم‌رأس و نسبت قطر به ضخامت متفاوت را بررسی کردند [۱۰]. از آزمایش نمونه‌های مخروطی تاریخچه تغییر شکل، منحنی نیرو - جابه‌جایی، منحنی انرژی - جابه‌جایی و متوسط بار فروریزش به‌دست آمد. در مدل شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار اجزای محدود نوع ماده پلاستیک صلب انتخاب شد که تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت.

میرفندرسکی و همکاران (۲۰۰۸) به بررسی رفتار فروریزش پوسته‌های مخروطی توخالی و پر شده از فوم با سطح مقطع مستطیلی تحت بارگذاری شبه‌استاتیک و دینامیک پرداختند و نتایج را با موارد آزمایشگاهی و حل تئوری مقایسه کردند [۱۱]. ایسوارا پراساد و گوپتا (۲۰۰۵) به مطالعه آزمایشگاهی رفتار پوسته‌های نیمه‌کروی و مخروطی تحت اثر بارگذاری دینامیکی در سرعت‌های متفاوت پرداختند [۱۲]. در این پژوهش شیوه فروریزش و منحنی تغییرات نیرو - جابه‌جایی و جذب انرژی - جابه‌جایی نمونه‌هایی با هندسه نیمه‌کروی و مخروطی ناقص بررسی و با هم مقایسه شده است. احمد و تامبیراتنام (۲۰۰۹) در پژوهشی با عنوان فروریزش لوله‌های مخروطی تقویت‌شده با فوم آلومینیومی تحت بارگذاری شبه‌استاتیک تأثیر پارامترهای مهم مانند ضخامت دیواره، زاویه نیم‌رأس و دانسیته فوم بر فروریزش لوله‌های مخروطی تقویت‌شده با فوم را بررسی کردند [۱۳]. نتایج

و آزمایشگاهی پوسته‌های مخروطی و استوانه‌ای با درپوش نیمه‌کروی و تقویت‌شده با فوم پلی‌یورتان پرکننده را مطالعه کرده‌اند. در این تحقیق‌ها اثر پارامترهای ابعادی مؤثر بر فرایند فروریزش پوسته‌های متقارن محوری با درپوش نیمه‌کروی نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

در ادامه مطالعات انجام‌شده، مقاله حاضر به بررسی پاسخ انرژی جذب‌شده لوله‌های مخروطی دوجداره تحت بارگذاری محوری و مایل می‌پردازد. لوله‌های دوجداره مخروطی از هر دو انتها ثابت شده‌اند و بار مایل با اعمال نیرو به انتهای بخش فوقانی نمونه‌ها محقق می‌شود. شبیه‌سازی عددی برای مطالعه مشخصات انرژی جذب‌شده لوله‌های دوجداره مخروطی انجام شده است که برای صحت‌گذاری این نتایج عددی تست‌های فشاری محوری و مایل تعریف شده است. بنابراین نمودار نیرو - جابه‌جایی و سازوکار تغییرشکل این سازه‌ها تحت بارگذاری محوری و مایل توصیف شده است. تطابق قابل قبولی بین نتایج عددی و تجربی مشاهده می‌شود. از مدل صحت‌گذاری‌شده برای بررسی پارامتری مانند شرایط تکیه‌گاهی و زاویه بارگذاری استفاده می‌شود.

## ۲. مطالعه آزمایشگاهی

### ۲-۱. نمونه‌های مخروطی

در مطالعه آزمایشگاهی، پوسته‌های مخروطی آلومینیومی (سری ۱۰۵۰) با روش چرخ‌کاری دستی ساخته شده است. در این فرایند، ورق مسطح در اثر تماس ابزار روی سطح قالب شکل داده می‌شود، به طوری که ورق همراه با قالب دوران می‌کند. ابزار - که به شکل اهرم یا غلتک است - به صورت محوری یا شعاعی حرکت داده می‌شود و تغییر شکل پلاستیک در اثر تماس نقطه‌ای و با اعمال نیرو به ورق ایجاد می‌شود. از اصلی‌ترین معایب ساخت نمونه مخروطی با استفاده از این روش، تغییر ضخامت و تغییر شکل سطحی آن است که برآمدگی یا تغییر شکل موجی نیز خوانده می‌شود. شکل ۱ هندسه نمونه‌های مخروطی دوجداره ساخته‌شده به روش چرخ‌کاری را همراه با شرایط مرزی نشان می‌دهد. این نمونه‌ها از دو گرده آلومینیومی به قطر ۱۵۰ و ۷۰ میلی‌متر ساخته شده‌اند. بررسی ابعادی نشان می‌دهد که قطر بزرگ پایینی هندسه‌های مخروطی بیرونی و داخلی ساخته‌شده به ترتیب  $60 \pm 0.4$  و  $40 \pm 0.5$  میلی‌متر است که دارای ارتفاع کل  $55 \pm 0.3$  میلی‌متر و زاویه نیم‌راس ۵ درجه هستند. ضخامت گرده

نشان داد لوله‌های مخروطی تقویت‌شده با فوم قابلیت جذب انرژی فروریزش را به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌دهند. این دو محقق در همین سال مقاله‌ای دیگر با عنوان پاسخ دینامیکی و انرژی جذب‌شده لوله‌های مخروطی تقویت‌شده با فوم آلومینیومی ارائه کردند [۱۴] و در آن با مقایسه نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود با نتایج آزمایشگاهی پیشین، اثر پارامترهای هندسی و نوع ماده را روی لوله‌های مخروطی تقویت‌شده با فوم تحت بارگذاری دینامیکی بررسی کردند. این محققان همچنین رفتار لهیدگی و جذب انرژی پوسته‌های مخروطی پرشده از فوم تحت بار ضربه‌ای مایل را بررسی نمودند [۱۵]. مطالعه آنها به منظور تعیین مقدار جذب انرژی توسط پوسته‌های مخروطی خالی و تقویت‌شده با فوم، تحت بار دینامیکی برای متغیر اعمال نیرو و هندسه‌های مختلف پوسته انجام شده است. آنها دریافتند چون پوسته‌های مخروطی پرشده از فوم قادر به تحمل بار ضربه‌ای مایل با حداقل کاهش در جذب هستند، می‌توانند به عنوان سازه‌های مؤثر در جذب انرژی به کار روند. همچنین ضخامت پوسته روی نیروی متوسط لهیدگی و در پی آن، روی جذب انرژی تأثیر زیادی دارد.

شریعی و الله‌بخش (۲۰۱۰) کماتش و پس کماتش پوسته‌های نیمه‌کروی تحت بارگذاری‌های مختلف را به صورت عددی و تجربی مطالعه و مشاهده کردند که وقتی بار فشاری توسط یک صفحه صلب به نیم‌کره اعمال شود، نسبت به حالتی که توسط یک میله به آن بار اعمال می‌شود، نیم‌کره می‌تواند بار کماتش بالاتری را تحمل کند [۱۶].

قمریان و زارعی (۲۰۱۲) به بررسی پارامتری رفتار فروریزش پوسته‌های مخروطی و استوانه‌ای سربسته تحت بارگذاری محوری پرداختند [۱۷]. این محققان ضمن بررسی ابعادی پوسته‌های متقارن محوری شامل ضخامت، زاویه نیم‌راس، قطر و ارتفاع، پوسته را با توجه به حداکثر میزان جذب انرژی ویژه آن برای مقدار مشخص لهیدگی به کمک روش صفحه پاسخ بهینه نمودند. قمریان و همکاران (۲۰۱۱) همچنین به طور عددی و تجربی کماتش پوسته‌های مخروطی با و بدون فوم را مطالعه و مشاهده کردند که در مقایسه مخروط و استوانه در تست له‌شوندگی، جذب انرژی پوسته استوانه‌ای بدون فوم به مقدار  $18/4$  درصد کمتر از پوسته مخروطی است و پوسته مخروطی با فوم در مقایسه با پوسته استوانه‌ای، بازده جذب انرژی بیشتری را به همراه دارد [۱۸]. در سال‌های اخیر نیز، این محققان [۱۹-۲۱] تحلیل عددی

اولیه آلومینیومی مورد استفاده برای تولید این هندسه‌ها ۱ میلی‌متر بوده است که حداکثر مقدار کاهش ضخامت (ناشی از ساخت آن به روش چرخ‌کاری) در حدود ۰/۱۵ میلی‌متر و در انتهای تحتانی هندسه مخروطی مشاهده شده است.



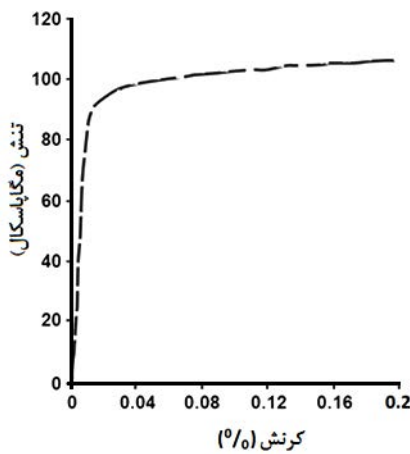
شکل ۱. نمای از الف) پوسته مخروطی دوجداره به همراه فیکسچر آزمایش، ب) شرایط مرزی گیردار محوری و زاویه‌دار

در تحقیق حاضر، مطابق بخش الف از شکل ۱، برای برقراری شرایط مرزی دوسرگیردار تحت بارگذاری محوری از قطعه‌ای فولادی (یا اصطلاحاً فیکسچر) برای مقیدکردن قاعده‌های نمونه‌های مخروطی دوجداره استفاده شده است. در سطح این قطعه شیار هم‌قطر با هر دو قاعده بزرگ نمونه‌های مخروطی به عمق ۵ میلی‌متر تراشیده شده است تا از حرکت افقی و عمودی قاعده‌های نمونه مخروطی دوجداره طی فروریزش آن جلوگیری شود. از طرفی، این شیارها سبب تثبیت موقعیت پوسته‌های مخروطی بیرونی و داخلی نسبت به هم می‌شود. برای بررسی اثر زاویه شرایط مرزی نیز مطابق بخش ب از شکل ۱ از تجهیزات مشابه استفاده شده است؛ به طوری که قیده‌های فولادی با زاویه ۱۰ درجه نسبت به محور بارگذاری قرار داده شده‌اند.

## ۲-۲. خواص مکانیکی مواد

خواص مکانیکی مواد را می‌توان به کمک آزمایش‌های متعددی با توجه به هندسه نمونه آزمایشگاهی و شرایط بارگذاری تعیین کرد. آزمایش کشش تک‌محوری متداول‌ترین روش برای تعیین خواص مکانیکی فلزات است. در این مطالعه، برای شناسایی خواص

مکانیکی یکی از نمونه مخروطی با روش وایرکات و طبق استاندارد ASTM E8-M برش داده شده و تعداد دو نمونه استاندارد برای انجام تست کشش به آزمایشگاه مقاومت مصالح (دانشگاه صنعتی امیرکبیر) فرستاده شد. براساس این آزمایش مقادیر مدول الاستیسیته برای دو نمونه به ترتیب ۵۵/۷ و ۵۶/۲ گیگاپاسکال و استحکام تسلیم هر یک به ترتیب ۸۳ و ۸۴ مگاپاسکال است. دلیل اختلاف نتایج آزمایشگاهی دو نمونه آلومینیوم را می‌توان تفاوت در آماده‌سازی نمونه‌ها و نحوه قرارگرفتن نمونه‌ها در دستگاه آزمون کشش دانست. شکل ۲ نمودار میانگین تنش - کرنش مهندسی را برای دو نمونه آلومینیوم پوسته مخروطی دوجداره نشان می‌دهد.



شکل ۲. نمودار تنش - کرنش مهندسی نمونه آلومینیومی

چون منحنی تنش - کرنش مهندسی نمودار واقعی ویژگی‌های تغییر شکل یک فلز نیست (زیرا بر مبنای ابعاد اولیه نمونه به دست می‌آید، اما این ابعاد حین آزمایش دائماً تغییر می‌کند)، برای تحلیل اجزای محدود از مقادیر تنش و کرنش حقیقی استفاده می‌شود. در این مطالعه، تنش و کرنش حقیقی از روابط زیر حاصل می‌شوند:

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

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

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

در این معادلات  $\sigma_{tru}$  و  $\epsilon_{tru}$  به ترتیب تنش و کرنش حقیقی،  $\sigma_{eng}$  و  $\epsilon_{eng}$  به ترتیب تنش و کرنش مهندسی است. از طرفی، نرم‌افزار اجزای محدود مورد استفاده در این مطالعه خواص مکانیکی فلزات را به صورت تنش حقیقی و کرنش پلاستیک دریافت می‌کند. براین اساس، طبق رابطه ۳ تمامی کرنش‌ها

چین‌ها به ۳ می‌رسد. شکل ۵ نیز فروریزش نهایی نمونه‌های مخروطی دوجداره را تحت شرایط مرزی زاویه‌دار (۱۰ درجه) (BCT3-4) نشان می‌دهد. آنچه به‌وضوح مشخص است، تغییر شکل مایل پوسته‌های مخروطی دوجداره حول محور زاویه بارگذاری (۱۰ درجه) است. چون شرایط مرزی برای هر دو حالت نمونه‌ها دو سرگیردار انتخاب شده است، بدیهی است لبه‌های هر دو قاعده‌ی کوچک نمونه‌های مخروطی بدون تغییر شکل بماند.



شکل ۴. فروریزش نهایی نمونه‌های مخروطی دوجداره تحت شرایط مرزی دوسرگیردار محوری



شکل ۵. فروریزش محوری نمونه‌های مخروطی دوجداره تحت شرایط مرزی دوسرگیردار زاویه‌دار

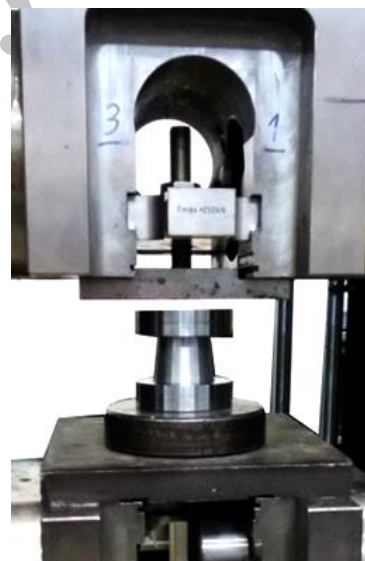
### ۳. مطالعه اجزای محدود

فرایند فروریزش با استفاده از نرم‌افزار اباکوس شبیه‌سازی عددی و اثر رفتار غیرخطی مواد، تماس و تغییرشکل بزرگ در این شبیه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. چون سازه جدارنازک متصل به وسیله متحرک در بارگذاری با جسم دیگر قرار می‌گیرد، لازم است برای شبیه‌سازی عددی مطابق شکل ۶ صفحات صلبی تعریف شود که هر یک معرف وسیله متحرک و جسم ثابت باشد. در مطالعه حاضر، فروریزش پوسته‌های مخروطی دوجداره تحت بارگذاری شبه‌استاتیک بررسی می‌شود، بنابراین جرمی برای جسم

به‌صورت کرنش پلاستیک در نرم‌افزار اجزای محدود تعریف می‌شود. در این رابطه  $\epsilon_{p1}$  کرنش پلاستیک،  $\sigma_y$  تنش تسلیم و  $E$  مدول الاستیسیته است. باید توجه داشت که تنش متناظر با کرنش پلاستیک صفر بیانگر حد تسلیم است.

### ۲-۳. مطالعه آزمایشگاهی

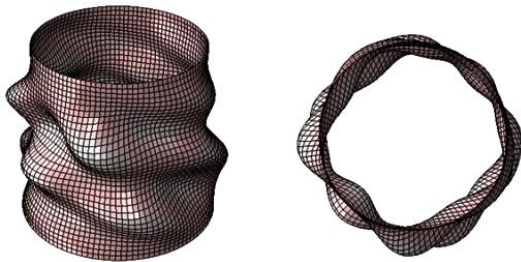
شکل ۳ نحوه قرارگرفتن نمونه‌های مخروطی دوسرگیردار در دستگاه یونیورسال را تحت بارگذاری محوری نشان می‌دهد. دستگاه یونیورسال شامل دو فک است: فک تحتانی همواره ساکن است و فک فوقانی با سرعت ثابتی حرکت داده می‌شود و طول نمونه آزمایشگاهی را افزایش می‌دهد. آزمایش فروریزش شبه‌استاتیک نمونه‌های مخروطی دوجداره با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه فک متحرک دستگاه یونیورسال انجام می‌شود و نحوه فروریزش آنها بررسی می‌شود. در مطالعه حاضر نمونه‌های مخروطی دوسرگیردار با BCTi نشان داده می‌شود، به‌طوری‌که BCT بیانگر لوله مخروطی دوجداره و i بیانگر شماره نمونه‌هاست.



شکل ۳. نحوه قرارگرفتن نمونه‌های مخروطی دوجداره دوسرگیردار در دستگاه یونیورسال

شکل ۴ فروریزش نهایی نمونه‌های مخروطی دوجداره دوسرگیردار را تحت بارگذاری محوری (BCT1-2) نشان می‌دهد، در این آزمایش، فروریزش نمونه‌های مخروطی دوجداره از طرف قاعده‌های کوچک آنها به‌صورت تاخوردن یا چین موضعی متقارن محوری آغاز شده و تعداد چین‌خوردگی با افزایش جابه‌جایی افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که در جابه‌جایی ۳۳ میلی‌متر، تعداد

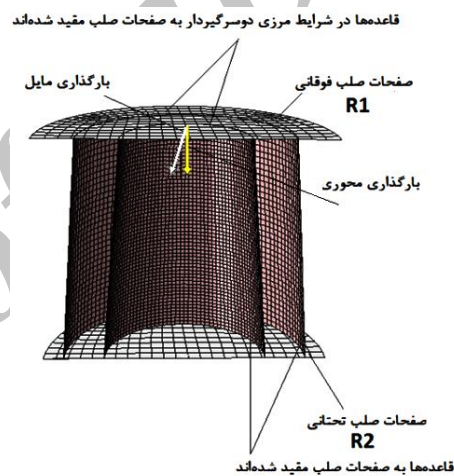
حاضر، بیشینه مقدار جابه‌جایی اولیه پوسته‌های مخروطی دوجداره تنها برای مد اول کماتش و برابر درصدی از ضخامت آن است (در این مطالعه مقدار ضریب  $2 \times 10^{-3}$  تعریف شده است [۲۳]). این مقدار جابه‌جایی اولیه در حل مسئله فروریزش به‌عنوان عیوب هندسی پوسته‌های مخروطی دوجداره در نظر گرفته می‌شود و سبب تغییر شکل نامتقارن آنها در نرم‌افزار اجزای محدود می‌شود. گفتمنی است تعداد مود و تغییر ضریب اثر محسوسی بر مقدار انرژی فروریزش ندارد، اما شیوه فروریزش را می‌تواند تحت تأثیر قرار دهد [۲۲].



شکل ۷. مد اول کماتشی مورد استفاده در فروریزش پوسته خارجی نمونه‌های مخروطی دوجداره تحت شرایط مرزی دوسرگیردار زاویه‌دار

در شبیه‌سازی فروریزش پوسته‌های مخروطی دوجداره تحت بارگذاری محوری، رفتار غیرخطی مواد در تغییر شکل بزرگ و اثر برخورد چروک‌های پوسته‌های مخروطی دوجداره با خودش یا صفحات صلب فوقانی و تحتانی و همچنین احتمال برخورد پوسته‌های مخروطی داخلی و بیرونی به هم مدلسازی شده تا شرایط تحلیل با شرایط واقعی کاملاً منطبق باشد. شبیه‌سازی فروریزش با فرض صلب‌بودن سطوح مسطح ابزار در مقایسه با نمونه آزمایشگاهی ارائه شده است. رفتار ناحیه پلاستیک با استفاده از مقادیر تنش و کرنش پلاستیک تعیین شد که مقادیر آنها در شکل ۲ ارائه شده است. برای ارتباط قطعات مختلف در سطح تماس آنها نیز شرایط تماس لغزشی و تماس کامل اعمال می‌شود. برای توضیح شرط تماس لغزشی، گره‌های یکی از قطعات واقع در سطح تماس در نظر گرفته می‌شود که روی سطح تماس قطعه دیگر قرار دارند. این گره‌ها می‌توانند از سطح دور شوند، بدون آنکه نیرویی ایجاد شود؛ اما داخل سطح نمی‌توانند نفوذ کنند. گره‌های سطوح قطعات در شرط تماس لغزشی می‌توانند نسبت به سطح تماس در راستای مماس بر سطح حرکت کنند و با فرض اصطکاک کولمبی، نیرویی که بر گره اعمال می‌شود از حاصل ضرب نیروی عمودی در ضریب اصطکاک تعیین

صلب متحرک لحاظ نمی‌شود. از طرفی، در این شبیه‌سازی اثر عیوب هندسی اولیه ناشی از ساخت سازه‌های جدارنازک در نظر گرفته شده است. این عیوب به‌نوبه خود سبب تغییر شیوه فروریزش سازه‌های جدارنازک می‌شود. در صورتی که مسئله فروریزش پوسته‌های متقارن محوری توسط نرم‌افزار اجزای محدود با شرایط مرزی و بارگذاری فشاری متقارن محوری بررسی شود، شیوه فروریزش پوسته نیز به‌صورت متقارن محوری خواهد بود. چون هندسه پوسته‌ها در فرایند ساخت عیوب هندسی اولیه شامل برآمدگی سطحی، تغییر ضخامت در طول و جز این‌ها دارد، در آزمایش فشار محوری و مایل، شیوه فروریزش این نوع پوسته‌ها به‌صورت نامتقارن است.



شکل ۶. فروریزش محوری نمونه‌های مخروطی دوجداره تحت شرایط مرزی دوسرگیردار

بهترین روش برای ایجاد عیوب هندسی در مدل عددی استفاده از مدهای کماتش است [۲۲]. در این تحقیق، برای به‌دست آوردن مدهای کماتش و مقادیر ویژه، پوسته مخروطی دوجداره با شرایط مرزی تعریف‌شده در مسئله تحت اثر نیروی واحد در جهت شیوه فروریزش پوسته مخروطی قرار می‌گیرد. چون براساس نتایج آزمایشگاهی فقط شیوه فروریزش پوسته خارجی در بارگذاری مایل به‌صورت غیرمتقارن است، در این مطالعه تنها برای این نوع پوسته عیوب هندسی تعریف شده است. شکل ۷ مد اول کماتشی مورد استفاده برای فروریزش پوسته خارجی نمونه دوجداره را تحت شرایط مرزی زاویه‌دار نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای وضوح بیشتر صفحه‌های صلب آنها حذف شده است. به‌طور کلی، ضریب نقش هر مد، بیشینه جابه‌جایی اولیه پوسته هر نقص (مد کماتش) است. در تحقیق

دوجداره تحت شرایط مرزی دو سرگیردار محوری برخلاف زاویه‌دار از ناحیه فوقانی به‌صورت تاخوردگی شروع می‌شود و پشت سرهم ادامه می‌یابد. این درحالی است که در شرایط تکیه‌گاهی مایل با توجه به زاویه بارگذاری تغییر شکل پوسته خارجی از ناحیه وسط آن و به‌شیوه نامتقارن شروع می‌شود. بدیهی است این شیوه فروریزش مطابق با مد کمانشی این پوسته است (شکل ۷).



شکل ۸. مقایسه شیوه فروریزش پوسته مخروطی دوجداره تحت شرایط مرزی دوسرگیردار؛ (الف) محوری، (ب) زاویه‌دار در حالت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی



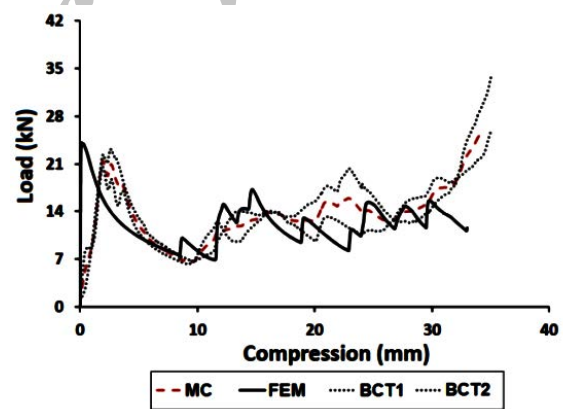
شکل ۹. شیوه فروریزش پوسته مخروطی دوجداره تحت شرایط مرزی دوسرگیردار؛ (الف) محوری، (ب) زاویه‌دار

می‌شود. از طرفی، در شرط مرزی تماس کامل بین دو سطح، هیچ حرکت نسبی در راستای مماس بر سطح و عمود بر سطح وجود ندارد و مقدار جابه‌جایی هر گره از سطح با جابه‌جایی نقطه تماس متناظر آن با سطح مقابل برابر است. در سطوح مشترک بین سازه جدارنازک مخروطی (داخلی و خارجی) و صفحه صلب فوقانی و تحتانی از شرط تماس کامل برای ارتباط جابه‌جایی بین قطعات استفاده می‌شود. شرط تماس لغزشی نیز در سطح تماس دیواره پوسته‌های مخروطی دوجداره با صفحه صلب فوقانی استفاده می‌شود. ضریب اصطکاک در شرط تماس لغزشی ۰/۱۵ در نظر گرفته شده است [۱۹-۲۱]. همچنین در این شبیه‌سازی شرط خود تماسی در سطوح خارجی و داخلی پوسته‌های مخروطی دوجداره پیش‌بینی شده است تا از نفوذ گره‌های آن در حین چروک‌خوردگی جلوگیری شود. هر صفحه صلب ممکن است شش درجه آزادی شامل سه مولفه جابه‌جایی و سه مولفه دوران داشته باشند. سطح صلب تحتانی که در تحلیل تجربی به جسم ثابت متصل است. پس کلیه درجات آزادی آن مقید می‌شود. از طرف دیگر، سطح صلب فوقانی به جسم متحرک متصل است که کلیه درجات آزادی آن غیر از جابه‌جایی در راستای محور پوسته‌های مخروطی دوجداره مقید شده است (شکل ۶). نوع المان‌ها برای تحلیل اجزای محدود وابسته به هندسه نمونه و روش تحلیل است. برای این شبیه‌سازی پوسته‌های مخروطی دوجداره و صفحات صلب به‌ترتیب از المان‌های پوسته‌ای چهارگوش (S4R) و المان صلب خطی (R3D4) استفاده شده است [۲۳]، به‌طوری‌که المان‌های چهارگوش دارای چهار گره و المان‌های صلب دارای دو گره است.

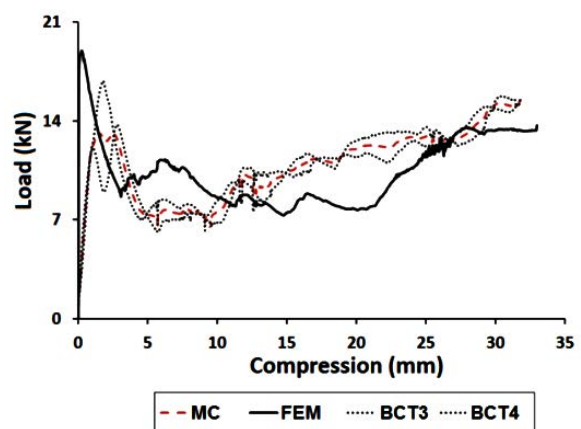
#### ۴. نتایج و بحث

شکل ۸ فروریزش پوسته مخروطی دوجداره تحت شرایط مرزی محوری و زاویه‌دار را با حالت آزمایشگاهی مقایسه می‌کند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، کاهش ارتفاع نمونه با بازده لپیدگی ۶۰ درصد مشابه شرایط آزمایشگاهی محاسبه شده است. هندسه نمونه آزمایشگاهی برای مقایسه در این شکل نمایش داده شده که در هر دو حالت شیوه و تعداد لایه‌های تغییر شکل یافته داخلی و خارجی نمونه مخروطی دوجداره با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارد. شکل ۹ نیز نحوه فروریزش پوسته‌های مخروطی دوجداره را در طی جابه‌جایی مختلف (X) نشان داده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، فروریزش پوسته مخروطی

مقایسه نمودار نیرو - جابه‌جایی شبیه‌سازی و تجربی فروریزش نمونه‌های مخروطی دوجداره دوسرگیردار تحت شرایط مرزی محوری و زاویه‌دار در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. همان‌گونه ملاحظه می‌شود، در شروع بارگذاری، نیرو به‌طور تقریباً خطی تا یک مقدار ماکزیمم افزایش می‌یابد. این روند تغییر نیرو ناشی از رفتار الاستیک نمونه مخروطی دوجداره تحت اثر بار فشاری قبل از آغاز کمانش است. با شروع فروریزش پوسته‌های خارجی و داخلی و همچنین تشکیل لایه‌های خارجی آنها نیرو افت می‌کند. سپس نیرو با تشکیل لایه داخلی و تکمیل اولین چین‌خوردگی افزایش می‌یابد که با تشکیل لایه خارجی دوباره اندکی کاهش می‌یابد. چون تکرار آزمایش برای هر بارگذاری دو بار است، در این مطالعه، میانگین نیرو - جابه‌جایی آزمایش‌های انجام‌شده برای هر نمونه مخروطی با پارامتر MC نمایش داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۰. مقایسه نمودارهای نیرو - جابه‌جایی شبیه‌سازی و تجربی نمونه‌های مخروطی دوجداره تحت شرایط مرزی دوسرگیردار (الف) محوری، (ب) زاویه‌دار

به‌طور کلی اختلافی که در بیشینه نیروها و میزان انرژی جذب‌شده پوسته مخروطی دوجداره آلومینیومی مشاهده می‌شود را می‌توان بدین صورت تشریح کرد:

۱- وجود عیوب و نقص اولیه: همان‌طور که بیان شد، نمونه‌های مخروطی دوجداره ساخته‌شده به‌روش چرخ‌کاری دارای نقص اولیه (شامل تغییر غیرخطی ضخامت، برآمدگی سطح و جز این‌ها) است. در این شبیه‌سازی نقص‌های اولیه به‌کمک جابه‌جایی گره‌های نمونه مخروطی توسط تحلیل مودهای کمانش به نرم‌افزار المان محدود معرفی شده است. وجود عیوب هندسی در ساخت علت اصلی اختلاف نیروی اولیه (در حالت شبیه‌سازی و آزمایشگاهی) نیز به‌شمار می‌آید؛ زیرا این عیوب سبب کاهش قابل توجه نیروی اولیه فروریزش می‌شود.

۲- تماس بین پوسته‌های مخروطی با صفحات صلب: در شبیه‌سازی حاضر تماس بین پوسته مخروطی دوجداره و صفحه‌های صلب با تعریف ضریب اصطکاک و نیروی برشی مدل شده است که ممکن است با واقعیت تطابق کامل نداشته باشد.

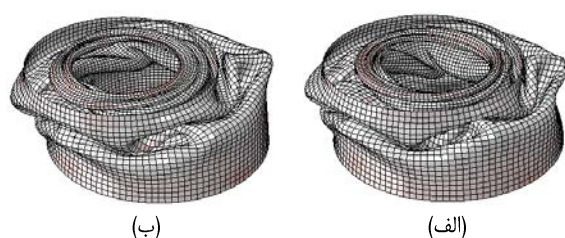
۳- عدم مطابقت دقیق بین شرایط مرزی اعمال‌شده در آزمایش و نرم‌افزار المان محدود: در آزمایش، سطح قاعده پایین و بالای نمونه‌های مخروطی دوجداره توسط شیار قطعه فولادی گیردار شده است. این شرایط مرزی اجازه حرکت افقی بسیار اندکی را برای نمونه‌های مخروطی فراهم می‌نمود، در حالی که در نرم‌افزار المان محدود تمامی درجات آزادی قاعده‌های فوقانی و تحتانی مقید شده است.

#### ۴-۱- بررسی اثر زاویه نیم‌رأس پوسته در شرایط مرزی دوسرگیردار

در مطالعه حاضر، اثر شرایط مرزی دوسرگیردار محوری و زاویه‌دار (۱۰ و ۱۵ درجه) بر رفتار فروریزش پوسته‌های مخروطی بررسی می‌شود. نحوه مدلسازی شرایط مرزی دوسرگیردار زاویه‌دار مطابق شکل ۶ انجام شده است. مقایسه نمودار نیرو - جابه‌جایی فروریزش نمونه‌های مخروطی دوجداره دوسرگیردار با زاویه‌های مختلف تحت بارگذاری محوری در شکل ۱۱ ارائه شده است. نکته قابل ذکر کاهش قابل توجه اولین بیشینه نیروی فروریزش نمونه‌های مخروطی با افزایش زاویه شرایط مرزی دوسرگیردار است. علت این امر پایداری و مقاومت اولیه پوسته در برابر شرایط تکیه‌گاهی است. به‌عبارت دیگر، با افزایش زاویه شرایط مرزی



می‌توان در عدم واژگونی سطح قاعده‌های کوچک این نمونه جستجو کرد (شکل ۱۴). چون در شرایط مرزی دوسرگیردار قاعده فوقانی نمونه‌ها مقید شده است، برخلاف شرایط مرزی یکسرگیردار فروریزش از ناحیه پایین‌تری نسبت به قاعده فوقانی اتفاق می‌افتد. این امر سبب افزایش اولین بیشینه نیروی فروریزش و همچنین کاهش تعداد چین‌های تشکیل شده در طول جابه‌جایی برابر نسبت به شرایط مرزی یکسرگیردار می‌شود. براساس آنچه بیان شد، انتظار می‌رود میزان انرژی جذب‌شده نمونه مخروطی دوسرگیردار نیز نسبت به نمونه‌های یکسرگیردار برای مقدار جابه‌جایی یکسان بیشتر باشد.



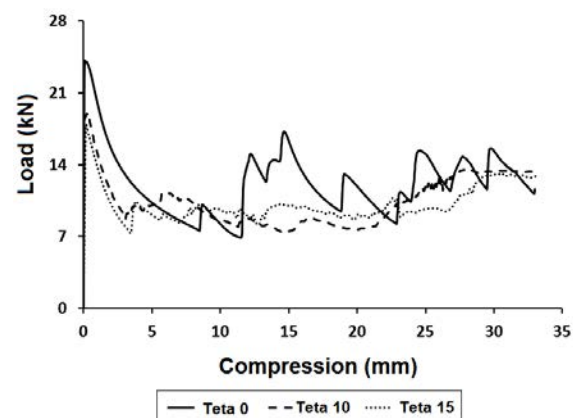
شکل ۱۲. مقایسه شیوه فروریزش نمونه‌های مخروطی دوجداره تحت شرایط مرزی دوسرگیردار با زاویه الف (۱۰، ب) ۱۵ درجه

در تحقیق حاضر، مقدار اولین بیشینه نیروی فروریزش و انرژی جذب‌شده نمونه‌های مخروطی دوجداره دوسرگیردار به ترتیب در حدود ۳۲ و ۷ درصد بیشتر از نمونه‌های مخروطی دوجداره یکسرگیردار است. براساس این نتایج، شرایط مرزی دوسرگیردار علاوه بر تغییر ناچیز انرژی جذب‌شده، اثر قابل توجهی بر افزایش نیروی اولیه دارد. بنابراین استفاده از این شرایط مرزی در ضربه‌گیرهایی که به‌منظور کاهش شوک اولیه برخورد مورد استفاده قرار می‌گیرند، توصیه نمی‌شود.

#### ۳-۴. بررسی اثر بارگذاری مایل

سازه‌های جدارنازک به‌طور گسترده‌ای برای جذب انرژی‌های ضربه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. مقالات منتشرشده در این زمینه بیشتر مربوط به بارگذاری محوری است. اما در عمل سازه‌های بسیار کمی تحت بارگذاری محوری قرار می‌گیرند، به‌خصوص سازه‌های جاذب انرژی در خودروها که تحت بارگذاری فشاری غیرمحوری و مایل هستند. بنابراین بحث و بررسی چگونگی پاسخ جاذب انرژی تحت بارگذاری مایل بسیار مهم و ضروری است. در این مطالعه، مطابق شکل ۱۵ اثر زاویه بارگذاری

پوسته‌های مخروطی دوجداره دارای پایداری کمتری است. این پدیده به‌نوبه خود سبب کاهش انرژی جذب‌شده این نمونه‌ها با افزایش زاویه شرایط تکیه‌گاهی می‌شود. نتایج فروریزش نمونه‌های مخروطی تحت شرایط مرزی با زاویه مختلف در جدول ۱ آورده شده است. در این مطالعه، شرایط مرزی دوسرگیردار با زاویه ۱۵ درجه سبب کاهش ۲۸ درصدی مقدار اولین بیشینه نیروی فروریزش و ۱۴ درصدی انرژی جذب‌شده نمونه‌های مخروطی دوجداره نسبت به شرایط مرزی دوسرگیردار بدون زاویه می‌شود. از طرفی، افزایش زاویه شرایط مرزی اثر محسوسی بر رفتار (شکل ۱۱) و نحوه فروریزش (شکل ۱۲) نمونه‌های مخروطی دوجداره ندارد.



شکل ۱۱. مقایسه نمودار فروریزش نمونه‌های مخروطی دوجداره دوسرگیردار با زاویه مختلف تحت بارگذاری محوری

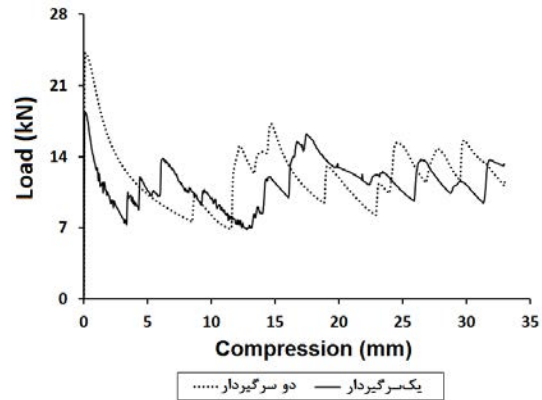
جدول ۱. اثر زاویه شرایط مرزی بر رفتار نمونه‌های مخروطی دوجداره تحت بارگذاری محوری

زاویه شرایط مرزی	نیروی اولیه فروریزش (کیلو نیوتن)	متوسط نیروی فروریزش (کیلو نیوتن)	انرژی جذب‌شده (ژول)
۰	۲۴/۱	۱۲/۲	۴۰۴
۱۰	۱۸/۵	۱۰/۴	۳۴۳
۱۵	۱۷/۹	۹/۶	۳۳۸

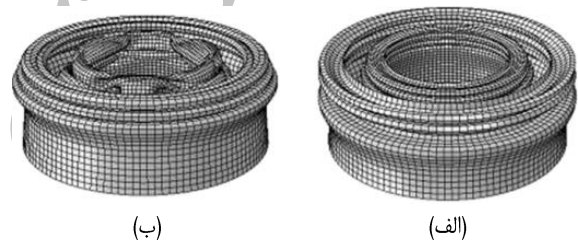
#### ۴-۲. بررسی اثر شرایط مرزی یکسرگیردار

شکل ۱۳ نمودار نیرو - جابه‌جایی فروریزش محوری نمونه‌های مخروطی دوجداره را تحت شرایط مرزی یکسرگیردار و دوسرگیردار نشان می‌دهد. آنچه به‌وضوح مشخص است، افزایش اولین بیشینه نیروی فروریزش محوری نمونه‌های مخروطی دوسرگیردار نسبت به یکسرگیردار است که علت این افزایش را

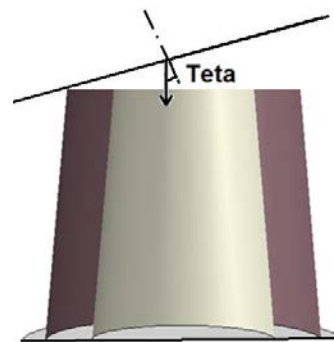
به‌گونه‌ای بررسی می‌شود که در آن پوسته‌های مخروطی دوجداره تحت شرایط مرزی یک‌سرگیردار قرار گرفته و جسم صلب فوقانی با زاویه‌ی مختلف (۱۰ و ۱۵ درجه) به آن برخورد می‌کند.



شکل ۱۳. مقایسه نمودار فروریزش نمونه‌های مخروطی دوجداره یک‌سرگیردار و دوسرگیردار تحت اثر بارگذاری محوری



شکل ۱۴. مقایسه شیوه فروریزش نمونه‌های مخروطی دوجداره (الف) دوسرگیردار، (ب) یک‌سرگیردار تحت اثر بارگذاری محوری



شکل ۱۵. نحوه مدلسازی فروریزش پوسته‌های مخروطی دوجداره تحت شرایط مرزی یک‌سرگیردار و بارگذاری مایل

فروریزش از ناحیه تماس پوسته خارجی نمونه‌های مخروطی دوجداره شروع می‌شود. بنابراین نیروی فروریزش آن (مطابق شکل ۱۷) نسبت به بارگذاری محوری به شدت کاهش می‌یابد (I). به عبارت دیگر، چون در بارگذاری مایل پوسته‌های مخروطی دوجداره به صورت مایل تغییر شکل می‌دهند، با افزایش میزان جابه‌جایی، مقدار بیشینه نیروی‌های نسبی ایجادشده نسبت به بارگذاری محوری به شدت کاهش می‌یابد. در ادامه، با افزایش جابه‌جایی و تماس پوسته داخلی با سطح صلب فوقانی نیرو دوباره افزایش می‌یابد (II). براساس نمودار نیرو - جابه‌جایی تغییرات نیرو با تشکیل اولین چین داخلی به صورت افزایشی (IV) و با تشکیل چین خارجی به صورت کاهش می‌دهند. گفتنی است این روند تغییرات نیرو نسبت به جابه‌جایی تا فروریزش نهایی نمونه‌های مخروطی دوجداره تکرار می‌شود. نتایج اثر زاویه بارگذاری بر نیروی اولیه فروریزش، متوسط نیرو و انرژی جذب‌شده نمونه‌های مخروطی دوجداره تحت شرایط مرزی یک‌سرگیردار در جدول ۲ آورده شده است.

نکته قابل توجه کاهش قابل توجه شیب اولیه تغییرات نیرو - جابه‌جایی نمونه‌های مخروطی دوجداره تحت اثر افزایش زاویه بارگذاری مایل است. در این مطالعه، شیب اولیه فروریزش برای زاویه بارگذاری صفر، ۱۰ و ۱۵ درجه به ترتیب ۹۰، ۵۸ و ۴۷ درجه است. به‌طور کلی، کاهش شیب خط در بخش ابتدایی نمودار نیرو - جابه‌جایی ضربه‌گیرهای فروریزشی سبب کاهش شوک اولیه فروریزش و افزایش زمان انتقال این شوک به جسم متحرک می‌شود. از طرفی، همان‌طور که انتظار می‌رود، زاویه بارگذاری سبب کاهش انرژی جذب‌شده پوسته‌های مخروطی دوجداره می‌شود. به‌طوری‌که در این مطالعه انرژی جذب‌شده برای زاویه بارگذاری ۱۰ و ۱۵ درجه نسبت به بارگذاری محوری به ترتیب ۱۲ و ۲۶ درصد کاهش می‌یابد. این کاهش قابل توجه انرژی است که محققین بر آن می‌دارد که به‌منظور طراحی جاذب انرژی ایده‌آل اثر بارگذاری مایل آن را نیز مورد بررسی قرار دهند.

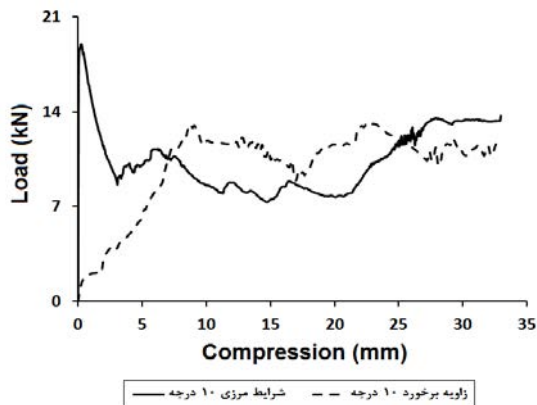
در این مطالعه، به‌منظور مقایسه رفتار فروریزش پوسته‌های مخروطی دوجداره تحت بارگذاری زاویه‌دار و شرایط مرزی زاویه‌دار، مطابق شکل ۱۸ نمودار نیرو - جابه‌جایی برای نمونه مخروطی دوجداره با شرایط مرزی زاویه‌دار ۱۰ درجه و زاویه بارگذاری ۱۰ درجه آورده شده است. گفتنی است در بارگذاری مایل برخلاف شرایط مرزی زاویه‌دار نیرو به‌صورت زاویه‌دار به

قسمت‌های الف و ب از شکل ۱۶ به ترتیب فروریزش نهایی پوسته‌های مخروطی را تحت بارگذاری مایل با زاویه بارگذاری ۱۰ و ۱۵ درجه نشان می‌دهد. بدیهی است افزایش زاویه بارگذاری سبب افزایش طول چین‌های تشکیل‌شده نسبت به بارگذاری محوری می‌شود. همان‌طور که انتظار می‌رود، در بارگذاری مایل

جدول ۲. اثر زاویه بارگذاری رفتار نمونه‌های مخروطی دوجداره

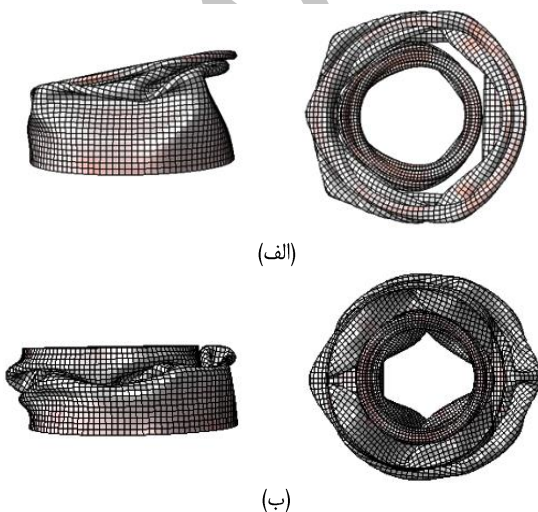
تحت شرایط مرزی یک‌سرگیردار

زاویه بارگذاری	نیروی اولیه فروریزش (کیلو نیوتن)	متوسط نیروی فروریزش (کیلو نیوتن)	انرژی جذب‌شده (ژول)
۰	۱۸/۲	۱۱/۳۶	۳۷۵
۱۰	۱/۹	۱۰/۰	۳۳۰
۱۵	۱/۵	۹/۰	۲۹۷



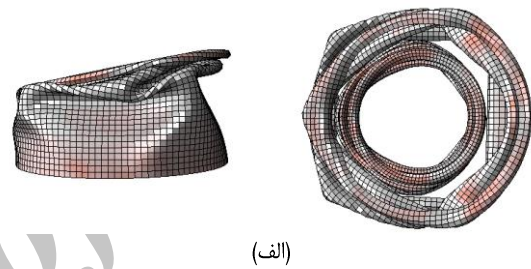
شکل ۱۸. مقایسه اثر زاویه بارگذاری و شرایط مرزی زاویه‌دار بر نمودار نیرو - جابه‌جایی فروریزش نمونه‌های مخروطی دوجداره

از طرفی، شیوه فروریزش این دو نمونه مخروطی دوجداره نیز با هم متفاوت است. شکل ۱۹ نحوه فروریزش پوسته مخروطی دوجداره تحت بارگذاری مایل با زاویه ۱۰ درجه را با شرایط تکیه‌گاهی زاویه‌دار ۱۰ درجه مقایسه می‌کند. مشاهده می‌شود که زاویه فروریزش نمونه مخروطی دوجداره تحت بارگذاری مایل نسبت به شرایط مرزی زاویه‌دار بسیار محسوس‌تر است.

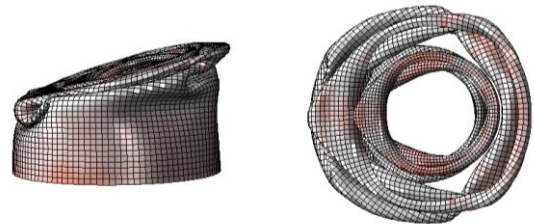


شکل ۱۹. مقایسه اثر (الف) زاویه بارگذاری، (ب) شرایط مرزی زاویه‌دار بر شیوه فروریزش نمونه‌های مخروطی دوجداره

پوسته‌های مخروطی اعمال می‌شود. این درحالی است که در شرایط مرزی زاویه‌دار نیرو به صورت محوری به قیود یا فیکسچرهای مایل اعمال می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۸ ملاحظه می‌شود، بارگذاری زاویه‌دار سبب کاهش قابل توجه اولین بیشینه نیروی فروریزش نسبت به شرایط مرزی زاویه‌دار می‌شود. این درحالی است که میزان انرژی جذب‌شده در این شرایط در حدود ۴ درصد نسبت به شرایط مرزی زاویه‌دار کاهش یافته است. بنابراین زاویه بارگذاری اثر محسوس‌تری بر رفتار نمونه‌های مخروطی دوجداره (با توجه به مقایسه شیب ایجادشده در بخش خطی نمودار نیرو - جابه‌جایی، مقدار نیروی اولیه و میزان انرژی جذب‌شده) دارد.



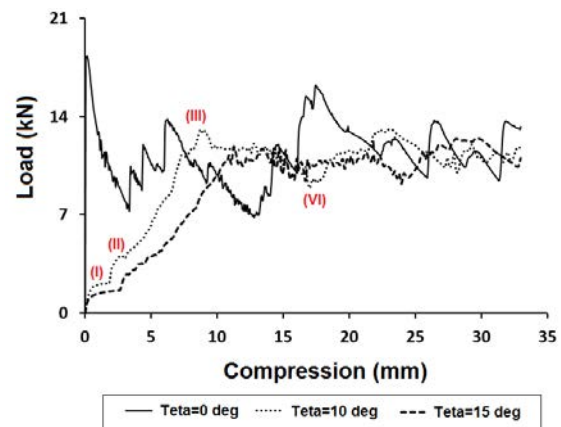
(الف)



(ب)

شکل ۱۶. اثر زاویه بارگذاری

(الف) ۱۰، (ب) ۱۵ درجه بر فروریزش نمونه‌های مخروطی دوجداره



شکل ۱۷. اثر زاویه بارگذاری بر فروریزش نمونه‌های مخروطی دوجداره تحت شرایط مرزی یک‌سرگیردار

## ۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، فروریزش پوسته‌های مخروطی دوجداره آلومینیومی با شرایط تکیه‌گاهی ساده و زاویه‌دار تحت بارگذاری محوری به‌صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی شده است. نتایج عددی این مطالعه بیانگر تطابق قابل قبول نمودار نیرو - جابه‌جایی و نحوه فروریزش پوسته‌های مخروطی دوجداره با نتایج تجربی است. بررسی آثار شرایط مرزی با زاویه‌های مختلف و همچنین زاویه بارگذاری نشان می‌دهد که:

- شرایط مرزی زاویه‌دار سبب کاهش قابل توجه اولین بیشینه نیرو فروریزش و انرژی جذب‌شده نمونه‌های مخروطی دوجداره نسبت به شرایط مرزی دوسرگیردار بدون زاویه می‌شود. این امر به‌دلیل عدم پایداری و مقاومت اولیه پوسته در برابر شرایط تکیه‌گاهی زاویه‌دار است. این در حالی است که افزایش زاویه شرایط تکیه‌گاهی اثر محسوسی بر رفتار فروریزش و نحوه فروریزش نمونه‌های مخروطی ندارد.

- شرایط مرزی دوسرگیردار سبب افزایش اولین بیشینه نیرو و انرژی جذب‌شده فروریزش محوری نمونه‌های مخروطی نسبت به شرایط مرزی یک‌سرگیردار می‌شود. در تحقیق حاضر، مقدار اولین بیشینه نیروی فروریزش و انرژی جذب‌شده نمونه‌های مخروطی دوجداره دوسرگیردار به‌ترتیب در حدود ۳۲ و ۷ درصد بیشتر از نمونه‌های مخروطی دوجداره یک‌سرگیردار است. براساس این

## ۶. مأخذ

- [1] N. Jones, W. Abramowicz, *Static and dynamic axial crushing of circular and square tubes, Metal forming and impact mechanics*, New York: Pergamon Press, pp. 225-247, 1985.
- [2] J. M. Alexander, An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading, *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, Vol. 13, pp. 11-16, 1960.
- [3] W. Johnson, S. R. Reid, Metallic energy dissipating systems, *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 31, pp. 277-288, 1978.
- [4] G. H. Daneshi, S. J. Hosseini-pour, Elastic-plastic theory for initial buckling load of thin-walled grooved tubes under axial compression, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 125, pp. 826-832, 2002.
- [5] M. M. Abedi, A. Niknejad, G. H. Liaghat, M. ZamaniNejad, Prediction of the Mean folding force during the axial compression in foam-filled grooved tubes by the oretical analysis, *Materials and Design*, Vol. 37, pp. 144-151, 2012.
- [6] Y. H. Luo, Z. W. Huang, X. L. Zhang, FEM analysis of external inversion and energy absorbing characteristics of inverted tubes, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 188, pp. 279-282, 2007.
- [7] S. Mori, K. I. Manabe, H. Nishimura, K. Hirose, Experimental analysis of the flattening of the cross-section spring back and the bending moment of clad tubes in uniform bending, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 66, pp. 270-276, 1997.

- [8] A. Niknejad, B. Rezaei, Gh. H. Liaghat, Empty circular metal tubes in the splitting process-theoretical and experimental studies, *Thin-walled Structures*, Vol. 72, pp. 48-60, 2013.
- [9] N. K. Gupta, H. Abbas, Axisymmetric axial crushing of thin frusta, *Thin-Walled Structures*, Vol. 36, pp. 169-79, 2000.
- [10] N. K. Gupta, Venkatesh, Experimental and numerical studies of impact axial compression of thin-walled conical shells, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 34, pp. 708-720, 2007.
- [11] L. i. Mirfenderesk, M. Salimi, S. Ziaei-Rad, Parametric study and numerical analysis of empty and foam-filled thin-walled tubes under static and dynamic loadings, *International Journal of Mechanical*, Vol. 50, pp. 1042-1057, 2008.
- [12] G. L. Easwara Prasad, N. K. Gupta, An experimental study of deformation modes of domes and large-angled frusta at different rates of compression, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, pp. 400-15, 2005.
- [13] Z. Ahmad, D. P. Thambiratnam, Crushing response of foam-filled conical tubes under quasi-static axial loading, *Material and Design*, Vol. 30, pp.2393-2403, 2009.
- [14] Z. Ahmad, D. P. Thambiratnam, Dynamic computer simulation and energy absorption of foam-filled conical tubes under axial impact loading, *Computers and Structures*, Vol. 87, pp. 186-197, 2009.
- [15] Z. Ahmad, D. P. Thambiratnam, A. C. C. Tan, Dynamic energy absorption characteristics of foam-filled conical tubes under oblique impact loading, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, pp. 475-488, 2010.
- [16] M. Shariati, H. R. Allahbakhsh, Numerical and experimental investigations on the buckling of steel semi-spherical shells under various loadings, *Thin-Walled Structures*, Vol. 48, pp. 620-628, 2010.
- [17] A. Ghamarian, H. R. Zarei, Crashworthiness investigation of conical and cylindrical end-capped tubes under quasi static crash loading, *International Journal of Crashworthiness*, pp. 19-28, 2012.
- [18] A. Ghamarian, H. R. Zarei, M. T. Abadi, Experimental and numerical crashworthiness investigation of empty and foam-filled end-capped conical tubes, *Thin-Walled Structures*, Vol. 9, pp. 1312-1319, 2011.
- [19] A. Ghamarian, M. A. Farsi, Experimental and numerical analysis of thin-walled structures combined axial collapse, *Journal of Mechanical Aerospace*, Vol. 8, pp. 99-109, 2012 (In Persian فارسی).
- [20] A. Ghamarian, H. R. Zarei, M. A. Farsi, N. Ariaeifar, Crashworthiness investigation of the empty and foam-filled conical tube with shallow spherical caps, *Strain*, Vol. 49, pp. 199-211, 2013.
- [21] H. R. Zarei, A. Ghamarian, Experimental and numerical crashworthiness investigation of empty and foam-filled thin-walled circular tubes with shallow spherical caps, *Experimental Mechanics*, Vol. 54, pp.115-126, 2014.
- [22] Karlson & Sorensen, ABAQUS User's Manual Hibbit, Pawtucket, 1999.
- [23] S. Azarakhsh, A. Rahi, A. Ghamarian, H. Motamedi, Axial crushing analysis of empty and foam-filled brass bitubular cylinder tubes, *Thin-Walled Structures*, Vol. 95, pp. 60-72, 2015.

پی نوشت

---

1. collapse