

بررسی جذب انرژی ضربه‌گیرهای مخروطی تحت بار محوری شبه‌استاتیکی

سجاد آذرخش^۱، مصطفی عباس‌نژاد^۲

۱ باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران، sajad_azarakhsh@yahoo.com

۲ گروه مکانیک، واحد الیگودرز، دانشگاه آزاد اسلامی، الیگودرز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۲۳

چکیده

در این پژوهش، با انجام آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی، شیوه‌فروریزش و میزان جذب انرژی ضربه‌گیرهای مخروطی با شرایط مرزی گوناگون تحت اثر بارگذاری شبه‌استاتیکی محوری مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. در مطالعه آزمایشگاهی نمونه‌های مخروطی به روش چرخ‌کاری ساخته شده و بین دو صفحه صلب تحت اثر بارگذاری شبه‌استاتیکی قرار گرفته است؛ سپس نحوه فروریزش نمونه، تغییرات نیرو و مقدار انرژی لازم تعیین شده‌اند. 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. شبیه‌سازی نمونه‌های آزمایش‌شده در نرم‌افزار آباکوس به صورت سه‌بعدی و به روش صریح اجرا شده است. مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد مدل ارائه‌شده روش مناسبی برای تعیین پاسخ فروریزش و تعیین نمودار نیرو - جابه‌جایی فراهم می‌کند. نتایج نشان می‌دهد مقدار انرژی جذب‌شده در نمونه‌های مخروطی با شرایط مرزی دوسرگیردار ۱۲ درصد بیشتر از شرایط مرزی یک‌سرگیردار است. از طرفی، تأثیر پارامترهای مؤثر بر عملکرد نمونه‌های مخروطی با استفاده از مدل عددی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد تغییر ضخامت دیواره، طول لوله، نوع ماده و زاویه نیم‌رأس پوسته‌های مخروطی اثر قابل توجهی بر رفتار فروریزشی پوسته‌های مخروطی دارند.

واژگان کلیدی

جذب انرژی، ضربه‌گیرهای مخروطی، بارگذاری شبه‌استاتیکی محوری، آباکوس

۱. مقدمه

بوده‌اند. به‌همین منظور محققان تحلیل‌های بسیاری روی این سازه‌ها انجام داده‌اند. گوپتا و ونکاش (۲۰۰۷) فروریزش

سازه‌های جدارنازک، به‌عنوان سازه‌هایی با نسبت استحکام به وزن بالا و قابلیت جذب انرژی فوق‌العاده، همواره مورد توجه

پوسته‌های مخروطی جدارنازک را تحت اثر بارگذاری محوری به‌صورت آزمایشگاهی و تحلیل عددی مطالعه کردند [۱]. نحوه تغییر شکل پوسته، نمودار نیرو - جابه‌جایی و متوسط بار فروریزش از آزمایش نمونه‌های مخروطی به‌دست آمد. رفتار ویسکوپلاستیک صلب برای ماده در شبیه‌سازی اجزای محدود انتخاب شد که تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت. ژانگ و هو (۲۰۰۹) به بررسی جذب انرژی مقطع‌های مربعی با شیارهای طولی پرداختند [۲]. آنها حالت‌های مختلف شیار در دو وجه و چهار وجه را به‌وسیله نرم‌افزار ال. اس. داینا مورد بررسی قرار دادند و آنها تأثیر پارامترهایی نظیر تعداد شیار و طول شیار را مورد ارزیابی قرار دادند و نتایج نشان داد که با استفاده از شیارهای طولی می‌توان بیشینه نیروی اولیه را ۲۲ درصد نسبت به پروفیل بدون شیار کاهش داد. قمریان و همکاران (۲۰۱۱) ضربه‌گیرهای مخروطی سرپیسته توخالی و تقویت‌شده با فوم پلی‌یورتان تحت اثر بارگذاری محوری را به‌صورت آزمایشگاهی و تحلیل عددی مطالعه نمودند [۳]. در این تحقیق، نتایج شبیه‌سازی با آزمایشگاهی مقایسه و اثر دانسیته فوم بر فروریزش پوسته‌های مخروطی سرپیسته بررسی شد. دامغانی نوری و همکاران (۱۳۸۹) به بررسی ایجاد شیار در بدنه ضربه‌گیرهای استوانه‌ای به‌منظور کاهش میزان نیروی لهیدگی اولیه با انجام آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی پرداختند [۴]. به این منظور لوله‌های آلومینیومی جدارنازک با دو نوع شیار مثلثی نوک‌تیز و شیار مثلثی لبه‌گرد مورد آزمایش قرار گرفتند. تین‌وون پیتوک و چومکوا (۲۰۱۰) مطالعه تجربی و عددی روی رفتار پوسته‌های استوانه‌ای و مخروطی با ضخامت متغیر در طول پوسته تحت بار محوری را انجام دادند و کردند که تغییر شکل پوسته استوانه‌ای با ضخامت متغیر در طول آن با افزایش جذب انرژی و در پوسته مخروطی با کاهش جذب انرژی همراه است [۵]. حسین‌پور و دانش (۲۰۰۳) به بررسی جذب انرژی پوسته‌های استوانه‌ای شیاردار پرداختند و به این نتیجه رسیدند که شیار عاملی برای کنترل جذب انرژی، منحنی نیرو - جابه‌جایی و شتاب نیروی اعمالی پوسته‌های تحت بار محوری است [۶]. نیک‌نژاد و لیاقت (۱۳۹۰) رفتار چین‌خوردگی ستون‌های جدارنازک آلومینیومی با سطح مقطع مربعی و مستطیلی‌شکل، در دو حالت توخالی و پر شده از فوم پلی‌اورتان، تحت بارگذاری محوری شبه‌استاتیکی را با یکدیگر مقایسه نمودند [۷]. مقایسه نتایج تست‌های انجام‌شده نشان داد که پرکننده فوم پلی‌اورتان با دانسیته پایین، نیروی

متوسط چین‌خوردگی و نیز مقدار ماکزیمم نیرو و تعداد چین‌های تشکیل‌شده در ستون را افزایش می‌دهد. علوی‌نیا و فرشاد (۱۳۹۱) به بررسی تجربی اثر هندسه مقطع (دایره، شش‌ضلعی و مربع) بر رفتار مکانیکی مقاطع جدارنازک با و بدون فوم فلزی تحت تأثیر بارهای محوری شبه‌استاتیکی پرداختند [۸]. لوله‌ها و فوم مورد استفاده از جنس آلومینیوم انتخاب شد و نتایج تحقیق نشان داد که مقطع دایره دارای بیشترین مقدار نیروی متوسط و جذب انرژی است و از طرفی فوم آلومینیومی نیز سبب بالارفتن میزان جذب انرژی و بالارفتن مقدار نیروی میانگین می‌شود. علوی‌نیا و همکاران (۱۳۹۱) 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 [۹]. رضوانی و دامغانی نوری (۱۳۹۱) جذب انرژی در استوانه‌های جدارنازک شیاردار پر شده با فوم پلیمری تحت بار محوری فشاری را مورد مطالعه قرار دادند [۱۰]. به این منظور شیارهای حلقوی به‌صورت یک در میان داخلی و خارجی در جداره استوانه ایجاد شد و ظرفیت جذب انرژی در لوله‌های توخالی و پر شده با فوم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نحوه فروریزش و میزان انرژی جذب‌شده در لوله‌های جدارنازک شیاردار می‌تواند به‌وسیله تعداد شیارها و فوم کنترل گردد. علوی‌نیا و چهاردولی (۲۰۱۶) به بهینه‌سازی پوسته‌های تودرتوی سه‌جداره پرداختند [۱۱]. در این پژوهش مشخص شد که این سازه‌ها نسبت به سازه‌های تک‌جداره (با جرم یکسان) گنجایش جذب انرژی بالاتری دارند. سپس این سازه‌ها در ضخامت‌ها و ارتفاع‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفتند و مقدار بهینه جهت جذب انرژی بالا و کاهش نیروی بیشینه مشخص گردید. علوی‌نیا و خدابخش (۱۳۹۵) اثر فاصله لوله‌های جدارنازک متداخل را بر رفتار مکانیکی و جذب انرژی آنها از طریق شبیه‌سازی با نرم‌افزار اجزای محدود بررسی نمودند [۱۲]. نتایج این تحقیق نشان داد که لوله‌ها در یک فاصله تقریباً مشخص و یکسان از هم دارای بیشترین مقدار جذب انرژی هستند؛ این فاصله تقریبی همان فاصله ۴ تا ۵ میلی‌متری بین دو لوله است و تعداد چین‌خوردگی‌ها در این فاصله‌ها دارای بیشترین مقدار می‌باشد. علوی‌نیا و چهاردولی (۲۰۱۶) پارامترهای مؤثر بر فروریزش پوسته‌های تودرتوی سه‌جداره را به روش

تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند [۱۳]. در این مطالعه، اثر ضخامت و قطر لوله‌ها مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که با افزایش ضخامت، متوسط نیروی فروریزش افزایش می‌یابد. رضوانی و همکاران (۱۳۹۵) جذب انرژی در لوله‌های استوانه‌ای پر شده از فوم با آغازگر را تحت نیروی محوری مورد بررسی قرار دادند [۱۴]. در این تحقیق یک آغازگر در بالای لوله پر شده از فوم قرار گرفت و از اعمال نیروی ناگهانی به قسمت اصلی سازه جلوگیری شد. به منظور صحت نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی تعدادی تست تجربی نیز در این پژوهش انجام شد. آذرخش و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار لهیدگی پوسته‌های استوانه‌ای تک‌جداره برنجی پرداختند [۱۵]. در این تحقیق، اثر پارامترهای مهمی چون عیوب هندسی (گرادیان ضخامت، تغییر شکل موجی)، شرایط مرزی، زاویه نیم‌رأس، زاویه برخورد، تقویت‌کننده‌های چندسلولی ستونی و سرعت برخورد مورد بررسی قرار گرفت. آذرخش و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهشی دیگر به مطالعه رفتار فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای دوجداره برنجی تحت بارگذاری محوری پرداختند [۱۶]. در این تحقیق اثر عوامل هندسی نظیر ضخامت، زاویه نیم‌رأس و همچنین سرعت و جرم برخوردکننده بر نسبت انرژی جذب‌شده دینامیکی به استاتیکی مورد بررسی قرار گرفت. آذرخش و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی تجربی و عددی جذب انرژی لوله‌های جدارنازک مخروطی تک‌جداره تحت بارگذاری محوری و مایل پرداختند [۱۷]. در این تحقیق بارگذاری مایل در زوایای مختلف بر نمونه‌های استوانه‌ای و مخروطی صورت گرفت و همچنین اثر سرعت برخوردکننده بر میزان جذب انرژی لوله‌های توخالی و پر شده با فوم در بارگذاری محوری و مایل مورد بررسی قرار گرفت. آذرخش و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی تجربی و شبیه‌سازی رفتار تغییر شکل لوله‌های دوجداره آلومینیومی با سطح مقطع دایروی تحت بارگذاری محوری شبه‌استاتیکی پرداختند [۱۸]. اثر پارامترهای ابعادی و چگالی فوم نیز توسط این محققان بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که میزان جذب انرژی پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده نسبت به توخالی بیشتر است؛ این در حالی است که نیروی بیشینه فروریزش در هر دو نمونه تقریباً یکسان است.

در مقاله حاضر، در ادامه مطالعات انجام‌شده توسط نویسندگان، نحوه عملکرد ضربه‌گیرهای مخروطی با شرایط مرزی مختلف مطالعه شده است. قابلیت جذب انرژی و نحوه تغییر شکل

این ضربه‌گیرها مهم‌ترین عوامل مورد بررسی در این پژوهش است. مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مدل ارائه‌شده روش مناسبی برای تعیین پاسخ فروریزش و میزان انرژی جذب‌شده ارائه می‌کند. در ادامه، تأثیر پارامترهای مؤثر بر عملکرد نمونه‌های مخروطی با استفاده از مدل عددی بررسی می‌شود که پارامترهای مهم شامل ضخامت دیواره، طول لوله، نوع ماده و زاویه نیم‌رأس پوسته‌های مخروطی است.

۲. مطالعه آزمایشگاهی

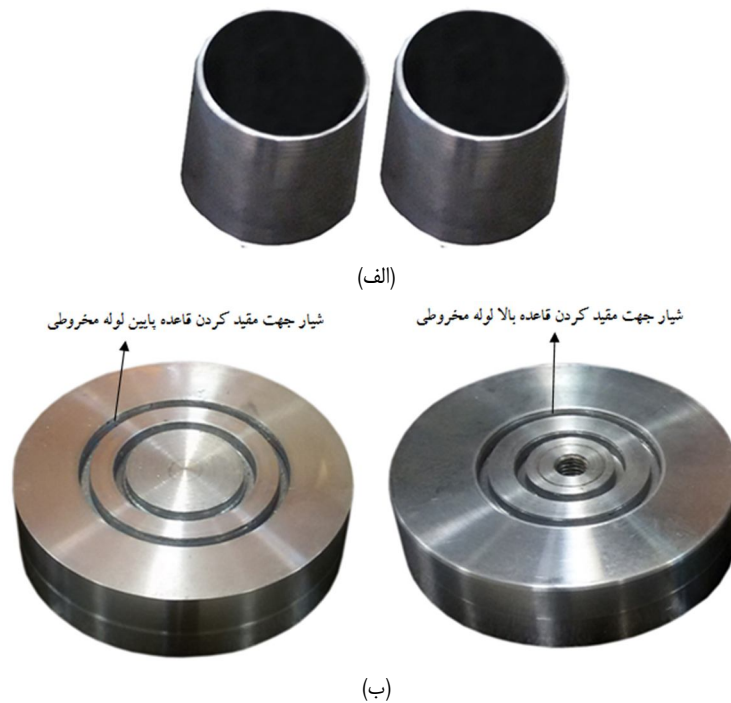
نحوه آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی و ساخت تجهیزات تأمین‌کننده شرایط مرزی، اندازه‌گیری دقیق هندسی و تعیین خواص مکانیکی لوله‌های آلومینیومی از جمله مراحل است که باید قبل از انجام آزمایش فروریزش محوری^۱ مورد توجه قرار گیرند. نمونه‌های مخروطی مورد نظر از جنس آلومینیوم سری ۱۰۵۰ با زاویه نیم‌رأس ۵ درجه انتخاب شده است که به روش چرخ‌کاری^۲ دستی ساخته شده‌اند. چرخ‌کاری دستی یکی از قدیمی‌ترین روش‌های شناخته‌شده شکل‌دهی است و روش متداول برای ایجاد اشکال مخروطی، استوانه‌ای و نیمه‌کروی در تعداد کم است. تغییر ضخامت نمونه در حین عملیات شکل‌دهی از عوامل بدیهی است که باید در بررسی هندسه نهایی قطعه‌کار بررسی شود. بررسی ابعادی نشان می‌دهد بیشترین ضخامت در این نمونه‌ها در قاعده کوچک (بخش فوقانی) و کمترین مقدار در قاعده بزرگ (بخش تحتانی) است و در فاصله بین دو قاعده ضخامت به صورت غیرخطی تغییر می‌کند. در تحقیق حاضر نمونه‌های مخروطی^۳ یک‌سرگردار و دوسرگردار با CTi نشان داده می‌شوند، به طوری که CT بیانگر پوسته مخروطی و i بیانگر شماره نمونه‌هاست (CT1,2,3 نمونه‌ها با شرایط مرزی یکسرگردار و CT4,5 نمونه‌ها با شرایط مرزی دوسرگردار). ابعاد هندسی اندازه‌گیری‌شده نمونه‌های مخروطی یک‌سرگردار و دوسرگردار تحت بارگذاری محوری در جدول ۱ بیان شده است.

جدول ۱. مشخصات هندسی نمونه‌های مخروطی تحت اثر شرایط مرزی متفاوت (میلی‌متر)

نام نمونه	CT1	CT2	CT3	CT4	CT5
ارتفاع	۵۵/۰۵	۵۵/۰۶	۵۵/۰۱	۵۵/۱۱	۵۵/۰۲
قطر بخش تحتانی	۶۰/۰۵	۶۰/۱۵	۶۰/۰۲	۶۰/۰۸	۶۰/۱۰
قطر بخش فوقانی	۵۰/۰۴	۵۰/۰۵	۵۰/۱۴	۵۰/۰۹	۵۰/۱۱
ضخامت بخش فوقانی	۲/۰	۲/۰	۲/۰	۲/۰	۲/۰
ضخامت بخش تحتانی	۱/۸	۱/۷	۱/۷	۱/۹	۱/۶

می‌شود. بنابراین با توجه به متغیر بودن نیروی وارده از سوی ابزار اپراتور به ورق مسطح در طول فرایند، انتظار تغییر ضخامت در دیواره مشهود است که در برخی نمونه‌ها مانند (CT5) ممکن است این اختلاف ضخامت آشکارتر باشد. در شکل ۱ نمایی از لوله‌های مخروطی و فیکسچرها را جهت مقیدکردن ابتدا و انتهای لوله‌ها نمایش داده شده است.

همان‌طور که اشاره شد، یکی از مشکلات عمده ساخت قطعات به‌روش چرخ‌کاری تغییر ضخامت دیواره مخروطی است. در این فرایند، ورق مسطح در اثر تماس ابزار روی سطح قالب شکل داده می‌شود به‌طوری‌که ورق همراه با قالب دوران می‌کند. ابزار، که به شکل اهرم یا غلتک است، به‌صورت محوری یا شعاعی حرکت داده می‌شود و تغییر شکل پلاستیک در اثر تماس نقطه‌ای و با اعمال نیرو به ورق ایجاد



شکل ۱. نمایی از (الف) فیکسچر، (ب) لوله‌های مخروطی

حرکت می‌کند. نمودار نیرو - جابه‌جایی و انرژی جذب شده به‌همراه نحوه فروریزش از جمله خروجی‌های آزمایشگاهی رفتار لوله‌های مخروطی تحت بارگذاری محوری محسوب می‌شوند. شکل ۴ فروریزش محوری لوله‌های مخروطی (یک‌سرگیردار و دوسرگیردار) را نشان می‌دهد که بعد از کاهش ارتفاع ۶۰ درصدی طول اولیه به‌دست آمده‌اند.

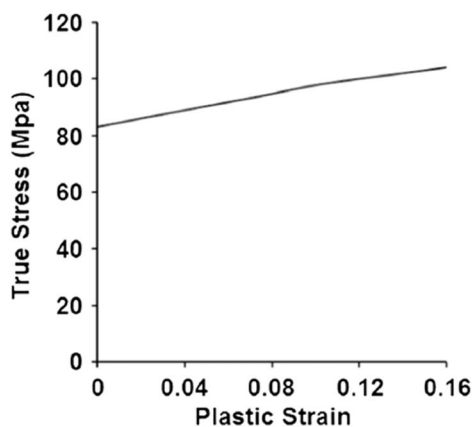
شکل ۵ نمودار نیرو - جابه‌جایی فروریزش نمونه‌های مخروطی را تحت شرایط مرزی مختلف نشان می‌دهد. آنچه به‌وضوح مشخص است، افزایش اولین بیشینه نیروی فروریزش نمونه‌های مخروطی دوسرگیردار نسبت به یک‌سرگیردار است که علت آن عدم واژگونی سطح قاعده کوچک است. چون در شرایط مرزی دوسرگیردار قاعده فوقانی نمونه‌ها مقید شده است، برخلاف شرایط مرزی یک‌سرگیردار فروریزش از ناحیه پایین‌تری نسبت به قاعده فوقانی اتفاق می‌افتد. این امر سبب افزایش اولین بیشینه

تعیین خواص مکانیکی لوله آلومینیومی مرحله دیگری از انجام آزمایش تجربی محسوب می‌شود که در این مطالعه برای انجام شبیه‌سازی، مشخص کردن رفتار آلومینیوم ضروری است. نمودار تنش حقیقی - کرنش پلاستیک ماده آلومینیومی لوله‌های مخروطی مطابق شکل ۲ با استفاده از آزمایش کشش (استاندارد ASTM E8-M) تعیین شد. مدول الاستیسیته و ضرایب پواسون با نصب کرنش‌سنج به نمونه‌های آزمایشگاهی به‌ترتیب ۵۵/۷ گیگا پاسکال و ۰/۳۱ تعیین شد. بر طبق این نمودار، مقدار تنش تسلیم برابر ۸۴ مگاپاسکال استخراج گردید.

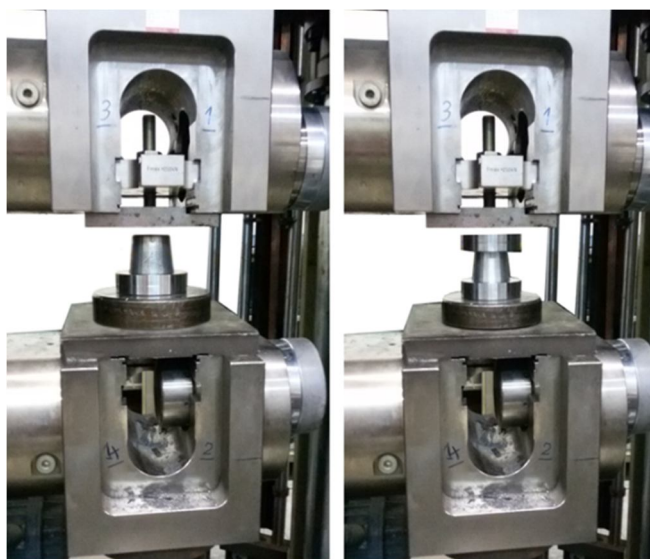
شکل ۳ لوله مخروطی یک‌سرگیردار و دوسرگیردار را تحت آزمایش فشار محوری توسط دستگاه زویک ۵۰ تی دانشگاه صنعتی امیرکبیر نشان می‌دهد. در این آزمایش لوله‌های مخروطی بین دو فک تخت قرار داده می‌شوند، به‌طوری‌که فک تحتانی ثابت و فک فوقانی با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه به‌صورت کاملاً محوری

برای مقدار جابه‌جایی یکسان بیشتر باشد. در مطالعه حاضر، مقدار انرژی جذب‌شده در نمونه‌های مخروطی با شرایط مرزی دوسرگیردار (۵۹۰ ژول) ۱۲ درصد بیشتر از شرایط مرزی یک‌سرگیردار (۵۲۷ ژول) است.

نیروی فروریزش و کاهش تعداد چین‌های تشکیل‌شده 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



شکل ۲. نمودار تنش حقیقی - کرنش پلاستیک ماده آلومینیومی



شکل ۳. آزمایش فشار محوری لوله‌های مخروطی با شرایط مرزی یک‌سرگیردار و دوسرگیردار



شکل ۴. فروریزش نهایی لوله‌های مخروطی با شرایط مرزی الف) یک‌سرگیردار و ب) دوسرگیردار

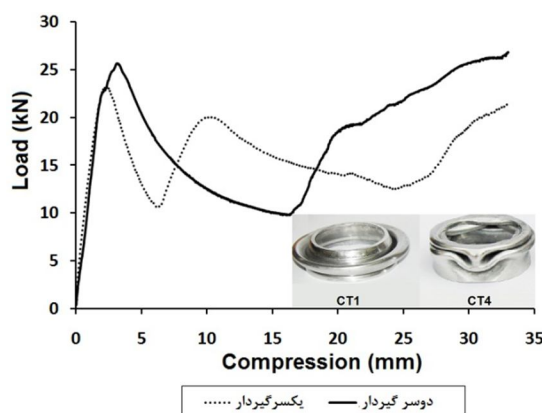
محوری استفاده شده است. شکل ۶ هندسه و بارگذاری لوله مخروطی را در تحلیل عددی نشان می‌دهد. با توجه به نتایج آزمایش، برای تحلیل تغییرشکل لوله‌های مخروطی، هندسه این

۳. نحوه شبیه‌سازی

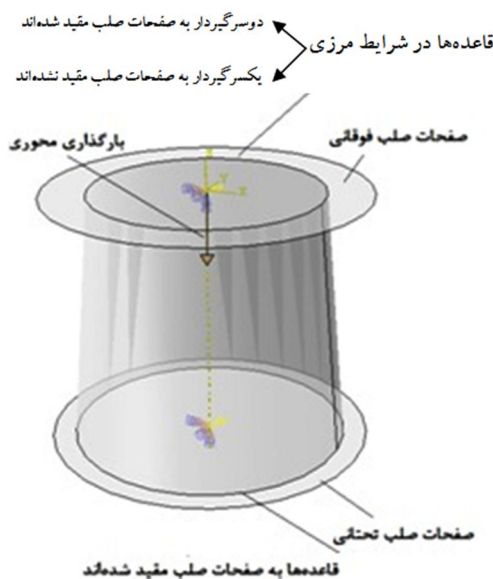
در این تحقیق از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس^۴ برای تحلیل فروریزش لوله‌های مخروطی تحت اثر بارگذاری شبه‌استاتیکی

پلاستیک، منحنی تنش حقیقی - کرنش پلاستیک نمونه کشش ساده استفاده می‌شود (شکل ۲). هر صفحه صلب ممکن است شش درجه آزادی شامل سه مؤلفه جابه‌جایی و سه مؤلفه دوران داشته باشد. چون سطح صلب زیرین در تحلیل آزمایشگاهی به فک ثابت دستگاه متصل است، تمامی درجات آزادی آن مقید شده‌اند. از طرفی، تمامی درجات آزادی غیر از جابه‌جایی در راستای محوری سطح صلب بالایی (که به فک متحرک متصل است) مقید شده است. نوع المان‌ها برای تحلیل اجزای محدود وابسته به هندسه نمونه و روش تحلیل است. برای شبیه‌سازی لوله و صفحات صلب به ترتیب از المان‌های پوسته‌ای چهارگوش با چهار گره (S4R) و المان صلب (R3D4) استفاده شده است. در تحقیق حاضر اثر اندازه المان‌های پوسته مخروطی بررسی شده است که با توجه به همگرایی پاسخ فروریزش اندازه المان‌های پوسته مخروطی ۱×۱ میلی‌متر مربع انتخاب گردید.

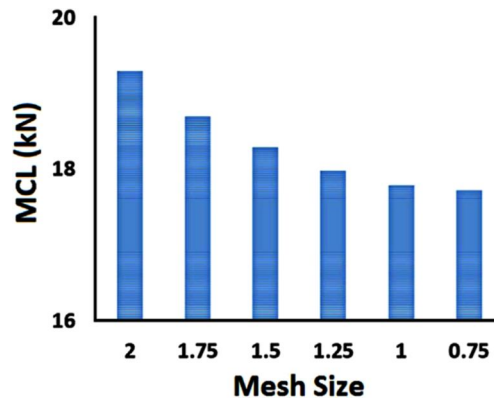
سازه به صورت سه‌بعدی در نظر گرفته می‌شود. بهترین روش برای ایجاد عیوب هندسی^۵ در مدل عددی استفاده از مدهای کماتش است. برای به دست آوردن مدهای کماتش و مقادیر ویژه، لوله مخروطی تحت اثر نیروی واحد در جهت محور قرار داده می‌شود. ضریب نقش هر مد، بیشینه جابه‌جایی اولیه لوله در هر نقص (مد کماتش) است. چون شرط مرزی تماسی برای جلوگیری از نفوذ نقاط مختلف لوله به داخل قطعات صلب و امکان لغزش لوله روی سطوح صلب تعریف می‌شود، در این مطالعه بین سطح خارجی لوله با سطح صلب بالایی شرط تماس تعریف شده و مقدار ضریب اصطکاک آن ۰/۱۵ در نظر گرفته شده است [۱۹]. همچنین رفتار الاستیک - پلاستیک ماده آلومینیومی لوله‌های مخروطی که با استفاده از آزمایش کشش تعیین شد، در مدل عددی تعریف می‌شود؛ یعنی برای معرفی ناحیه الاستیک ماده، مدول یانگ، ضریب پواسون و چگالی تعریف می‌شود و برای معرفی ناحیه



شکل ۵. مقایسه نمودار نیرو - جابه‌جایی فروریزش نمونه‌های مخروطی یک‌سر گیردار و دوسر گیردار تحت بارگذاری محوری



شکل ۶. هندسه پوسته مخروطی سه‌بعدی تحت بارگذاری محوری با شرایط مرزی مختلف



شکل ۷. بررسی اثر اندازه المان بر متوسط نیروی فروریزش

۴. نتایج و بحث

شکل ۸ مراحل فروریزش پوسته مخروطی را تحت شرایط مرزی مختلف نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی‌ها فروریزش پوسته مخروطی با شرایط مرزی مختلف از ناحیه فوقانی به صورت تاخوردگی شروع می‌شود و پشت سرهم ادامه می‌یابد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در شرایط مرزی دوسرگیدار لبه قاعده فوقانی نمونه مخروطی بدون تغییر باقی‌مانده است. این در حالی است که در شرایط مرزی یک‌سرگیدار این قاعده تحت اثر نیروی فشاری تغییر شکل یافته است. بدیهی است که این امر بیانگر صحت شرایط مرزی در شبیه‌سازی حاضر است.

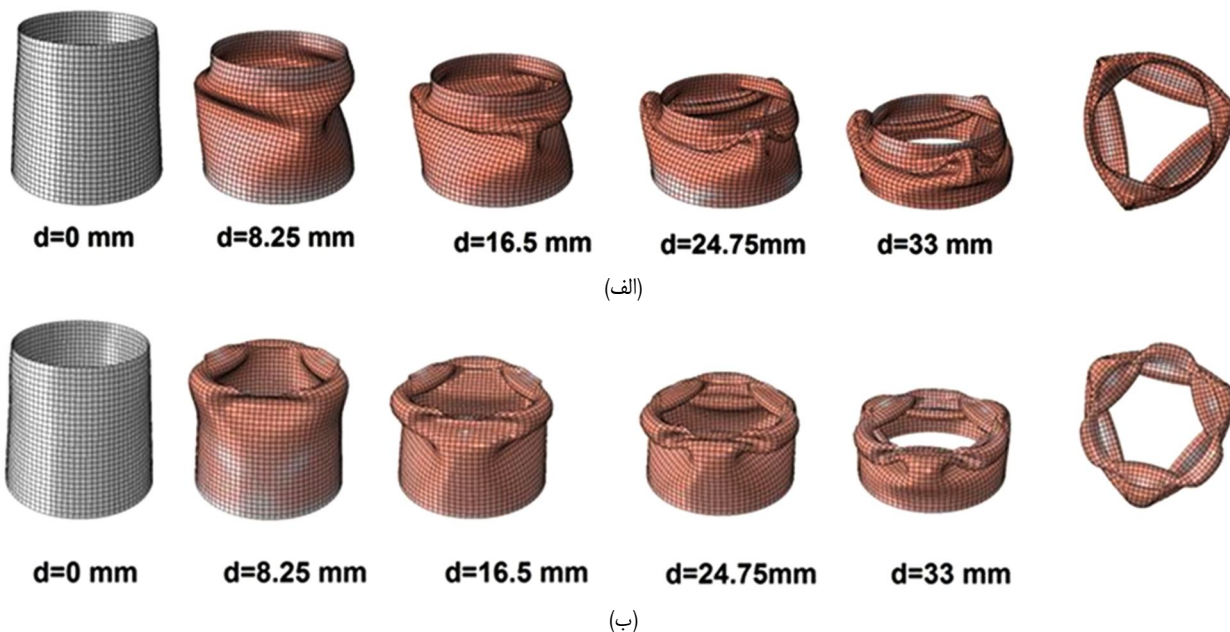
شکل ۹ فروریزش نهایی نمونه مخروطی یک‌سرگیدار و دوسرگیدار را تحت اثر بارگذاری شبه‌استاتیکی محوری در حالت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در طی جابه‌جایی برابر تغییر شکل نمونه‌های شبیه‌سازی با حالت آزمایشگاهی مشابه هستند.

شکل ۱۰ نمودار نیرو - جابه‌جایی فروریزش نمونه‌های مخروطی با شرایط مرزی یک‌سرگیدار و دوسرگیدار را تحت بارگذاری محوری براساس نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد. مطابق شکل ۸، در شروع بارگذاری، نیرو به‌طور تقریباً خطی تا یک مقدار ماکزیمم افزایش می‌یابد، این روند تغییر نیرو ناشی از رفتار الاستیک پوسته مخروطی تحت اثر بار فشاری، قبل از آغاز کمانش است. با شروع فروریزش سطح فوقانی لوله‌ها و تشکیل چین خارجی نیرو افت می‌کند. سپس نیرو با تشکیل چین داخلی و تکمیل اولین چین خوردگی افزایش می‌یابد که با تشکیل چین خارجی دوباره کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، در حین فرایند فروریزش، نیرو با تشکیل چین خارجی و داخلی به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. میزان افزایش اولین بیشینه نیروی فروریزش

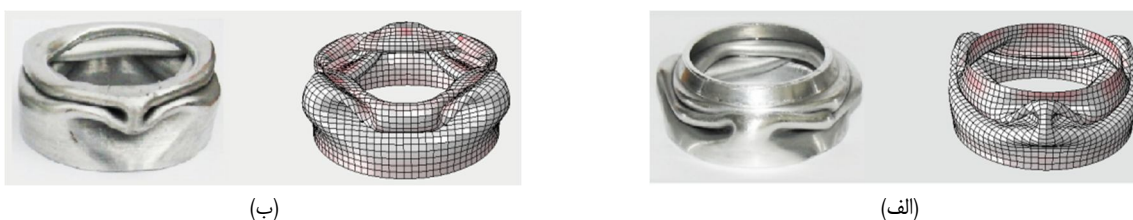
لوله‌ها در مقایسه با سایر بیشینه نیروها قابل توجه است که علت این امر پایداری و مقاومت اولیه لوله‌ها در برابر بارگذاری محوری است. این در حالی است که با افزایش جابه‌جایی و کمانش لوله‌ها، پایداری آنها در برابر بارگذاری محوری کاهش می‌یابد.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، روند تغییرات نیرو در هر دو نمودار مشابه است. به‌طور کلی اختلافی که در بیشینه نیروها و میزان انرژی جذب شده پوسته‌های مخروطی آلومینیومی (در حالت تجربی و عددی) مشاهده می‌شود را می‌توان به صورت زیر تشریح کرد:

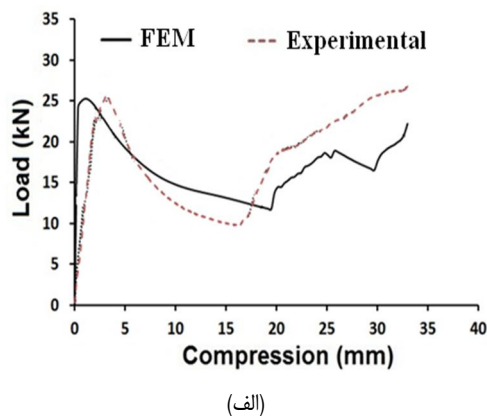
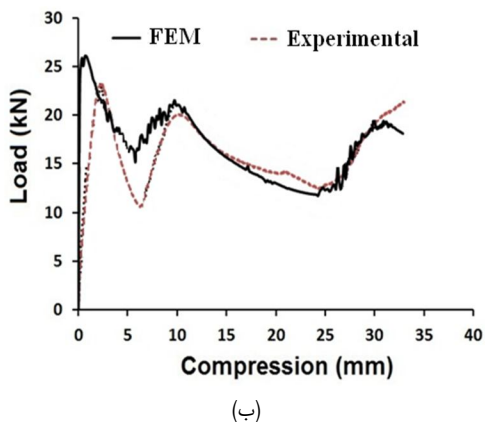
۱. وجود عیوب و نقص اولیه در نمونه‌ها؛ پوسته‌های مخروطی ساخته شده به روش چرخ‌کاری دارای نقص اولیه (شامل تغییر غیرخطی ضخامت، برآمدگی سطح و جز این‌ها) می‌باشند که در این شبیه‌سازی نقص‌های اولیه به صورت حدودی به نرم‌افزار المان محدود اعمال شده است.
۲. عدم مطابقت دقیق بین شرایط مرزی اعمال شده در آزمایش و نرم‌افزار المان محدود: در آزمایش، سطح قاعده پایین نمونه‌های مخروطی توسط شیار قطعه فولادی گیردار شده است این شرایط مرزی اجازه حرکت افقی بسیار اندکی را برای نمونه‌های مخروطی فراهم می‌نمود در حالی که این امر در نرم‌افزار المان محدود لحاظ نشده است.
۳. خطای حسگرها: خطای حسگر موجود در آزمایش برای اندازه‌گیری نیروها، جابه‌جایی‌ها و نیز خطای حسگر سیستم اندازه‌گیری در آزمایش اندازه‌گیری نیز یکی از عوامل اختلاف شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی است.



شکل ۸. مراحل فروریزش پوسته مخروطی تحت بارگذاری محوری در جابجایی‌های مختلف با شرایط مرزی؛ الف) دوسرگیردار، ب) یکسرگیردار



شکل ۹. مقایسه فروریزش لوله‌های مخروطی، الف) دوسرگیردار، ب) یکسرگیردار در حالت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی



شکل ۱۰. مقایسه نمودار نیرو - جابه‌جایی پوسته مخروطی با شرایط مرزی؛ الف) دوسرگیردار، ب) یکسرگیردار در حالت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی

۵. بررسی پارامتری

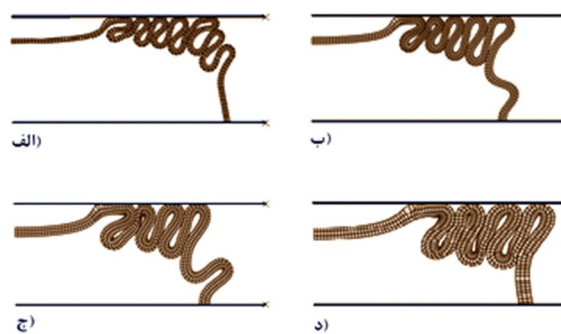
میزان انرژی جذب‌شده و هندسه فروریزش نمونه‌های مخروطی بررسی شود. در این مطالعه، به دلیل کاهش زمان تحلیل‌ها، از مدل متقارن محوری برای بررسی پارامترهای هندسی استفاده شده است. از طرفی، به دلیل تشابه نتایج بررسی پارامتری برای دو نوع

پس از اطمینان از صحت مدل ارائه‌شده برای تحلیل فرایند فروریزش لوله‌های مخروطی، لازم است با استفاده از این مدل‌ها اثر ابعاد هندسی شامل ضخامت، زاویه نیم‌رأس پوسته‌های مخروطی، نوع ماده و طول نمونه بر متوسط نیروی فروریزش،

شرایط مرزی، بررسی پارامتری تنها برای شرایط مرزی یک سرگیردار انجام شده است.

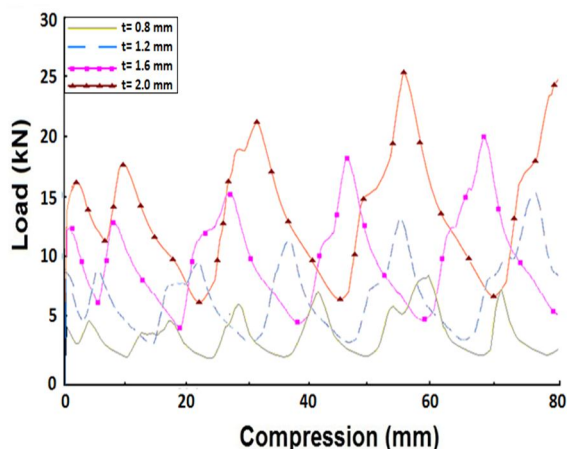
۵-۱. اثر ضخامت بر رفتار فروریزش نمونه مخروطی

در این بخش اثر پارامتر ضخامت بر اولین بیشینه نیرو، متوسط نیروی فروریزش و انرژی ویژه جذب شده در طول جابه‌جایی فروریزش متقارن محوری پوسته‌های مخروطی تحت اثر بارگذاری شبه‌استاتیکی محوری بررسی می‌شود. تمامی نمونه‌های مخروطی دارای ابعاد هندسی و شرایط مرزی مشابه هستند و تنها تفاوت در ضخامت آنهاست. گفتنی است مقدار ارتفاع، قطر پایینی و بالایی نمونه مخروطی به ترتیب ۱۰۰، ۶۵ و ۳۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در این بخش از مطالعه، ضخامت نمونه‌های مخروطی برابر ۰/۸، ۱/۲، ۱/۶ و ۲/۰ میلی‌متر انتخاب شده است (ضخامت در طول هر نمونه ثابت و یکنواخت در نظر گرفته شده است). شکل ۱۱ اثر ضخامت را بر شیوه فروریزش متقارن محوری پوسته‌های مخروطی برای جابه‌جایی ۸۰ میلی‌متر نشان می‌دهد. چون افزایش ضخامت سبب افزایش پایداری پوسته‌های مخروطی می‌شود، در این شرایط ناحیه آغاز فروریزش از ناحیه پایین‌تری نسبت به لبه فوقانی پوسته‌های مخروطی اتفاق می‌افتد. به عبارت دیگر، با افزایش ضخامت، طول چین‌های تشکیل شده افزایش یافته بنابراین انتظار می‌رود، تعداد چین‌ها کاهش یابد؛ به طوری که پوسته‌های مخروطی با ضخامت ۰/۸ و ۲/۰ میلی‌متر به ترتیب از بیشترین و کمترین تعداد چین برخوردارند.



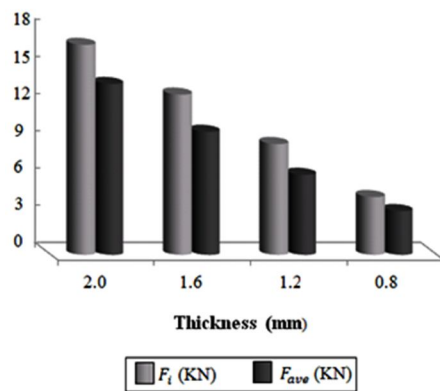
شکل ۱۱. اثر ضخامت میانگین بر نحوه فروریزش پوسته‌های مخروطی (الف) ۰/۸، (ب) ۱/۲، (ج) ۱/۶، (د) ۲/۰ میلی‌متر

پوسته‌های مخروطی سبب افزایش بیشینه نیروهای فروریزش می‌شود، بنابراین اولین چین متقارن محوری می‌بایست در ناحیه پایینی نسبت به قاعده کوچک نمونه مخروطی تشکیل شود. این امر سبب کاهش چین‌خوردگی پوسته‌های مخروطی نسبت به افزایش ضخامت در طی جابه‌جایی برابر می‌شود.



شکل ۱۲. اثر ضخامت میانگین بر نمودار نیرو - جابه‌جایی فروریزش متقارن محوری پوسته‌های مخروطی

همان‌طور که در شکل ۱۳ ملاحظه می‌شود، اولین بیشینه نیرو و متوسط نیروی فروریزش تابعی از ضخامت پوسته‌های مخروطی است. به طوری که افزایش ضخامت پوسته‌های مخروطی باعث افزایش اولین بیشینه نیرو و متوسط نیروی فروریزش می‌شود.



شکل ۱۳. اثر ضخامت بر اولین بیشینه و متوسط نیروی فروریزش پوسته‌های مخروطی در طول جابه‌جایی برابر

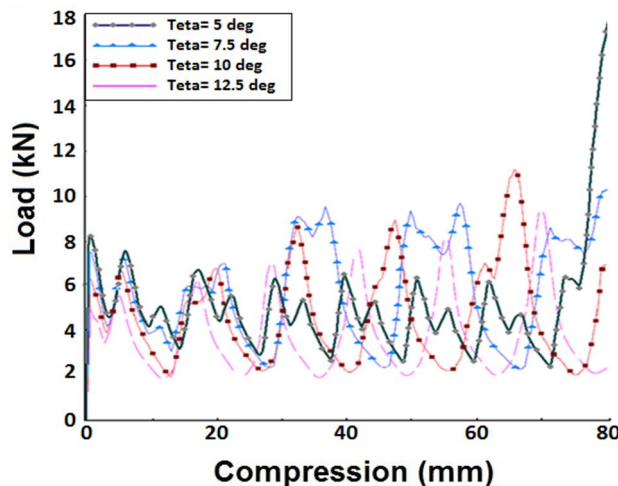
۵-۲. اثر زاویه نیم‌رأس بر رفتار فروریزش نمونه مخروطی

در این بخش قطر قاعده بزرگ (۶۵ میلی‌متر)، طول (۱۰۰ میلی‌متر) و ضخامت پوسته‌های مخروطی (۱ میلی‌متر) ثابت در

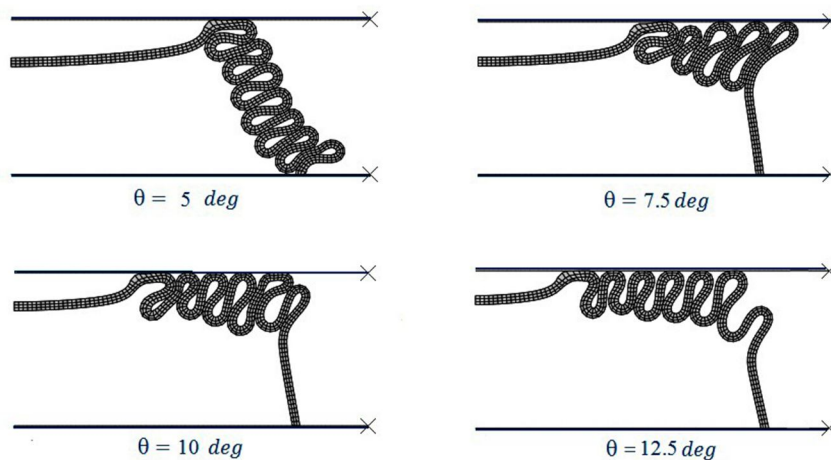
شکل ۱۲ اثر ضخامت، بر نمودار نیرو - جابه‌جایی فروریزش متقارن محوری پوسته‌های مخروطی را تحت اثر بارگذاری محوری نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، افزایش ضخامت

نظر گرفته شده است و اثر تغییر زاویه نیم‌رأس پوسته‌های مخروطی بر فروریزش متقارن محوری آنها تحت اثر بارگذاری شبه‌استاتیک بررسی می‌شود. در تحقیق حاضر زاویه نیم‌رأس پوسته‌های مخروطی به ترتیب برابر ۵، ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ درجه در نظر گرفته شده است. شکل ۱۴ منحنی نیرو - جابه‌جایی را به همراه مراحل فروریزش پوسته‌های مخروطی آلومینیومی با زاویه نیم‌رأس متفاوت تحت اثر بارگذاری شبه‌استاتیک نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، منحنی نیرو - جابه‌جایی نمونه مخروطی با زاویه نیم‌رأس ۵ درجه با دیگر نمونه‌ها متفاوت است. علت این اختلاف، تغییر زاویه چین‌های فروریزش این نمونه نسبت به نمونه‌های دیگر است، به طوری که تنها اولین چین خارجی این نمونه مخروطی با صفحه صلب فوقانی در تماس است. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی فروریزش پوسته‌های

مخروطی تحت اثر بارگذاری محوری در زاویه نیم‌رأس مختلف در جدول ۲ آورده شده است. با افزایش زاویه نیم‌رأس نمونه‌های مخروطی، اولین بیشینه نیروی فروریزش کاهش می‌یابد. اما تأثیر زاویه نیم‌رأس پوسته مخروطی بر متوسط نیروی فروریزش و میزان انرژی جذب شده در طول جابه‌جایی به گونه‌ای دیگر است. چنانچه زاویه نیم‌رأس پوسته‌های مخروطی از ۷/۵ درجه بیشتر باشد، متوسط نیروی فروریزش و میزان انرژی جذب شده کاهش می‌یابد؛ به طوری که برای پوسته مخروطی با زاویه نیم‌رأس ۱۲/۵ درجه مقدار متوسط نیروی فروریزش و میزان انرژی جذب شده در طول جابه‌جایی ۸۰ میلی‌متر به ترتیب ۳/۶۸ کیلو نیوتن و ۲۹۴ کیلوژول است. نکته قابل توجه اینکه متوسط نیروی فروریزش و میزان انرژی جذب شده پوسته استوانه‌ای نسبت به نمونه‌های مخروطی با زاویه نیم‌رأس کم، مقدار کمی افزایش می‌یابد [۲۰].



(الف)



(ب)

شکل ۱۴. الف) منحنی نیرو - جابه‌جایی، ب) مراحل فروریزش پوسته‌های مخروطی آلومینیومی با زاویه نیم‌رأس مختلف تحت اثر بارگذاری شبه‌استاتیک

جدول ۲. نتایج اثر تغییر زاویه نیم‌رأس پوسته مخروطی تحت بارگذاری محوری در طول ۸۰ میلی‌متر جابه‌جایی

نمونه مخروطی	θ deg	F_i KN	F_{ave} KN	E_d J
۱	۵	۸/۳	۶/۰۲	۴۸۲
۲	۷/۵	۷/۵	۵/۳۳	۴۲۶
۳	۱۰	۶/۶	۴/۳۵	۳۴۸
۴	۱۲/۵	۵/۲	۳/۶۸	۲۹۴

جدول ۳. خواص مکانیکی نوع ماده

نوع ماده	ρ Kg/m ³	E Gpa	ν	σ_y Mpa
فولاد	۷۸۰۰	۲۰۷	۰/۳	۳۰۰
آلومینیوم	۲۸۰۰	۵۷/۷	۰/۳	۷۰

۳-۵. اثر نوع ماده بر رفتار فروریزش نمونه مخروطی

در صنعت هوافضا استفاده از آلیاژهای آلومینیوم و فولاد بسیار مرسوم است. بنابراین در این بخش اثر نوع ماده بر رفتار فروریزش متقارن محوری نمونه مخروطی تحت اثر بارگذاری محوری بررسی می‌شود. در این بخش از تحقیق حاضر، ابعاد هندسی اعم از قطر قاعده، طول و ضخامت نمونه‌های مخروطی به ترتیب ۶۵، ۱۰۰ و ۱ میلی‌متر انتخاب شده است. خصوصیات ماده این نمونه‌ها در جدول ۳ بیان شده است. شکل ۱۵ منحنی نیرو - جابه‌جایی فروریزش پوسته‌های مخروطی فولادی و آلومینیومی را تحت اثر بارگذاری شبه‌استاتیکی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، روند فروریزش نمونه مخروطی آلومینیومی و فولادی بسیار مشابه یکدیگرند. اختلاف زیاد بیشینه و کمینه نیروهای فروریزش نمونه مخروطی فولادی نسبت به آلومینیوم به دلیل بالا بودن تنش تسلیم فولاد نسبت به آلومینیوم است، بنابراین برای کماتش پوسته مخروطی فولادی نیروی زیادتری نسبت به نمونه مخروطی آلومینیوم لازم است. شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نتایج اثر نوع ماده پوسته مخروطی را بر پارامترهای فروریزش آن نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، اولین بیشینه نیروی فروریزش، متوسط نیروی فروریزش و انرژی ویژه جذب‌شده با افزایش تنش تسلیم ماده افزایش می‌یابد. در تحقیق حاضر، انرژی ویژه جذب‌شده نمونه فولادی ۱/۳۲ برابر انرژی ویژه جذب شده در نمونه آلومینیومی است.

۴-۵. اثر طول لوله بر رفتار فروریزش نمونه مخروطی

در این بخش اثر پارامتر اختلاف طول پوسته بر متوسط نیروی فروریزش و میزان انرژی جذب‌شده بررسی می‌شود. سایر ابعاد هندسی و شرایط مرزی ثابت در نظر گرفته می‌شود. قطر تحتانی پوسته مخروطی برابر ۶۵ میلی‌متر، زاویه نیم‌رأس ۱۰ درجه و ضخامت لوله‌های مخروطی برابر ۱ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. طول پوسته‌ها برابر ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ میلی‌متر انتخاب شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ ملاحظه می‌شود، اولین بیشینه نیرو و انرژی جذب‌شده فروریزش، تابعی از اختلاف طول لوله است. به طوری که افزایش طول لوله سبب افزایش اولین بیشینه نیرو و انرژی جذب‌شده می‌شود.

۶. نتیجه‌گیری

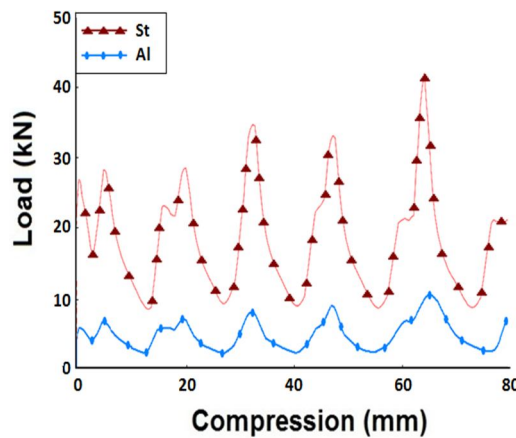
در این مقاله، فروریزش محوری پوسته‌های جدارنازک مخروطی تحت شرایط مرزی دوسرگیردار و یک‌سرگیردار به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی شده است. با توجه به نتایج آزمایش برای تحلیل تغییر شکل سازه جدارنازک مخروطی، از مدل سه‌بعدی برای شبیه‌سازی آن استفاده شد. نتایج عددی نشان می‌دهد، نمودار نیرو - جابه‌جایی و نحوه فروریزش پوسته مخروطی تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی برابری خوبی با نتایج تجربی دارد. بنابراین از مدل اجزای محدود ارائه‌شده برای تحلیل فروریزش پوسته‌های جدارنازک و بررسی اثر پارامترهای مؤثر بر نحوه

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

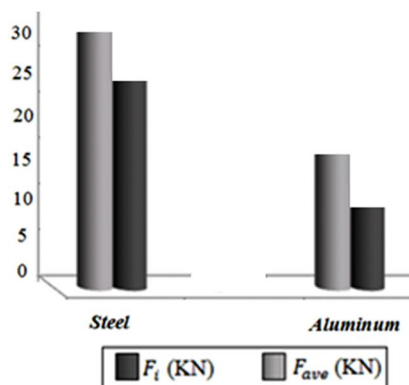
۱. میزان انرژی جذب‌شده نمونه مخروطی دوسرگیردار نسبت به نمونه یک‌سرگیردار برای مقدار جابه‌جایی یکسان بیشتر است. در مطالعه حاضر، مقدار انرژی جذب‌شده در نمونه‌های مخروطی با شرایط مرزی دوسرگیردار ۱۲ درصد بیشتر از شرایط مرزی یک‌سرگیردار است.

۲. به‌طور کلی اختلافی که در بیشینه نیروها و میزان انرژی جذب‌شده پوسته مخروطی آلومینیومی (در حالت تجربی و عددی) مشاهده می‌شود را می‌توان بدین تشریح کرد: الف) وجود عیوب و نقص اولیه در پوسته‌های مخروطی به‌دلیل روش تولید آنها (چرخکاری)؛ ب) عدم مطابقت دقیق بین شرایط مرزی اعمال شده در آزمایش و نرم‌افزار المان محدود؛ ج) خطای حسگرهای موجود در آزمایش برای اندازه‌گیری نیروها، جابه‌جایی‌ها و جز این‌ها.

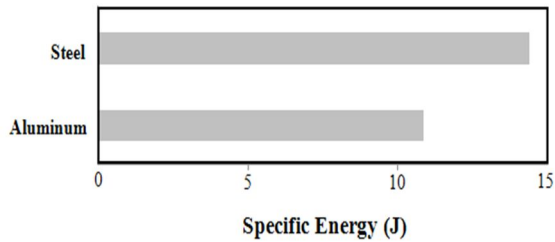
۳. افزایش ضخامت پوسته‌های مخروطی سبب افزایش اولین بیشینه نیرو و متوسط نیروی فروریزش می‌شود.
۴. افزایش زاویه نیم‌رأس نمونه‌های مخروطی سبب کاهش اولین بیشینه نیروی فروریزش می‌شود.
۵. زاویه نیم‌رأس بیشتر از ۷/۵ درجه سبب کاهش متوسط نیروی فروریزش و میزان انرژی جذب‌شده می‌شود.
۶. متوسط نیروی فروریزش و میزان انرژی جذب‌شده پوسته‌های استوانه‌ای سبب به پوسته‌های مخروطی با زاویه نیم‌رأس کم بیشتر است.
۷. به‌دلیل بالا بودن تنش تسلیم فولاد نسبت به آلومینیوم لذا اولین بیشینه نیروی فروریزش و انرژی ویژه جذب‌شده فولاد از آلومینیوم بیشتر است.
۸. اولین بیشینه نیرو و انرژی جذب‌شده فروریزش، تابعی از اختلاف طول لوله است. به‌طوری‌که افزایش طول لوله باعث افزایش اولین بیشینه نیرو و انرژی جذب‌شده می‌شود.



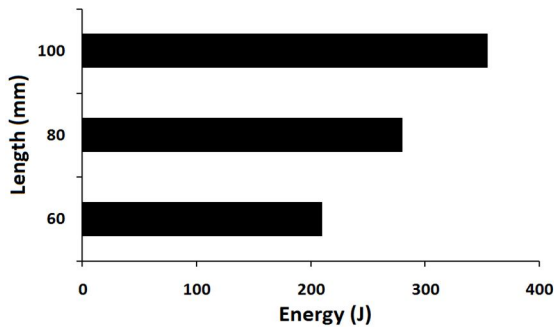
شکل ۱۵. منحنی نیرو - جابه‌جایی فروریزش پوسته‌های مخروطی فولادی و آلومینیومی تحت اثر بارگذاری شبه‌استاتیکی



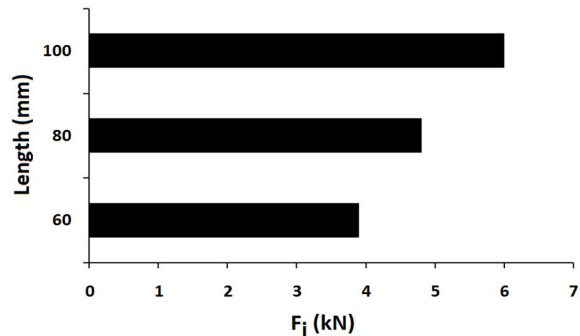
شکل ۱۶. اثر ماده بر اولین بیشینه و متوسط نیروی فروریزش پوسته‌های مخروطی در طول جابه‌جایی برابر



شکل ۱۷. اثر ماده بر انرژی ویژه جذب شده فروریزش پوسته‌های مخروطی در طول جابه‌جایی برابر



شکل ۱۹. اثر اختلاف طول پوسته بر انرژی جذب شده پوسته‌های مخروطی



شکل ۱۸. اثر اختلاف طول پوسته بر اولین بیشینه نیرو مخروطی

۷. مأخذ

- [1] N. K. Gupta, Venkatesh, Experimental and Numerical Studies of Impact Axial Compression of Thin-Walled Conical Shells, *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 34, pp.708–720, 2007.
- [2] X. Zhang, H. Huh, Energy absorption of longitudinally grooved square tubes under axial compression, *Thin-Walled Structures*, 2009.
- [3] A. Ghamarian, H. R. Zarei, M. T. Abadi, Experimental and numerical crashworthiness investigation of empty and foam-filled end-capped conical tubes, *Thin-Walled Structuer*, 49, pp. 1312–1319, 2011.
- [۴] م. دامغانی نوری، م. رضوانی، ح. رحمانی، بررسی تجربی و شبیه‌سازی عددی جذب انرژی در لوله‌های استوانه‌ای با شیارهای مثلثی، هجدهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، تهران، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه شریف، ۱۳۸۹.
- [5] C. Thinvongpituk, V. Chomkwah, Experimental and numerical studies on the behavior of cylindrical and conical shells with varying thickness along the length subjected to axial compression, *Issue 4*, Vol. 10, pp. 92-100, 2010.
- [6] S. J. Hosseinipour, G. H. Daneshi, G.H., “Energy absorbtion and mean crushing load of thin-walled grooved tubes under axial compression”, *Thin-Walled Structures*, Vol. 41, p.p. 31–46, 2003.
- [۷] ع. نیک‌نژاد، غ. لیاقت، مقایسه رفتار چین خوردگی ستونهای چهارگوش جداره نازک در دو حالت توخالی و توپر، نوزدهمین همایش سالانه مهندسی مکانیک، بیرجند، انجمن مهندسان مکانیک ایران، دانشگاه بیرجند، ۱۳۹۰.
- [۸] ع. علوی‌نیا، ع. فرشاد، بررسی تجربی اثر هندسه مقطع بر جذب انرژی مقاطع جدار نازک با و بدون فوم فلزی، بیستمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، شیراز، دانشگاه شیراز، ۱۳۹۱.
- [9] A. Alavi Nia, H. Badnava, Kh. Fallah Nejad, An experimental investigation on crack effect on the mechanical behavior and energy absorption of thin-walled tubes, *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 3594–3607, 2011.
- [۱۰] م. رضوانی، م. دامغانی نوری، بررسی تجربی و عددی جذب انرژی در ضربه گیرهای استوانه‌ای شیاردار پر شده از فوم پلیمری در خودرو، نخستین کنگره ملی توسعه خوشه صنعتی

قطعات خودرو، سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان،
۱۳۹۱.

[11] A. Alavi Nia, S. Chahardoli, Optimizing the layout of nested three-tube structures in quasi-static axial collapse, *Thin-Walled Structures*, Vol. 107, pp. 169–181, 2016.

[۱۲] ع. علوی‌نیا، ح. خدابخش، بررسی عددی تاثیر فاصله لوله‌های جدارنازک متداخل بر رفتار مکانیکی و جذب انرژی آنها، *مدلسازی در مهندسی*، س. ۱۴، ش. ۴۵، ص. ۳۳–۴۷، تابستان ۱۳۹۵.

[13] A. Alavi Nia, S. Chahardoli, Mechanical behavior of nested multi-tubular structures under quasi-static axial load, *Thin-Walled Structures*, Vol. 106, pp. 376–38, 2016.

[۱۴] م. رضوانی، ن. نگهبان واشقانی، م. دامغانی نوری، بررسی تجربی و شبیه‌سازی عددی جذب انرژی در لوله استوانه‌ای پر شده از فوم پلی‌اورتان با استفاده از آغازگر، *مدلسازی در مهندسی*، س. ۱۴، ش. ۴۴، ص. ۶۹–۷۸، بهار ۱۳۹۵.

[۱۵] س. آذرخش، ع. رهی، ع. قمریان، بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار لهیدگی پوسته‌های استوانه‌ای برنجی، *مکانیک سازه‌ها و سازه‌ها*، س. ۶، ش. ۲، ص. ۱۸۱–۱۹۶، ۱۳۹۵.

[16] 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, No. 3, pp.60-72, 2015.

[17] S. Azarakhsh, A. Ghamarian, Collapse behavior of thin-walled conical tube clamped at both ends subjected to axial and oblique loads, *Thin-Walled Structures*, Vol. 112, pp.1-11, 2017.

[۱۸] س. آذرخش، م. حسینی‌سعدی، ع. قمریان، م. حمزه گرگانی، تحلیل تجربی و شبیه‌سازی فروریزش محوری پوسته‌های استوانه‌ای دوجداره توخالی و تقویت شده یک‌سرگردار، *مهندسی مکانیک*، س. ۲۵، ش. ۱۱۱، ص. ۴۷–۶۰، بهمن و اسفند ۱۳۹۵.

[19] 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.

[20] A. Ghamarian, H. R. Zarei, Crashworthiness investigation of conical and cylindrical end-capped tubes under quasi-static crash loading, *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 17, No. 1 19–28, 2012.

پی‌نوشت

1. axial collapse
2. spinning
3. conical tube
4. Abaqus
5. imperfection
6. semi-angle