

# تحلیل تجربی و شبیه‌سازی فروریزش محوری پوسته‌های استوانه‌ای دوجداره توخالی و تقویت‌شده یک‌سرگردار

سجاد آذرخش<sup>۱</sup>، معین‌الدین حسنی سعدی<sup>۲</sup>، علی قمریان<sup>۳</sup>، محمدجواد حمزه گرگانی<sup>۴</sup>

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

۲ کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک

۳ باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

۴ کارشناس ارشد مهندسی سازه‌های هوایی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۶/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۰۷

## چکیده

لوله‌های جدارنازک تقویت‌شده با فوم جاذب انرژی مطلوبی در بارگذاری محوری محسوب می‌شوند که نسبت به لوله‌های توخالی از جذب انرژی بیشتری برخوردارند. در مقاله حاضر، تحلیل تجربی و شبیه‌سازی رفتار تغییر شکل لوله‌های دوجداره آلومینیمی با سطح مقطع دایروی تحت بارگذاری محوری شبه‌استاتیک بررسی می‌شود. در مطالعه تجربی لوله‌های دوجداره توخالی و تقویت‌شده با فوم پلی‌یورتان تحت تأثیر بارگذاری شبه‌استاتیک قرار می‌گیرند و نحوه فروریزش نمونه، تغییرات نیرو و مقدار انرژی لازم تعیین می‌شود. چون در حالت تجربی، نحوه فروریزش تمامی لوله‌های دوجداره به صورت متقارن محوری است، مدل متقارن محوری با استفاده از تحلیل اجزای محدود برای شبیه‌سازی فروریزش لوله‌های دوجداره با سطح مقطع دایروی ارائه می‌شود و اثر رفتار غیرخطی مواد، تماس و تغییر شکل بزرگ در این شبیه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد مدل ارائه شده روش مناسبی برای تعیین پاسخ فروریزش و میزان انرژی جذب‌شده ارائه می‌کند. در ادامه، اثر پارامترهای ابعادی و چگالی فوم بررسی می‌شود و نتایج مزیت استفاده از لوله‌های دوجداره به‌عنوان جاذب انرژی به‌وضوح بیان می‌شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد 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.

## واژگان کلیدی

فروریزش محوری، لوله‌های دوجداره، فوم پلی‌یورتان، جاذب انرژی، تحلیل المان محدود

پوسته‌های استوانه‌ای به دلیل صرفه اقتصادی، وزن پایین و کارآمدی در گستره وسیعی از صنایع با کاربردهایی چون ضربه‌گیر قطار، سپر و بدنه خودرو مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ لذا بررسی رفتار لهیدگی آنها اهمیت دارد. در همین راستا مطالعاتی درباره آنها صورت گرفته است.

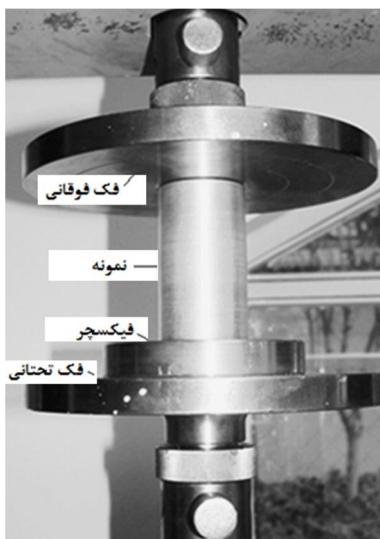
نیک نژاد و لیاقت (۱۳۹۰) رفتار چین خوردگی ستون‌های جدارنازک آلومینیمی با سطح مقطع مربعی و مستطیلی شکل، در دو حالت توخالی و پر شده از فوم پلی‌اورتان با دانسیته پایین، تحت بارگذاری محوری شبه‌استاتیکی را با یکدیگر مقایسه کردند [۱]. مقایسه نتایج تست‌های انجام شده نشان داد که پرکننده فوم پلی‌اورتان با دانسیته پایین، نیروی متوسط چین خوردگی و نیز مقدار ماکزیمم نیرو را افزایش می‌دهد و طول موج چین خوردگی را کاهش می‌دهد. همچنین با پرکردن ستون‌های چهارگوش از فوم پلی‌اورتان، قابلیت جذب انرژی سازه به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. قمریان و فارسی (۱۳۹۱) به مطالعه آزمایشگاهی و شبیه‌سازی فروریزش سازه‌های جدارنازک استوانه‌ای با درپوش کرومی (سازه‌های جدارنازک ترکیبی) تحت اثر بارگذاری شبه‌استاتیکی محوری و بررسی عوامل مؤثر بر نحوه فروریزش آنها پرداختند [۲]. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نشان داد مدل ارائه شده برای تعیین پاسخ فروریزش و تعیین نمودار نیرو - جابه‌جایی و میزان انرژی جذب شده مناسب است.

با استفاده از مدل عددی اثر زاویه نیم‌راس بر متوسط نیروی فروریزش، میزان انرژی جذب شده و نحوه فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای با درپوش کرومی بررسی شد. علوی‌نیا و محمدی‌الموتی (۱۳۹۳) به بررسی رفتار مکانیکی و میزان جذب انرژی لوله‌های هرمی با سطح مقاطع مستطیلی و مربعی با زوایای رأس، صفر، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درجه، که تحت بارگذاری محوری شبه‌استاتیکی قرار گرفته بودند پرداختند [۳]. نتایج نشان دادند که جذب انرژی سطح مقطع مربعی در شرایط یکسان بیشترین میزان را دارد. سینگاس (۱۹۹۹) رفتار فروریزش نامتقارن لوله‌های استوانه‌ای را تحت بارگذاری محوری تحلیل کرد [۴]. وی برای نخستین بار مدلی تحلیلی برای محاسبه بار متوسط فروریزش ضربه‌گیرهای استوانه‌ای به شیوه نامتقارن ارائه نمود که اصول کلی آن مانند روش مدل فروریزش متقارن بر پایه محاسبه انرژی خمشی و کششی در ناحیه فروریزش بود. علوی‌نیا و فرشاد (۱۳۹۳) اثر

هندسه مقطع و فوم فلزی را بر رفتار مکانیکی مقاطع جدارنازک تحت تأثیر بارهای محوری شبه‌استاتیکی به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند [۵]. سه نوع از مقاطع جدارنازک (دایره‌ای، شش‌ضلعی و مربع) به صورت توخالی و توپر تحت بارگذاری محوری قرار داده شد و خصوصیات جذب انرژی آنها شامل نیروی متوسط، انرژی جذب شده و نحوه تغییر شکل مورد مطالعه واقع شد. نتایج پژوهش نشان داد که مقطع دایره‌ای دارای بیشترین میزان جذب انرژی و نیروی متوسط است. شریعتی و همکاران (۱۳۹۳) رفتار کمانش و جذب انرژی پوسته‌های نیمه‌کروی، استوانه‌ای و مخروطی را تحت بارگذاری محوری به روش آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار دادند [۶]. در این پژوهش اثر هندسه، ضخامت، ارتفاع و وجود شیار بر بار کمانش و مقدار جذب انرژی بررسی شد. در انتها بین نتایج تجربی و عددی تطابق خوبی مشاهده گردید. مرزبان‌راد و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که مقطع بیضی نسبت به مقاطع مربع و دایره‌ای ظرفیت جذب انرژی بهتری دارد و چنانچه جنس مقطع از آلومینیم به فولاد تغییر کند زمان مورد نیاز جهت جذب انرژی و لهیدگی لوله تا ۴/۵ برابر بیشتر می‌شود [۷]. آذرخش و همکاران (۱۳۹۵) رفتار لهیدگی و پاسخ انرژی جذب شده لوله‌های استوانه‌ای برنجی را با استفاده از آزمایش و مدل اجزای محدود غیرخطی بررسی کردند [۸]. مقایسه نتایج تجربی و عددی نشان داد که مدل عددی روش مناسبی برای تعیین پاسخ فروریزش و میزان انرژی جذب شده ارائه می‌کند. همچنین از تکنیک شبیه‌سازی صحنه‌گذاری شده برای بررسی اثر پارامترهای مهم مانند عیوب هندسی، شرایط مرزی، زاویه نیم رأس، تقویت‌کننده‌های چندسلولی و جز این‌ها استفاده نمودند. آذرخش و همکاران (۲۰۱۵) به تحلیل آزمایشگاهی و عددی فروریزش لوله‌های دوجداره برنجی در حالت خالی و تقویت شده با فوم پرداختند [۹]. در این تحقیق، نتایج شبیه‌سازی با آزمایشگاهی مقایسه و همچنین پارامترهای مؤثر بر فروریزش از قبیل ضخامت و چگالی فوم توسط آنها بررسی شد.

در این مقاله، در ادامه مطالعات انجام شده توسط نویسندگان، رفتار و نحوه عملکرد ضربه‌گیرهای دوجداره آلومینیمی با سطح مقطع دایروی توخالی و تقویت شده با فوم پلی‌یورتان در شرایط مرزی یک‌سرگیردار به دو روش تجربی و عددی مطالعه شده است. قابلیت جذب انرژی، مقدار نیروی متوسط، نیروی بیشینه و

نشان می‌دهد. در این مطالعه، آزمایش فشار محوری توسط دستگاه کشش - فشار ۶۰ تنی زویک دانشگاه امیرکبیر انجام می‌شود. محدوده سرعت بارگذاری این دستگاه در حدود ۰/۵ تا ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه است. چون سرعت بارگذاری شبه‌استاتیکی اثری بر رفتار فروریزش پوسته‌های فلزی ندارد [۱۰]. بنابراین در این تحقیق، آزمایش فروریزش شبه‌استاتیکی همراه با سرعت بارگذاری ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه و میزان جابه‌جایی تقریباً ۴۵ میلی‌متر انجام می‌شود. در این آزمایش لوله‌های دوجداره به همراه فیکسچر بین دو فک تخت قرار داده می‌شوند، به طوری که فک تحتانی ثابت و فک فوقانی با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه به صورت کاملاً محوری حرکت می‌کند. نمودار نیرو - جابه‌جایی و انرژی جذب شده به همراه نحوه فروریزش از جمله خروجی‌های تجربی رفتار لوله‌های دوجداره تحت بارگذاری محوری محسوب می‌شوند.



شکل ۱. آزمایش فشار محوری لوله‌های دوجداره

تعیین خواص مکانیکی لوله آلومینیمی و فوم پلی‌یورتان مرحله دیگری از انجام آزمایش تجربی محسوب می‌شود که در این مطالعه برای انجام شبیه‌سازی رفتار آلومینیم و فوم پلی‌یورتان ضروری است. نمودار تنش - کرنش مهندسی ماده آلومینیمی ۱۰۵۰ لوله‌های دوجداره مطابق شکل ۲ با استفاده از آزمایش کشش (استاندارد ASTM E8M) تعیین شد. مدول الاستیسیته و ضریب پواسون با نصب کرنش‌سنج به نمونه‌های تجربی به ترتیب ۶۸ گیگا پاسکال و ۰/۳ تعیین گردید. بر طبق این نمودار، مقدار تنش تسلیم برابر ۱۰۱ مگاپاسکال استخراج شد.

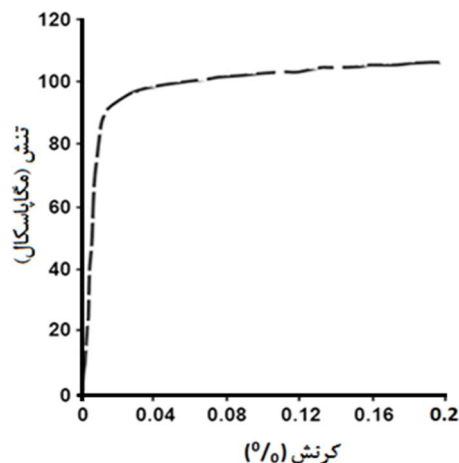
نحوه تغییر شکل این نوع سازه‌ها مهم‌ترین عوامل مورد بررسی در این پژوهش است. مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد، مدل ارائه شده روش مناسبی برای تعیین پاسخ فروریزش و میزان انرژی جذب شده ارائه می‌کند. در ادامه، اثر پارامترهای ابعادی و چگالی فوم بررسی می‌شود و نتایج مزیت استفاده از لوله‌های دوجداره به عنوان جاذب انرژی به وضوح بیان می‌شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که میزان جذب انرژی پوسته‌های استوانه‌ای تقویت شده نسبت به توخالی بیشتر است، این در حالی است که بیشینه نیروی فروریزش در هر دو نمونه تقریباً یکسان است. نتایج این مطالعه در صنایع هوافضا می‌تواند برای بازیابی راکت کاوش بر پایه لوله‌های دوجداره با سطح مقطع دایروی استفاده شود.

## ۲. مطالعه تجربی

نحوه آماده‌سازی نمونه‌های تجربی و ساخت تجهیزات تأمین‌کننده شرایط مرزی، اندازه‌گیری دقیق هندسی و تعیین خواص مکانیکی لوله‌های آلومینیمی و فوم تقویت‌کننده از جمله مراحل است که باید قبل از انجام آزمایش فروریزش نمونه‌های دوجداره تقویت شده با فوم تحت اثر بارگذاری محوری مورد توجه قرار گیرند. نمونه‌های تجربی در این تحقیق شامل پوسته‌های استوانه‌ای دوجداره توخالی و تقویت شده با فوم پلی‌یورتان است. لوله‌های آلومینیمی مورد نظر برای آزمایش فروریزش محوری از سری ۱۰۵۰ انتخاب شده است. این لوله‌ها معمولاً به روش اکستروژن تولید می‌شوند. در مطالعه تجربی قطر لوله داخلی  $40 \pm 0.5$  میلی‌متر و با ضخامت ۲ میلی‌متر و قطر لوله خارجی  $60 \pm 0.5$  میلی‌متر و با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر انتخاب شده است. طول نمونه‌ها نیز توسط فرایند ماشینکاری برابر  $100 \pm 0.1$  میلی‌متر در نظر گرفته شده است. لازم به توضیح است که در این مطالعه نمونه‌های توخالی با اندیس C و نمونه‌های تقویت شده با فوم پلی‌یورتان با چگالی ۶۵ و ۱۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب به ترتیب با اندیس FC1 و FC2 نشان داده می‌شود. چون شرایط مرزی انتخاب شده در این مطالعه یک‌سرگیردار است، برای جلوگیری از حرکت افقی و عمودی پوسته‌های داخلی و خارجی در طی فروریزش از فیکسچری استفاده می‌شود که دارای دو شیار هم‌قطر با لوله‌های دوجداره و به عمق ۳ میلی‌متر است. شکل ۱ لوله دوجداره به همراه فیکسچر را تحت آزمایش فشار محوری

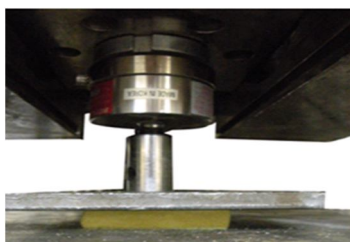
ضربه‌گیرها وجود دارد که استفاده از قطعات انعطاف‌پذیر و تزریق فوم در داخل آنها یکی از روش‌های مرسوم در سازه‌های فضایی است [۱۱].

در مقاله حاضر از فوم پلی‌یورتان با چگالی ۶۵ و ۱۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب برای افزایش قابلیت جذب انرژی پوسته دوجداره آلومینیمی استفاده شده است که برای تعیین خواص مکانیکی آنها از آزمایش فشار محوری مطابق استاندارد ASTM D1621-94 استفاده می‌شود. براساس این استاندارد، نمونه‌های تحت آزمایش مکعب شکل است که دارای ابعاد هندسی ۵۰×۵۰×۳۰ میلی‌متر است (شکل ۳-الف). لازم به ذکر است که چگالی فوم‌های پلی‌یورتان به صورت نسبی تعیین شده‌اند که برابر جرم مکعب فوم بر حجم آن است. شکل ۳ فوم پلی‌یورتان (با دانسیته ۱۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب) را قبل و بعد از بارگذاری فشاری نشان می‌دهد. براساس این آزمایش فوم با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه حدود ۶۵ درصد ضخامت اولیه فشرده می‌شود.

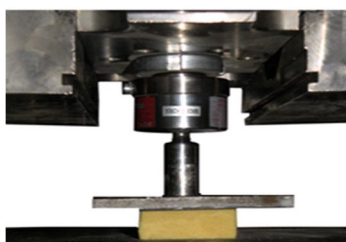


شکل ۲. نمودار تنش - کرنش مهندسی ماده آلومینیمی

به‌طور کلی، برای کاهش شوک ناشی از برخورد ضربه‌گیرها با اجسام دیگر همواره سعی می‌شود که انرژی اولیه ضربه‌گیر در حین برخورد با استفاده از قطعات انعطاف‌پذیر متصل به آن جذب شود. روش‌های تجربی متعددی برای افزایش انرژی جذب‌شده در



(ج)



(ب)



(الف)

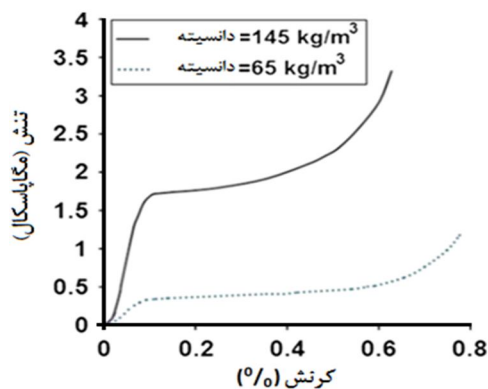
شکل ۳. الف) فوم پلی‌یورتان سخت با دانسیته ۱۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب، (ب) قبل از بارگذاری فشاری تک‌محوری، (ج) بعد از بارگذاری فشاری تک‌محوری

فروریزش، نیرو با تشکیل چین خارجی و داخلی به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد و در نتیجه منحنی نیرو - جابه‌جایی فروریزش متقارن محوری همواره به صورت تناوبی است. میزان افزایش اولین بیشینه نیروی فروریزش لوله‌های دوجداره در مقایسه با سایر بیشینه نیروها قابل توجه است که علت این امر پایداری و مقاومت اولیه لوله‌های دوجداره در برابر بارگذاری محوری است. این درحالی است که با افزایش جابه‌جایی و کماتش لوله‌ها، پایداری آنها در برابر بارگذاری محوری کاهش می‌یابد. در نتیجه منحنی نیرو - جابه‌جایی فروریزش متقارن محوری بدون در نظر گرفتن اولین بیشینه نیرو همواره به صورت تناوبی است [۱۰]. شکل ۶ نمای برش‌خورده فروریزش لوله دوجداره توخالی را پس از جابه‌جایی ۴۵ میلی‌متر صفحه صلب فوقانی نشان می‌دهد.

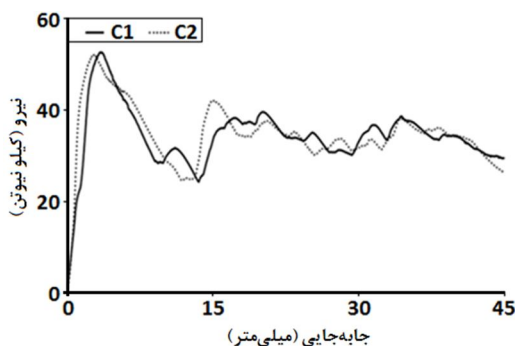
شکل ۴ نمودار تنش - کرنش مهندسی فوم پلی‌یورتان با چگالی‌های ۶۵ و ۱۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب را تحت اثر بارگذاری شبه‌استاتیکی فشاری نشان می‌دهد. نمودار نیرو - جابه‌جایی فروریزش لوله‌های دوجداره توخالی تحت اثر بارگذاری شبه‌استاتیکی در شکل ۵ نمایش داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در شروع بارگذاری، نیرو به‌طور تقریباً خطی تا یک مقدار ماکزیمم افزایش می‌یابد. این روند تغییر نیرو ناشی از رفتار الاستیک لوله‌های دوجداره تحت اثر بار فشاری، قبل از آغاز کماتش است. با شروع فروریزش سطح فوقانی لوله‌های دوجداره 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 متقارن محوری نمونه‌های تجربی دوجداره متفاوت هستند، علت این امر را می‌توان در عیوب هندسی حاصل از اکستروژن نمونه‌ها جستجو کرد.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، به دلیل تشابه شیوه فروریزش لوله‌های دوجداره توخالی (مقارن محوری) تفاوت قابل توجهی در نمودار نیرو - جابه‌جایی آنها دیده نمی‌شود. از طرفی، نحوه



شکل ۴. نمودار تنش - کرنش مهندسی فوم‌های پلی‌یورتان



شکل ۵. نمودار نیرو - جابه‌جایی فروریزش لوله‌های دوجداره توخالی



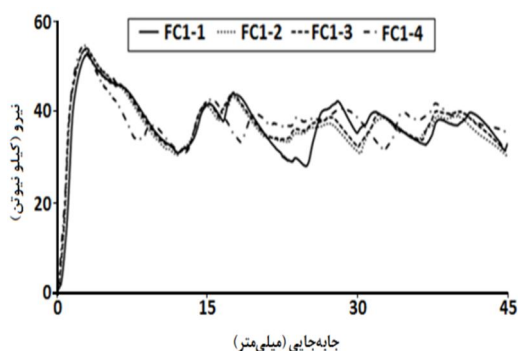
شکل ۶. نمای برش‌خورده فروریزش لوله دوجداره توخالی پس از جابه‌جایی ۴۵ میلی‌متر صفحه صلب فوقانی

لوله‌های دوجداره تقویت‌شده با فوم پلی‌یورتان با چگالی ۶۵ و ۱۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب را تحت بارگذاری محوری نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که شیوه فروریزش و تعداد چین‌های لوله‌های دوجداره پر شده با فوم پلی‌یورتان با چگالی‌های متفاوت مشابه‌اند (شکل ۹). شکل ۱۰ مقایسه نمودارهای نیرو - جابه‌جایی فروریزش لوله‌های دوجداره توخالی و تقویت‌شده با فوم را تحت بارگذاری محوری نشان می‌دهد. آنچه منحنی‌های نیرو - جابه‌جایی این نمونه‌ها را از هم متفاوت می‌کند، بیشینه و کمینه نیروهای هر

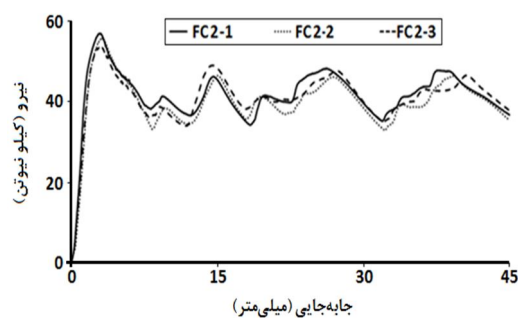
همان‌طور که بیان شد، در مطالعه‌ی حاضر، شیوه فروریزش لوله‌های دوجداره به دلیل تقارن هندسه آزمایشگاهی و شرایط بارگذاری، متقارن محوری است. معمولاً در فروریزش متقارن محوری با صرف‌نظر از اولین بیشینه نیرو که مربوط به واکنش لوله‌های جدارنازک در محدوده الاستیک است، بهترین شیوه فروریزش برای جذب انرژی ضربه است. متوسط نیرو در این شیوه فروریزش مقداری تقریباً ثابت است که از ویژگی‌های اساسی یک ضربه‌گیر ایده‌آل است. شکل ۷ و ۸ به ترتیب نمودارهای نیرو - جابه‌جایی

به سمت بیرون لوله‌های دوجداره هدایت می‌شوند. با توجه به خواص مکانیکی فوم‌های پلی‌یورتان مورد مطالعه نسبت به آلیاژ آلومینیم لوله‌های استوانه‌ای به‌نظر می‌رسد، نیروی برگشت‌پذیری فوم‌ها به‌حدی نیست که سبب برگشت‌پذیری چین‌های لوله‌های دوجداره شود. این پدیده در مطالعات پیشین نیز دیده شده است [۱۱-۱۲].

چین است؛ به‌طوری‌که با افزایش چگالی فوم، بیشینه و کمینه نیروهای منحنی نیرو - جابه‌جایی افزایش می‌یابد. این امر به‌معنای افزایش سطح زیر نمودار نیرو - جابه‌جایی و به‌عبارت دیگر افزایش قابلیت جذب انرژی در لوله‌های دوجداره تقویت‌شده با فوم است. به‌طور کلی، بعد از انجام آزمایش شبه‌استاتیکی به‌دلیل خاصیت برگشت‌پذیری فوم‌های پلی‌یورتان، حجمی از فوم‌های فشرده شده



شکل ۷. نمودار نیرو - جابه‌جایی فروریزش لوله‌های دوجداره تقویت‌شده با چگالی ۶۵ کیلوگرم بر متر مکعب



شکل ۸. نمودار نیرو - جابه‌جایی فروریزش لوله‌های دوجداره تقویت‌شده با چگالی ۱۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب



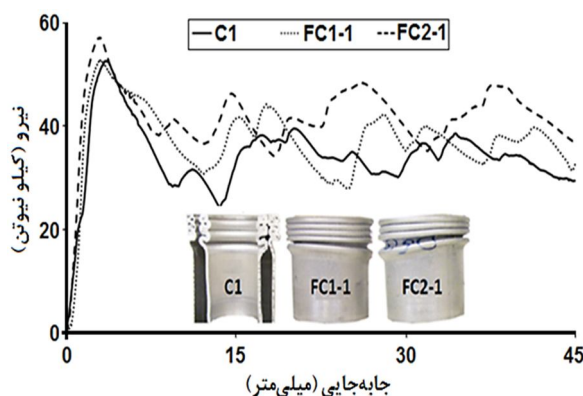
شکل ۹. فروریزش لوله‌های دوجداره تقویت‌شده با فوم با چگالی مختلف پس از جابه‌جایی ۴۵ میلی‌متر صفحه صلب فوقانی

افزایش مقدار کمینه‌های نیرو در منحنی نیرو - جابه‌جایی می‌شود (شکل ۱۰). این درحالی است که وجود فوم سبب تغییر زاویه چین‌های ایجاد شده در لوله تقویت‌شده نسبت به لوله توخالی

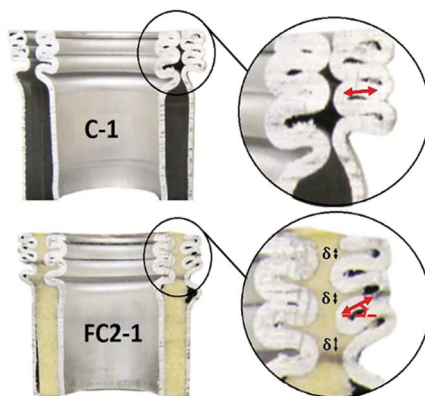
از طرفی دیگر، مطابق شکل ۱۱ به‌دلیل مقاومت فوم در برابر بارگذاری محوری، چین‌های لوله‌های استوانه‌ای تقویت شده با فاصله بیشتری از یکدیگر ( $\delta$ ) قرار می‌گیرند که این امر باعث

تقویت‌شده با فوم برخلاف مطالعات گذشته (بررسی رفتار پوسته‌های استوانه‌ای [۱۱]، پوسته‌های مخروطی [۱۲] و پوسته‌های ترکیبی مخروطی و کروی [۱۳-۱۴] نسبت به لوله‌های توخالی تغییر محسوسی نمی‌کند. از طرفی، انرژی جذب‌شده لوله‌های تقویت‌شده با فوم با چگالی ۶۵ و ۱۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب به ترتیب ۸ و ۲۲ درصد بیشتر از لوله‌های توخالی است. با اینحال در این مطالعه، انرژی ویژه لوله‌های دوجداره تقویت‌شده با فوم به نسبت کمتر از لوله‌های توخالی است.

می‌شود. همان‌طور که بیان شد، یکی از پارامترهای بسیار مهم در ضربه‌گیرهای تقویت‌شده با فوم، افزایش بیشینه نیرو در منحنی‌های نیرو - جابه‌جایی است. در صورتی که این بیشینه نیروها افزایش چشم‌گیری داشته باشند، باعث صدمه‌زدن به سلامت سرنشینان یا حسگرهای الکترونیکی محموله‌های فضایی می‌شود. مقدار پارامترهای مهم در فرایند فروریزش لوله‌های دوجداره توخالی و تقویت‌شده با فوم در جدول ۱ آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بیشینه نیروی فروریزش لوله‌های



شکل ۱۰. مقایسه نمودارهای نیرو - جابه‌جایی فروریزش لوله‌های دوجداره توخالی و تقویت‌شده با فوم



شکل ۱۱. مقایسه نحوه فروریزش لوله‌های دوجداره توخالی و تقویت‌شده با فوم

جدول ۱. مقایسه مهمترین پارامترهای فروریزش لوله‌های تقویت‌شده با فوم نسبت به لوله‌های توخالی

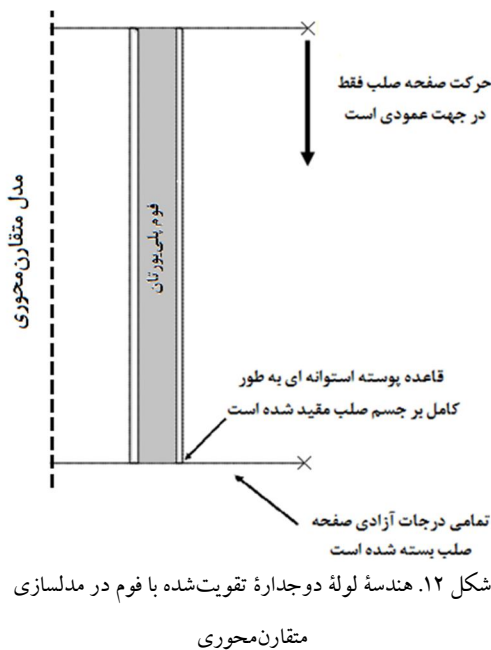
نام نمونه	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	بیشینه نیرو (کیلو نیوتن)	انرژی جذب شده (ژول)	انرژی ویژه (ژول)
C1	۰	۵۲/۶	۱۵۴۳	۲۷/۳۶
FC1-1	۶۵	۵۲/۸	۱۶۷۸	۲۸/۲۹
FC2-1	۱۴۵	۵۷/۱	۱۸۸۴	۲۹/۶۵

### ۳. شبیه‌سازی

بارگذاری شبه‌استاتیکی محوری استفاده شده است. فرایند شبیه‌سازی این مسئله به شرح زیر است.

در این مقاله از نرم‌افزار المان محدود آباکوس [۱۵] برای تحلیل فروریزش لوله‌های دوجداره توخالی و تقویت‌شده با فوم تحت اثر

استفاده از آزمایش کشش ماده آلومینیومی (شکل ۲) تعیین شد، در مدل عددی تعریف می‌شود. در نرم‌افزار المان محدود، برای تعریف رفتار پلاستیک ماده آلومینیوم از مدل پلاستیک<sup>۴</sup> استفاده می‌شود. همچنین در شبیه‌سازی حاضر، از مدل فوم تغییر شکل یافته<sup>۵</sup> برای تحلیل رفتار فوم‌های پلی‌یورتان سخت استفاده می‌شود [۱۱-۱۲]. این مدل توانایی بالایی در تحلیل کماتش ناشی از فشرده‌شدن دیواره سلول‌های فوم‌های الاستیک - پلاستیک دارد.



### ۳-۳. تعریف تماس

تماس در واقع اعمال قیود بر درجات آزادی گره‌های سطوح در تماس است؛ به طوری که این گره‌ها نمی‌توانند در راستای عمود بر سطح به داخل جسم حرکت کنند و می‌توانند از هم جدا شوند یا در راستای مماس بر سطح حرکت کنند. اگر سطح دارای اصطکاک باشد با ایجاد شرط تماس، نیرویی بر گره‌ها در راستای مماس بر سطوح اعمال می‌شود. در این شبیه‌سازی، برای جلوگیری از نفوذ نقاط مختلف لوله‌ی دوجداره به داخل قطعات صلب و فوم پلی‌یورتان نیاز است سطوح در تماس با یکدیگر تعریف شوند. شرایط تماس به دو دسته تقسیم می‌شود:

۱. تماس دو سطح مختلف: تماس ممکن است بین دو سطح مجزای تغییر شکل‌پذیر یا تماس بین یک سطح صلب با یک سطح تغییر شکل‌پذیر ایجاد شود. همان‌طور که در شکل ۱۲ ملاحظه می‌شود، بین سطح بیرونی لوله‌های استوانه‌ای با سطح سطح صلب فوقانی

شکل ۱۲ هندسه و بارگذاری لوله دوجداره را در تحلیل عددی نشان می‌دهد. با توجه به نتایج آزمایش، برای تحلیل تغییر شکل لوله‌های دوجداره و به‌منظور کاهش زمان تحلیل عددی فروریزش آن، هندسه این سازه نسبت به محور آن متقارن در نظر گرفته می‌شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، لوله دوجداره همراه با فوم پلی‌یورتان بین دو خط صلب فوقانی و تحتانی مدل شده است. این خطوط به ترتیب بیانگر فک‌های متحرک و ثابت دستگاه فشار یونیورسال است. به‌طور کلی در شبیه‌سازی فروریزش لوله‌های دوجداره توخالی و تقویت‌شده با فوم از قیود زیر استفاده می‌شود:

۱. قید جسم صلب: این قید به کاربر اجازه می‌دهد تا حرکت نواحی یک مدل را نسبت به حرکت یک نقطه مقید کند. در شبیه‌سازی حاضر صفحات صلب به نقاط مرجع خود مقید شده‌اند.
۲. قید بستن: در برخی از مسائل نقاط واقع بر دو سطح در تماس با هم نمی‌توانند نسبت به هم حرکت داشته باشند و اتصال کاملی بین دو سطح برقرار می‌شود. این شرط تماس را اصطلاحاً قید بستن گویند. 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>۲</sup> توسط درجات آزادی سطح پایه<sup>۳</sup> مقید می‌شود. در این شبیه‌سازی فرض می‌شود سطح فوقانی و تحتانی لوله‌ها به ترتیب آزاد و گیردار است بنابراین در این شبیه‌سازی برای مقید کردن قاعده تحتانی لوله‌ها (سطوح پیرو) به صفحه صلب تحتانی (سطوح پایه) از قابلیت قید بستن استفاده شده است؛ به طوری که تمامی درجات آزادی گره‌هایی از لوله‌ها که با صفحه صلب تحتانی در تماس هستند، نسبت به آن ثابت می‌شوند.

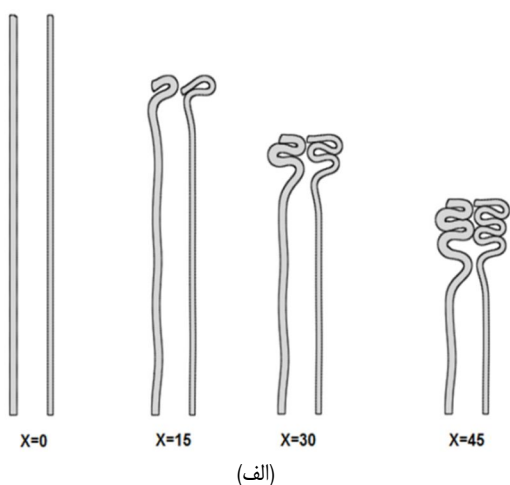
### ۳-۲. رفتار مکانیکی مواد

نرم‌افزار المان محدود اباکوس برای مدل‌سازی رفتار پلاستیک مواد چندین مدل در اختیار دارد و قادر به مدل‌سازی انواع مختلف مواد است. در این مقاله با توجه به فروریزش شبه‌استاتیک از پلاستیسیته غیرحساس به نرخ کرنش استفاده می‌شود. رفتار الاستیک - پلاستیک ماده آلومینیومی لوله‌های دوجداره که با

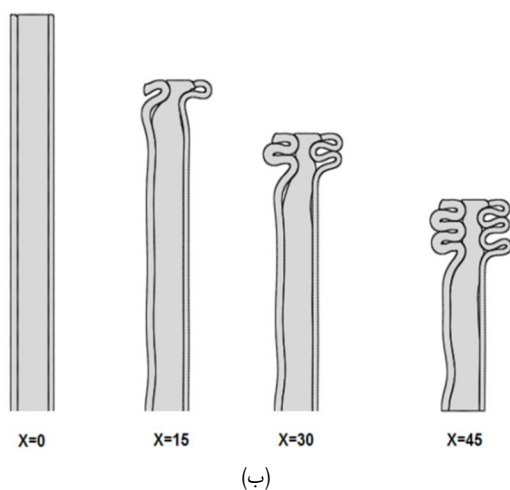


#### ۴. مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی

شکل ۱۴ مراحل فروریزش پوسته استوانه‌ای دوجداره توخالی و تقویت‌شده را تحت اثر بارگذاری شبه‌استاتیکی نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، فروریزش پوسته‌های دوجداره از ناحیه فوقانی به‌صورت تاخوردگی متقارن محوری شروع می‌شود و پشت سرهم ادامه می‌یابد. بنابراین انتظار می‌رود نیروی فروریزش لوله‌های استوانه‌ای با تشکیل چین داخلی و خارجی به‌صورت تناوبی باشد.



(الف)



(ب)

شکل ۱۴. مراحل فروریزش پوسته استوانه‌ای دوجداره

(الف) توخالی، (ب) تقویت‌شده تحت اثر بارگذاری محوری

شکل ۱۵ مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی فروریزش محوری لوله‌های توخالی و تقویت‌شده با فوم پلی‌یورتان را برای هندسه CI نشان می‌دهد. در این نمونه بازدهٔ لهیدگی برابر ۴۵ درصد است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در هر دو حالت شبیه‌سازی و تجربی تعداد چین‌های داخلی و خارجی لوله‌های دوجداره

این شرط تماس ایجاد شده است. مقدار ضریب اصطکاک برای این نوع تماس ۰/۱۵ در نظر گرفته شده است [۱۱-۱۲]. همچنین در نرم‌افزار المان محدود به‌منظور عدم نفوذ فوم پلی‌یورتان در لوله داخلی شرط تماس با ضریب اصطکاک ۰/۱ تعریف شده است [۱۱-۱۲]. برای تمامی تماس‌ها به‌صورت پیش‌فرض تماس سخت<sup>۷</sup> تعریف می‌شود.

۲. خود تماسی<sup>۸</sup>: تماس ممکن است در اثر نزدیک شدن نقاط واقع در یک سطح ایجاد شود و باید از نفوذ نقاط در داخل جسم در محل برخورد نقاط جلوگیری شود. در این شبیه‌سازی به‌طور مجزا احتمال تماس سطوح بیرونی و داخلی لوله‌ها با خودش و همچنین فوم پلی‌یورتان با خودش پیش‌بینی شده است که ضریب اصطکاک برای این نوع تماس صفر است؛ زیرا ضریب اصطکاک خود تماسی اثر چندانی روی رفتار فروریزش لوله‌ها ندارد [۱۱-۱۲].

#### ۳-۴. شرایط مرزی و بارگذاری

هر صفحه صلب ممکن است<sup>۹</sup> 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، در نتیجه، تمامی درجات آزادی آن مقید شده‌اند. از طرف دیگر، تمامی درجات آزادی غیر از جابه‌جایی در راستای محوری سطح صلب بالایی (که به فک متحرک متصل است) مقید شده است.

#### ۳-۵. تعریف المان‌بندی

نوع المان‌ها برای تحلیل اجزای محدود وابسته به هندسه نمونه و روش تحلیل است. برای شبیه‌سازی لوله دوجداره توخالی و تقویت‌شده با فوم و صفحات صلب به‌ترتیب از المان‌های متقارن محوری چهارگوش و المان صلب خطی استفاده شده است، به‌طوری‌که المان‌های چهارگوش دارای چهار گره و المان‌های خطی دارای دو گره هستند. برای مقاله حاضر اثر اندازه المان‌های لوله دوجداره توخالی و تقویت‌شده با فوم بررسی شده است که با توجه به همگرایی پاسخ فروریزش، تعداد المان‌های لوله دوجداره توخالی و فوم به‌ترتیب ۱۳۶۰ و ۵۰۷۰ المان در نظر گرفته شده است.

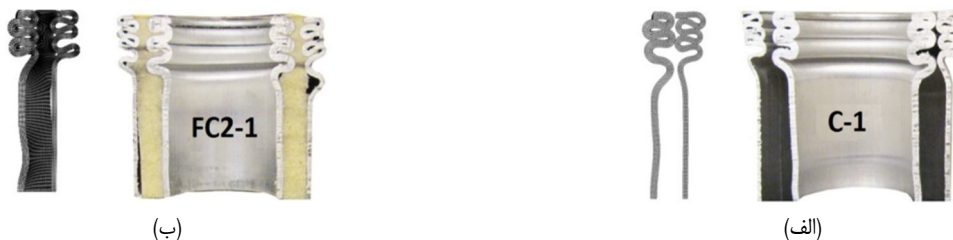
است [۱۱]. از طرفی دیگر، اختلافی که در بیشینه نیروها و میزان انرژی جذب شده لوله دوجداره توخالی و تقویت شده با فوم مشاهده می شود را می توان به صورت زیر تشریح کرد:

۱. وجود عیوب و نقص اولیه: لوله های دوجداره ساخته شده به روش اکستروژن دارای نقص اولیه (شامل تغییر غیرخطی ضخامت، برآمدگی سطح و جز این ها) است. در این شبیه سازی نقص های اولیه به نرم افزار المان محدود اعمال نشده است.

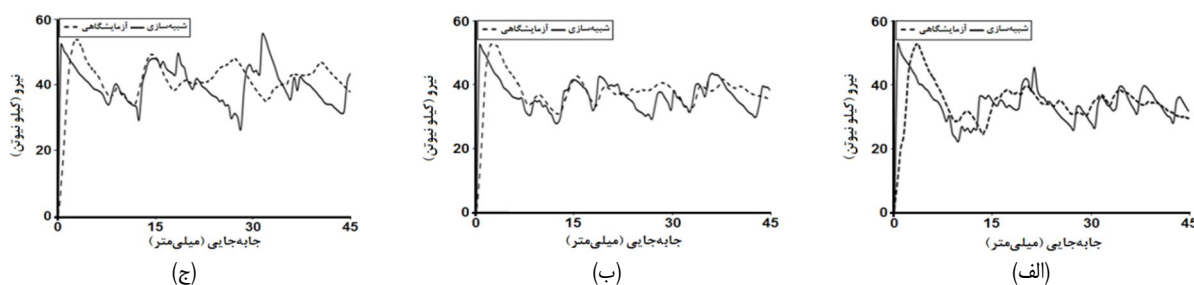
۲. تماس بین لوله های دوجداره و فوم پلی یورتان: در شبیه سازی حاضر تماس بین لوله های دوجداره و فوم با تعریف ضریب اصطکاک و نیروی برشی مدل شده است، در صورتی که در حالت واقعی، به هنگام تشکیل فوم، نیروی فشاری به لوله های دوجداره وارد می شود که سبب عدم جدایش فوم از لوله های دوجداره می شود.

۳. فرض خواص همسانگرد در کل فرایند تغییر شکل فوم پلی یورتان: در شبیه سازی حاضر برخلاف واقعیت خواص فوم پلی یورتان در تمامی جهت یکسان در نظر گرفته شده است.

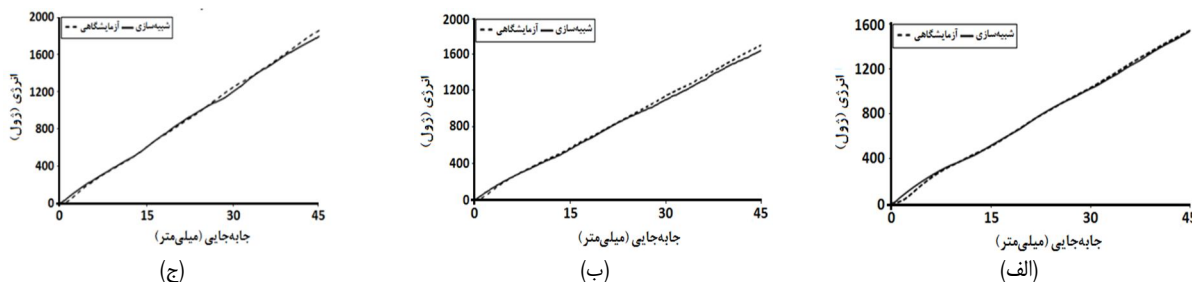
توخالی و تقویت شده با فوم برابر است. شکل ۱۶ نمودار نیرو - جابه جایی و شکل ۱۷ نمودار انرژی - جابه جایی فروریزش متقارن محوری لوله های دوجداره توخالی و تقویت شده با فوم پلی یورتان با چگالی ۶۵ و ۱۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب را براساس نتایج تجربی و شبیه سازی نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود، ضمن تشابه روند تغییر نیرو در هر نمونه، تطابق قابل توجهی بین نتایج تجربی و شبیه سازی وجود دارد. اختلاف بین شیب نمونه های شبیه سازی و تجربی قبل از آغاز چین های متقارن محوری را می توان مربوط به نحوه تعریف خواص ماده در ناحیه الاستیک توسط نرم افزار شبیه سازی برشمرد. چون در نرم افزار خواص الاستیک - پلاستیک توسط آزمایش کشش - فشار محوری و به صورت خط شکسته تعریف می شود و همچنین مدول الاستیسیته به صورت تقریبی (معادل ۷۰ گیگاپاسکال در ماده آلومینیومی) لحاظ شده است، بدیهی است که شیب نمودارهای تجربی و شبیه سازی قبل از آغاز چین های متقارن محوری با هم متفاوت باشد. این امر در سایر تحقیقات پیشین نیز مشاهده شده



شکل ۱۵. مقایسه شبیه سازی و تجربی هندسه فروریزش لوله های دوجداره؛ الف) توخالی، ب) تقویت شده با فوم



شکل ۱۶. نمودار نیرو - جابه جایی فروریزش لوله های دوجداره؛ الف) توخالی و تقویت شده با فوم با چگالی های؛ ب) ۶۵، ج) ۱۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب



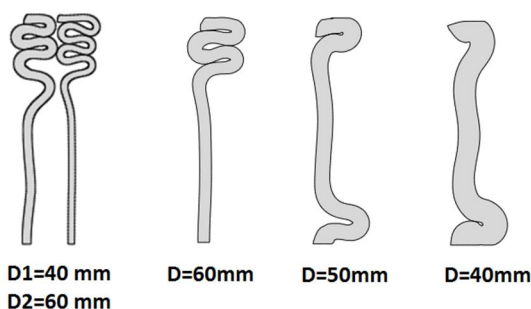
شکل ۱۷. نمودار انرژی - جابه جایی فروریزش لوله های دوجداره، الف) توخالی و تقویت شده با فوم با چگالی های؛ ب) ۶۵، ج) ۱۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب

## ۵. بررسی پارامتری

پس از اطمینان از صحت مدل ارائه شده برای تحلیل فرایند فروریزش لوله‌های دوجداره توخالی و تقویت شده با فوم، لازم است با استفاده از این مدل‌ها اثر پارامترهای هندسی به همراه چگالی فوم بر بیشینه نیروی فروریزش و میزان انرژی جذب شده آنها تحت بارگذاری محوری بررسی شود.

### ۵-۱. تأثیر لوله نانی

در این بخش مزایای استفاده از لوله‌های دوجداره نسبت به لوله تک‌جداره با جرم معادل تحت بارگذاری محوری بررسی می‌شود. پارامترهای هندسی و رفتار مکانیکی لوله دوجداره همانند هندسه C-1 انتخاب شده است. علاوه بر این، قطر لوله تک‌جداره در سه حالت شامل هم‌قطر با لوله داخلی، میانگین قطرهای لوله دوجداره و هم‌قطر با لوله خارجی در نظر گرفته می‌شود. این درحالی است که در این شبیه‌سازی ارتفاع تمامی لوله‌ها یکسان و برابر ۱۰۰ میلی‌متر است. بنابراین، افزایش پارامتر ضخامت دیواره در لوله تک‌جداره تنها عامل برای معادل‌سازی وزن‌های لوله تک‌جداره با دوجداره است. شکل ۱۸ مقایسه نحوه فروریزش محوری لوله‌های استوانه‌ای تک‌جداره و دوجداره را با جرم یکسان نشان می‌دهد. بنابر آنچه بیان شد به‌منظور همسان‌سازی جرم لوله‌ها بدیهی است که نمونه با قطر ۴۰ میلی‌متر دارای بیشترین ضخامت باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، استفاده از لوله‌های دوجداره نسبت به لوله تک‌جداره ضخیم باعث افزایش تعداد چین‌های فروریزش می‌شود. این در حالی است که افزایش تعداد چین در لوله‌های دوجداره خود سبب کاهش مقدار بیشینه‌های نیروها در نمودار نیرو - جابه‌جایی نسبت به لوله‌های تک‌جداره ضخیم می‌شود.



شکل ۱۸. مقایسه نحوه فروریزش محوری لوله‌های استوانه‌ای دوجداره و تک‌جداره با جرم یکسان

جدول ۲ نتایج پارامترهای خروجی شامل بیشینه نیرو، انرژی جذب شده و انرژی ویژه فروریزش محوری لوله‌های استوانه‌ای دوجداره و تک‌جداره را نشان می‌دهد. آنچه به‌وضوح دیده می‌شود، افزایش قابل توجه انرژی ویژه لوله‌های تک‌جداره نسبت به لوله‌های دوجداره با جرم معادل است. نکته قابل تأمل کاهش بیشینه نیروی لوله‌های دوجداره نسبت به لوله‌های تک‌جداره با جرم معادل است، چون یکی از مهمترین ویژگی‌های لوله‌های دوجداره کاهش بیشینه نیرو و به‌تبع آن کاهش شوک لحظه برخورد ضربه‌گیر به جسم صلب نسبت به لوله‌های تک‌جداره با جرم معادل است، بنابراین الزامات و محدودیت‌های طراحی (مانند وزن، شوک مجاز و جز این‌ها) می‌تواند عامل تعیین‌کننده در استفاده از لوله‌های تک‌جداره یا دوجداره باشد.

جدول ۲. مقایسه پارامترهای خروجی فروریزش محوری لوله‌های استوانه‌ای دوجداره و تک‌جداره با جرم یکسان

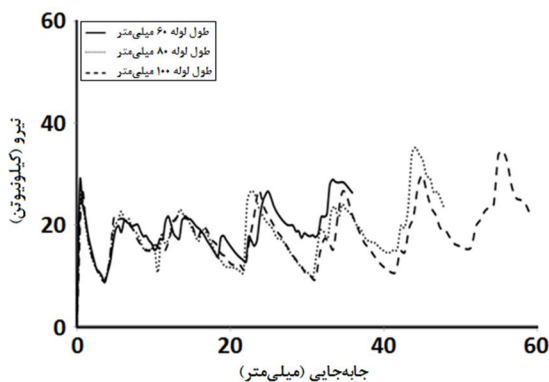
نوع نمونه	تک‌جداره	تک‌جداره	تک‌جداره	دوجداره
قطر (میلی‌متر)	۴۰	۵۰	۶۰	۴۰
ضخامت (میلی‌متر)	۴/۶۳	۳/۵۵	۲/۸۵	۱/۵
بیشینه نیرو (کیلو نیوتن)	۸۷/۵	۷۴/۵	۵۸/۹	۵۳
انرژی جذب شده (ژول)	۵۰۲۳	۳۶۸۱	۲۵۸۵	۲۰۲۷
انرژی ویژه (ژول)	۳۶/۲	۲۶/۵	۱۸/۶	۱۴/۶

### ۵-۲. تأثیر اختلاف قطر لوله داخلی و خارجی

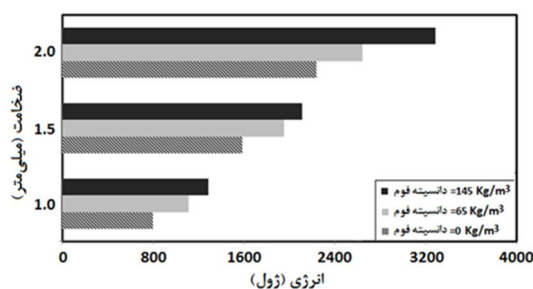
در این بخش اثر پارامتر اختلاف قطر لوله داخلی و خارجی بر میزان انرژی جذب شده و هندسه فروریزش لوله‌های دوجداره توخالی و تقویت شده با فوم پلی‌یورتان با چگالی ۶۵ و ۱۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب بررسی می‌شود. سایر ابعاد هندسی و شرایط مرزی ثابت در نظر گرفته می‌شود. طول نمونه‌ها برابر ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت لوله‌های دوجداره برابر ۱ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. اختلاف قطر لوله داخلی و خارجی نیز برابر ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میلی‌متر انتخاب شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد (شکل ۱۹) افزایش اختلاف قطر لوله داخلی و خارجی لوله‌های دوجداره اثر ناچیزی بر اولین بیشینه نیروی فروریزش دارد. گفتنی است با افزایش جابه‌جایی فروریزش پوسته‌های تقویت شده (بیش از ۶ درصد طول اولیه)، بیشینه نیروهای فروریزش رو به افزایش

### ۵-۳. تأثیر طول لوله

در این بخش، اختلاف قطر لوله داخلی و خارجی برابر ۲۰ میلی‌متر و ضخامت لوله‌های دوجداره برابر ۱ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. طول لوله‌ها نیز برابر ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ میلی‌متر انتخاب شده است. نتایج نشان می‌دهد (شکل ۲۱) چنانچه طول لوله‌ها ۶۰ درصد طول اولیه لوله‌ها باشد، اثر اختلاف طول تأثیر چندانی بر مقدار متوسط نیروی فروریزش نمونه‌های تقویت‌شده با فوم ندارد. اما سطح زیر نمودار (انرژی جذب‌شده) با افزایش طول لوله به‌صورت افزایشی است. همچنین انرژی جذب‌شده با افزایش طول لوله‌های دوجداره به‌صورت خطی افزایش می‌یابد. این افزایش خطی انرژی نسبت به طول لوله استوانه‌ای تک‌جداره در مطالعات گذشته نیز دیده شده است [۱۰].



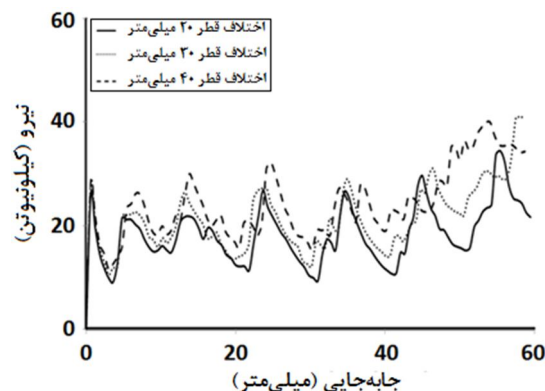
شکل ۲۱. اثر اختلاف طول لوله بر نمودار نیرو - جابه‌جایی پوسته‌های استوانه‌ای موازی تقویت‌شده با فوم پلی‌ورتان با چگالی ۱۴۵ کیلوگرم بر مترمکعب



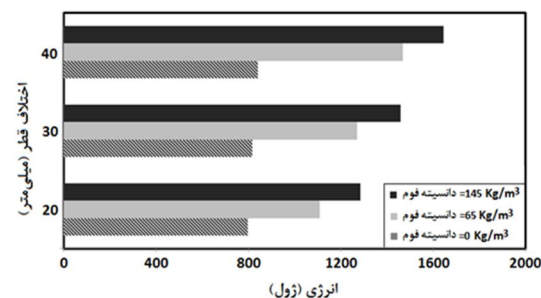
شکل ۲۲. اثر ضخامت لوله بر انرژی جذب‌شده لوله‌های دوجداره توخالی و تقویت‌شده با فوم پلی‌ورتان

شده است. آنچه به‌وضوح روشن است تعداد چین‌های لوله‌های دوجداره با افزایش ضخامت کاهش می‌یابد؛ زیرا افزایش ضخامت لوله‌های دوجداره سبب افزایش بیشینه نیروهای فروریزش می‌شود، بنابراین اولین چین متقارن محوری می‌بایست در ناحیه

است. این امر ممکن است به علت فشردگی سلول‌های بسته فوم پلی‌ورتان باشد. شکل ۲۰ نیز انرژی جذب‌شده فروریزش لوله‌های دوجداره را به‌عنوان تابعی از قطر و دانسیته فوم پلی‌ورتان نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، برخلاف لوله‌های دوجداره توخالی اختلاف قطر اثر قابل توجهی بر انرژی جذب‌شده لوله‌های دوجداره تقویت‌شده با فوم تحت بارگذاری محوری دارد. گفتنی است انرژی ویژه (نسبت انرژی جذب‌شده به جرم لوله‌های دوجداره) لوله‌های تقویت‌شده با فوم با افزایش اختلاف قطر لوله‌های دوجداره تغییر قابل توجهی ندارد. این درحالی است که انرژی ویژه لوله‌های دوجداره توخالی با افزایش اختلاف قطر کاهش می‌یابد. این امر نشان می‌دهد اثر افزایش جرم لوله‌های دوجداره توخالی نسبت به افزایش انرژی جذب‌شده بیشتر است.



شکل ۱۹. اثر اختلاف قطر لوله داخلی و خارجی بر نمودار نیرو - جابه‌جایی لوله‌های دوجداره تقویت‌شده با فوم پلی‌ورتان، چگالی ۱۴۵ کیلوگرم بر مترمکعب



شکل ۲۰. اثر اختلاف قطر لوله داخلی و خارجی بر انرژی جذب‌شده لوله‌های دوجداره

### ۵-۴. تأثیر ضخامت

در این بخش نیز اختلاف قطر لوله داخلی و خارجی برابر ۲۰ میلی‌متر و طول لوله‌های دوجداره برابر ۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. ضخامت لوله‌ها برابر ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر انتخاب

پایین‌تری نسبت به قاعده تختانی لوله‌های دوجداره تشکیل شود. این امر باعث کاهش چین‌خوردگی لوله‌های دوجداره نسبت به افزایش ضخامت در طی جابه‌جایی برابر می‌شود. به‌طور کلی، ضخامت تأثیر قابل توجهی بر انرژی جذب شده فروریزش لوله‌های دوجداره توخالی و تقویت‌شده با فوم پلی‌یورتان در چگالی‌های مختلف دارد. همان‌طور که در شکل ۲۲ ملاحظه می‌شود، انرژی جذب‌شده با افزایش ضخامت و دانسیته فوم طی روند مشخصی افزایش می‌یابد.

## ۶. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، فروریزش متقارن محوری لوله‌های دوجداره تحت بارگذاری محوری به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی بررسی شده است. با توجه به نتایج آزمایش برای تحلیل تغییر شکل سازه جدارنازک دوجداره و برای کاهش زمان تحلیل عددی فرایند فروریزش آن، از مدل متقارن محوری برای شبیه‌سازی آن استفاده شد. نتایج طراحی نشان می‌دهد، نمودار نیرو - جابه‌جایی، نمودار انرژی - جابه‌جایی و نحوه فروریزش لوله‌های دوجداره توخالی و تقویت‌شده با فوم پلی‌یورتان تحت بارگذاری شبه‌استاتیک برابری خوبی با نتایج تجربی دارد. از بررسی فروریزش این نوع سازه‌ها نتایج زیر به‌دست می‌آید. چنانچه عیوب اولیه در ساخت پوسته‌های متقارن محوری کم باشد، پوسته تحت بارگذاری محوری به‌صورت متقارن محوری فروریزش می‌کند. چون افزایش چشمگیر بیشینه

## ۷. مأخذ

- [۱] ع. نیک‌نژاد، غ. لیاقت، مقایسه رفتار چین‌خوردگی ستون‌های چهارگوش جدار نازک در دو حالت توخالی و توپر، نوزدهمین همایش سالانه مهندسی مکانیک، بیرجند، انجمن مهندسان مکانیک ایران، دانشگاه بیرجند، ۱۳۹۰.
- [۲] ع. قمریان، م. فارسی، تحلیل آزمایشگاهی و عددی فروریزش محوری سازه‌های جدارنازک ترکیبی، فصلنامه مکانیک هوافضا (رفتار مکانیکی مواد و سازه‌ها)، س. ۸، ش. ۱، ص. ۹۹-۱۰۹، بهار ۱۳۹۱.
- [۳] ع. علوی‌نیا، ح. محمدی‌الموتی، بررسی عددی و تجربی رفتار مکانیکی و خواص جذب انرژی لوله‌های هرمی جدارنازک تحت بارگذاری محوری شبه‌استاتیکی، بیست و دومین کنفرانس

نیروی فروریزش باعث خسارت‌های جبران‌ناپذیر می‌شود، اما در این مطالعه بیشینه نیروی فروریزش لوله‌های تقویت‌شده با فوم پلی‌یورتان نسبت به نمونه‌های توخالی تغییر محسوسی نمی‌کند. انرژی جذب‌شده لوله‌های دوجداره تقویت‌شده با فوم پلی‌یورتان با چگالی ۶۵ و ۱۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب به‌ترتیب ۸ و ۲۲ درصد بیشتر از لوله‌های توخالی است. انرژی ویژه لوله‌های تک‌داره نسبت به لوله‌های دوجداره با جرم معادل بیشتر است. این درحالی است که بیشینه نیروی لوله‌های دوجداره نسبت به لوله‌های تک‌داره از کاهش محسوس برخوردار است. بنابراین یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های لوله‌های دوجداره کاهش بیشینه نیرو و به‌تبع آن کاهش شوک لحظه برخورد ضربه‌گیر به جسم صلب نسبت به لوله‌های تک‌داره با جرم معادل است. افزایش اختلاف قطر لوله داخلی و خارجی لوله‌های دوجداره اثر ناچیزی بر اولین بیشینه نیروی فروریزش دارد. این در حالی است که برخلاف لوله‌های دوجداره توخالی اثر این پارامتر ابعادی بر انرژی جذب‌شده لوله‌های دوجداره تقویت‌شده با فوم تحت بارگذاری محوری قابل توجه است. نتایج نشان می‌دهد اثر اختلاف طول تأثیر چندانی بر مقدار متوسط نیروی فروریزش نمونه‌های تقویت‌شده با فوم ندارد. اما سطح زیر نمودار (انرژی جذب‌شده) با افزایش طول لوله به‌صورت افزایشی است. همچنین انرژی جذب‌شده لوله‌های دوجداره با افزایش ضخامت و چگالی فوم به‌صورت خطی افزایش می‌یابد.

- سالانه مهندسی مکانیک، اهواز، انجمن مهندسان مکانیک ایران، دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۳۹۳.
- [4] A. A. Singace, Axial crushing analysis of tubes deforming in the multi-lobe mode, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 44, pp.865-890, 1999.
  - [5] ع. علوی‌نیا، ع. فرشاد، بررسی تجربی و عددی تأثیر هندسه مقطع و فوم فلزی بر روی تغییر شکل و ویژگی‌های جذب انرژی لوله‌های جدارنازک، مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها، س. ۴، ش. ۱، ص. ۵۱-۶۳، ۱۳۹۳.
  - [6] م. شریعتی، م. داورپناه، ح. چاوشان، ح. الله‌بخش، تحلیل تجربی و عددی کمانش و کنترل میزان جذب انرژی پوسته‌های

- [11] A. Ghamarian, M. T. Abadi, Axial crushing analysis of end-capped circular tubes, *Thin-Walled Structuer*, Vol.49, pp. 743-752. 2011.
- [12] 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*, Vol. 49, pp.1312–1319, 2011.
- [13] 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.
- [14] A. Ghamarian, H. R. Zarei, M. A. Farsi, N. Ariaeifar, Experimental and Numerical Crashworthiness Investigation of the Empty and Foam Filled Conical Tube with Shallow Spherical Caps, *Strain*, Vol. 49, No. 3, pp. 199-211, 2013.
- [15] H. Pawtucket, K. Sorensen, Abaqus user's manual, 1999.
- با هندسه‌های مختلف از جنس فولاد ضدزنگ SS304L تحت بار محوری شبه‌استاتیکی، مهندسی مکانیک مدرس، س. ۱۴، ش. ۳، ص. ۶۰-۶۸ خرداد ۱۳۹۳.
- [7] J. Marzbanrad, M. Mehdikhanlo, A. Saeedipour, An energy absorption comparison of square, circular, and elliptic steel and aluminum tubes under impact loading, *Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences*, Vol. 33, pp. 159–166. 2009.
- [۸] س. آذرخش، ع. رهی، ع. قمریان، بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار لهیدگی پوسته‌های استوانه‌ای برنجی، مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها، س. ۶، ش. ۲، ص. ۱۸۱-۱۹۶، ۱۳۹۵.
- [9] S. Azarakhsh, A. Rahi, A. Ghamarian, H. Motamedi, Axial crushing analysis of empty and foam-filled brass bitubular cylinder tubes, *Thin-walled Struct*, Vol. 95, pp. 60-72, 2015.
- [10] A. Ghamarian, H. R. Zarei, Crashworthiness investigation of conical and cylindrical end-capped tubes under quasi static crash loading, *Int. J. Crashworthiness*, Vol. 17, pp. 19-28. 2012.

پی‌نوشت

- 
1. Tie
  2. Slave
  3. Master
  4. plastic
  5. crushable foam
  6. surface to surface
  7. hard contact
  8. self contacting