

(علمی-پژوهشی)

بررسی اثر فوم‌های پلیمری و آلومینیومی بر روی رفتار فروریزش سازه‌های مخروطی دودیواره نازک فولادی

تاکنون تأثیر فوم‌های پلیمری و آلومینیومی بر روی ظرفیت جذب انرژی پوسته‌های مخروطی دو دیواره در معرض بارگذاری فشاری مایل به صورت آزمایشگاهی گزارش نشده است. در این تحقیق تأثیر فوم پلیمری و فوم آلومینیومی بر میزان جذب انرژی این سازه‌های در معرض بارگذاری فشاری محوری و مایل نسبت به محور مرکزی جاذب‌های مخروطی، به روش تجربی مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است. همچنین، تأثیر عواملی مانند ابعاد هندسی مخروط‌ها و فاصله بین دیواره‌های مخروط دو دیواره بر روی ظرفیت جذب انرژی این جاذب‌های انرژی مطالعه و بررسی شده است. نتایج نشان داد که در بارگذاری محوری کم کردن فاصله بین دو دیواره تأثیر چندانی در بازده جاذب ندارد ولی افزودن فوم موجب افزایش ظرفیت جذب انرژی جاذب بدون تغییر در بیشینه نیروی قابل تحمل آن می‌شود. در بارگذاری‌های مایل که در زاویه ۴۵ درجه انجام شدند نیز کم کردن فاصله بین دیواره‌ها و افزودن فوم باعث افزایش ظرفیت جذب انرژی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ضربه‌گیرهای مخروطی دو دیواره، تحلیل آزمایشگاهی، ظرفیت جذب انرژی، فوم‌های تقویت کننده آلومینیومی و پلیمری

مسعود صالح‌نژاد^{۱*}، محمود شریعتی^{۲**}،
امیر نجیبی^{۳***} و مسعود مهدی‌زاده
رخی^{۴***}

- ۱- پردیس علوم و فناوری‌های نوین دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
- ۲- دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، کدپستی: ۹۱۷۷۹۴۸۹۴۴.
- ۳- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
- ۴- دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

* دانش‌آموخته کارشناسی ارشد

** استاد (نویسنده پاسخگو)، ایمیل:

mshariati44@um.ac.ir

*** استادیار

Investigation of the Effect of Polymer and Aluminum Foams on the Collapse Behavior of Double-walled Thin-walled Steel Cone Structures

The effect of polymer and aluminum foams on the energy absorption capacity of double-walled conical shells subjected to oblique compressive loading has not been reported experimentally. In this paper, the amount of energy absorption of double thin-walled conical shells, filled with polymer foam and aluminum foam, has been experimentally studied under axial and oblique loading conditions. Also, the influence of some parameters such as the size of the conical shells, foam injection, and the distance between the two walls were investigated. It was found that in the axial loading condition, there is no significant effect of the wall thickness on the energy absorption efficiency while filling tubes with the foam leads to the increase of energy absorption capacity without increasing of the maximum force. For the oblique loading conditions which were performed at a 45-degree angle, decreasing the thickness of the walls and filling tubes with the foams increase the capacity of the energy absorption.

Keywords: Double-walled Conical Tube Shock Absorbers, Experimental Analysis, Energy Absorption Capacity, Reinforcing Aluminum and Polymer Foams

M. Salehnezhad^{1*}, M. Shariati^{2**}, A. Najibi^{3***}, and M. Mahdizadeh Rokhi^{4***}

- 1- Campus of New Sciences and Technologies, University of Semnan, Semnan, IRAN.
- 2- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Postal Code: 9177948944, Mashhad, IRAN.
- 3- Department of Mechanical Engineering, University of Semnan, Semnan, IRAN.
- 4- Department of Mechanical and Mechatronics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, IRAN.

* M.Sc. Student

** Professor (Corresponding Author):

Email:

mshariati44@um.ac.ir

*** Assistant Professor

(علمی-پژوهشی)

مسعود صالح‌نژاد، محمود شریعتی، امیر نجیبی و مسعود مهدی‌زاده رخی

۱- مقدمه

سیستم‌های جذب انرژی در صنایع مختلف از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ضربه‌گیرها و جذب‌کننده‌های انرژی از جمله اجزایی هستند که در برخی سامانه‌ها برای جذب انرژی جنبشی و تبدیل آن به صورت دیگری از انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ضربه‌گیرها برای کاهش شتاب تجهیزات متحرک بکار گرفته می‌شوند. از سازه‌های مخروطی دو دیواره در انواع وسایل نقلیه، به عنوان مثال در دماغه هواپیماها و پهپادها، قطارها و خودروها به عنوان ضربه گیر و جاذب انرژی استفاده می‌شود. همچنین، پوسته‌های مخروطی برای اتصال پوسته‌های استوانه‌ای با سطح مقطع‌های متفاوت مورد استفاده قرار می‌گیرند. این جاذب‌های انرژی، انرژی جنبشی را به انواع دیگر انرژی تبدیل می‌کنند. انرژی جنبشی صرف غلبه بر اصطکاک، تغییر شکل پلاستیک و یا شکست در قطعات می‌شود. به طور کلی، به سازه‌های مکانیکی که از آنها برای تبدیل انرژی جنبشی حاصل از برخورد و یا ضربه به صورت‌های دیگر انرژی استفاده می‌شود، جذب‌کننده انرژی گویند. دستگاه‌های جذب‌کننده انرژی یا ضربه‌گیرها انواع مختلفی دارند که از طریق مکانیزم‌های مختلفی نظیر پیچش، خمش، کشش، برش، سایش، تغییر شکل پلاستیک، اکستروژن جریان مایع و غیره انرژی برخورد را مستهلک می‌نمایند [۱]. یکی از کاربردهای فوم‌های آلومینیومی که در این سازه‌ها می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، تضعیف امواج رادار است. امواج رادار با برخورد به فوم‌های آلومینیومی وارد آن شده و پس از برخورد به خلل و فرج داخل آن تضعیف می‌شوند و در نتیجه قابلیت بازگشت را نخواهند داشت. این قابلیت موجب شده است تا از فوم‌های آلومینیومی برای اختفا تجهیزات نظامی و عدم تشخیص آنها توسط رادار استفاده شود.

یکی از متداول‌ترین و پراستفاده‌ترین جاذب‌های انرژی در صنعت، جذب‌کننده‌های فروریزشی هستند که در زمره جذب‌کننده‌های بازگشت‌ناپذیر دسته‌بندی می‌شوند. این جذب‌کننده‌ها با تغییر شکل خود در اثر ضربه و انرژی جنبشی را به کار پلاستیک تبدیل کرده و انرژی ضربه را مستهلک می‌نمایند [۲]. تحقیقات انجام شده توسط پژوهشگران مشخص کرد که بسیاری از پارامترهای مربوط به جذب‌کننده‌های انرژی، مانند میزان نیروی لهیدگی و یا میزان انرژی جذب شده توسط آنها، ارتباط نزدیکی با نوع فروریزش ضربه‌گیر دارد. بنابراین، شناخت و بررسی عواملی که بر چگونگی فرو ریزش تأثیر گذارند، اهمیت زیادی دارد. دو پارامتر بسیار مهم در طراحی ضربه‌گیرهای

فروریزشی که می‌توان از نمودار نیرو-جابجایی استخراج کرد، بیشینه نیرو و بار متوسط فروریزش هستند. بیشینه نیرو در نمودار نیرو - جابجایی ضربه‌گیرهای فروریزشی، مربوط به تغییر شکل الاستیک در جذب‌کننده بر اثر ضربه محوری است که پس از آغاز تغییر شکل پلاستیک در سازه این مقدار بیشینه به سرعت کاهش می‌یابد. در طراحی ضربه‌گیر، یک مقدار مجاز برای این نیرو تعیین می‌شود که نیروی بیشینه ضربه‌گیر باید مساوی یا کوچکتر از آن باشد. متوسط نیروی فروریزش در ضربه‌گیرهای فروریزشی باید مقدار معینی باشد [۳].

پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهند که افزودن فوم به جذب‌کننده‌ها کارایی آنها را بهبود می‌دهد. از جمله فوم‌هایی که استفاده از آنها در جذب‌کننده‌ها رایج است، فوم‌های آلومینیومی هستند. برخی از ویژگی‌های فوم‌های آلومینیومی سبکی، نسبت استحکام به وزن بالا، سهولت در اتصال و عملیات تکمیلی و قابلیت جذب انرژی و ضربه هستند. این ویژگی‌ها موجب کاهش مصرف سوخت، آلودگی هوا، هزینه تولید و افزایش سرعت تولید، بازده و بهره‌وری می‌شوند [۴]. یکی دیگر از خصوصیات جالب فوم‌های آلومینیومی تضعیف امواج رادار است. این قابلیت موجب شده است تا از فوم‌های آلومینیومی جهت پنهان کردن تجهیزات نظامی و عدم شناسایی آنها توسط رادار استفاده شود. همچنین، از این فوم‌ها به عنوان عایق صوتی در ساخت بدنه زیردریایی‌ها استفاده می‌شود [۵].

مطالعات زیادی در زمینه جذب انرژی و کماتش پوسته‌های مخروطی انجام شده است. شریعتی و همکاران [۴] قابلیت جذب انرژی پوسته‌های استوانه‌ای، نیم کره و مخروطی ساخته شده از فولاد ضد زنگ را در معرض بارگذاری محوری مطالعه کردند. آنها دریافتند که ایجاد شیار در پوسته‌های نیم کره، مخروطی و استوانه‌ای موجب تغییر قابلیت جذب انرژی و کاهش بار کماتش می‌شود.

دادرسی [۵] کماتش پوسته‌های مخروطی در معرض بار فشاری با و بدون گشودگی و ترک را با استفاده از نرم‌افزار آباکوس مورد تحلیل قرار داد. وی دریافت که پس از وقوع کماتش، ظرفیت تحمل بار پوسته به شدت کم می‌شود. گوپتا و همکاران [۶] در زمینه کماتش پوسته‌های مخروطی ناقص آلومینیومی مطالعاتی بصورت تجربی و عددی انجام دادند. موارد آزمایش در این تحقیق بر روی مخروط‌های ناقص آلومینیومی با ضخامت‌هایی بین ۰/۷ تا ۱/۲۶ میلی‌متر و زاویه‌های نیم راس بین ۱۶ الی ۲۹۱ درجه در معرض نیروی فشاری محوری انجام شدند. آنها با استفاده از نرم افزار انسیس، شبیه‌سازی عددی برای تمام

جذب انرژی سازه‌های جدار نازک چند سلولی پر شده با فوم را به کمک تجزیه و تحلیل اجزای محدود غیرخطی و با استفاده از نرم افزار LS-DYNA مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج عددی بدست آمده آنها دریافتند که سازه‌ای با نه سلول دارای بهترین قابلیت جذب انرژی است.

هو^۵ و همکاران [۱۳] مطالعه‌ای بر روی جذب انرژی سازه‌های مخروطی تو خالی، دو دیواره و پر شده از فوم همراه با بهینه‌سازی انجام دادند. نتایج آزمایش‌های تجربی و بهینه‌سازی‌ها نشان داد که بهترین نمونه‌ها جهت جذب انرژی به ترتیب نمونه‌های مخروطی پر شده از فوم، نمونه‌های دو دیواره و تک دیواره هستند. جمال‌الدین و همکاران [۱۴] به بررسی جذب انرژی سازه‌های استوانه‌ای پر شده از فوم در شرایط بارگذاری تک محوری و مایل پرداختند. آنها نمونه‌های دیواره تو خالی، نمونه‌های حاوی فوم بین دو دیواره و کاملاً پر شده از فوم را آزمایش کردند. نتایج نشان داد که در بارگذاری محوری نمونه‌های به طور کامل پر شده از فوم بهترین گزینه هستند، در حالی که در بارگذاری مایل نمونه‌ای که بین دو دیواره آن از فوم پر شده مناسب تر است.

عظیمی و همکاران [۱۵] رفتار جذب انرژی سازه‌ای جدید را در معرض بارگذاری محوری و مایل مورد مطالعه قرار دادند. این سازه دوجداره و دیواره بیرونی آن استوانه‌ای و دیواره داخلی آن مخروطی و داخل آن هم با فوم پر شده بود. آنها نتیجه گرفتند که افزایش چگالی فوم مورد استفاده قابلیت جذب انرژی را افزایش می‌دهد. سازه پیشنهادی در بارگذاری محوری در بعضی موارد سبب بهبود نتایج شده و در برخی موارد تأثیر آن قابل ملاحظه نبود. اما در بارگذاری مایل در جذب انرژی عملکرد بهتری داشت و با افزایش زاویه برخورد قابلیت جذب انرژی آن نیز افزایش نشان می‌داد.

لی و همکاران [۱۶] به بررسی جذب انرژی سازه‌های ضخامت متغیر پر شده از فوم در معرض بارگذاری مایل پرداختند. نمونه‌های آنها شامل چهار گروه ضخامت ثابت و تو خالی، ضخامت ثابت و پر شده از فوم، ضخامت متغیر تو خالی و ضخامت متغیر پر شده از فوم، برای بارگذاری مایل مناسبند. همچنین، آنها نتیجه گرفتند گرادیان و میزان تغییرات ضخامت پارامتر مهمی در جذب انرژی این سازه‌ها است.

کیو^۶ و همکاران [۱۷] به بررسی عددی جذب انرژی سازه‌های شش ضلعی چند دیواره هدفمند در معرض بارگذاری

نمونه‌ها در معرض بارگذاری شبه استاتیک انجام دادند و نتایج تجربی و عددی را مقایسه کردند.

لی^۱ و همکاران [۷] قابلیت جذب انرژی سازه‌های جدار نازک استوانه‌ای پر شده از فوم در معرض بارگذاری مایل را مورد مطالعه قرار دادند. زاویه بارگذاری در این آزمایش‌ها ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه بود و نمونه‌ها بصورت بدون فوم، به طور کامل پر شده از فوم و دو دیواره پر شده از فوم مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد جذب انرژی به ترتیب در استوانه دو دیواره پر شده با فوم، استوانه تک دیواره پر شده با فوم و استوانه تو خالی بیشتر است. همچنین، مشاهده شد که افزایش زاویه بارگذاری، بار کمانش را اندکی کاهش می‌دهد.

قمریان و همکاران [۸] پوسته مخروطی تو خالی و پر شده از فوم را در معرض بارگذاری شبه استاتیکی بررسی کردند. آنها با مقایسه مخروط و استوانه در آزمایش فشار مشاهده کردند که جذب انرژی پوسته استوانه‌ای بدون فوم کمتر از پوسته مخروطی بدون فوم است. همچنین، مشاهده شد که پوسته مخروطی دارای فوم در مقایسه با پوسته استوانه‌ای دارای فوم، قابلیت جذب انرژی بیشتری دارد.

چی^۲ و همکاران [۹] رفتار جذب انرژی لوله‌هایی با مقاطع مربعی و هرمی شکل یک-دیواره و چند دیواره در معرض بارگذاری مایل را بررسی کردند. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها نشان داد که لوله چند دیواره مخروطی قابلیت جذب انرژی بیشتری دارد و با افزایش زاویه بارگذاری میزان جذب انرژی و پیک اولیه نمودار کاهش می‌یابد. این کاهش برای نمونه‌های دارای سطح مقطع‌های مربعی نسبت به نمونه‌های مخروطی، بیشتر گزارش شده است. احمد و همکاران [۱۰] قابلیت جذب انرژی پوسته‌های مخروطی تو خالی و پر شده از فوم را در معرض بارگذاری ضربه‌ای مورد مطالعه قرار دادند. آنان دریافتند که در بارگذاری ضربه‌ای مایل، پوسته مخروطی پر شده از فوم عملکرد بهتری دارد و افزایش زاویه ضربه سبب کاهش جذب انرژی در نمونه‌ها می‌شود. همچنین نتیجه گرفتند که در زوایای کمتر از ۱۵ درجه قابلیت جذب انرژی به سبب ایجاد لبه‌ها بر روی هندسه به طور نسبی مناسب است اما با افزایش زاویه از این مقدار سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی کاهش یافته و فقط دارای یک پیک است.

چنگ^۳ و همکاران [۱۱] اثر گشودگی‌های مختلف بر قابلیت جذب انرژی پوسته آلومینیومی با مقطع مربعی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد پیک نیرو در موارد مختلف ۵/۲ الی ۱۸/۷ درصد کاهش و ظرفیت جذب انرژی ۲۶/۷ الی ۷۴/۶ درصد افزایش می‌یابد. یین^۴ و همکاران [۱۲] ظرفیت

4. Yin
5. Hou
6. Qiu

1. Li
2. Qi
3. Cheng

(علمی-پژوهشی)

مسعود صالح‌نژاد، محمود شریعتی، امیر نجیبی و مسعود مهدی‌زاده رخی

لوله‌های دو دیواره دایره‌ای و مربعی پر شده با فوم را در معرض بارگذاری محوری شبه استاتیکی مورد آزمایش قرار دادند. آنها مشخصه‌های بار-تغییر شکل، حالت تغییر شکل و توانایی جذب انرژی این سازه‌ها را مورد بررسی قرار داده و پارامترهایی مثل جذب انرژی ویژه و ضریب جذب انرژی موثر آنها را مقایسه نمودند.

مهدی و اصغری [۲۴] یک مطالعه عددی به منظور بررسی رفتار فروپاشی لوله‌های کامپوزیتی موجدار استوانه‌ای و مخروطی در معرض بارگذاری محوری انجام دادند. آنها به منظور بررسی اثر فوم‌های آلومینیومی مختلف بر میزان ظرفیت جذب انرژی این سازه‌ها دو پارامتر جذب انرژی ویژه و بازده نیروی فروپاشی را بررسی کردند. حسینی و همکاران [۲۵] قابلیت جذب انرژی لوله‌های آلومینیومی جدار ضخیم توخالی و پر شده با فوم که در معرض بارگذاری محوری قرار داشتند را با استفاده از مدل‌های آسیب مختلف با روش‌های عددی و تجربی مطالعه کردند. آنها تأثیر ضخامت و تزریق فوم را بر قابلیت جذب انرژی لوله‌های آلومینیومی بررسی و مشاهده کردند که افزایش ضخامت جذب‌کننده تأثیر زیادی بر میزان انرژی جذب شده و نیروی قابل تحمل توسط جذب‌کننده دارد. همچنین، حسینی و همکاران [۲۶] با استفاده از روش‌های تجربی و عددی، رفتار پوسته‌های نیم‌کروی و مخروطی شکل به ترتیب از جنس آلومینیوم و فولاد را در معرض بارگذاری ضربه‌ای مورد بررسی قرار دادند. آنها ظرفیت جذب انرژی این‌گونه جذب‌کننده‌ها را تعیین و اثر تزریق فوم را بر روی رفتار فروریزش و قابلیت جذب انرژی پوسته‌های نیم‌کروی آلومینیومی بررسی نموده و تأثیر پارامترهای هندسی پوسته بر رفتار فروپاشی و ظرفیت جذب ضربه گیرهای مخروطی فولادی را نیز بررسی کردند.

از آنجاکه تاکنون تأثیر فوم‌های پلیمری و آلومینیومی بر روی ظرفیت جذب انرژی پوسته‌های مخروطی دو دیواره در معرض بارگذاری فشاری مایل به صورت آزمایشگاهی گزارش نشده است، در این پژوهش مخروط‌های فولادی جدارنازک دودیواره توخالی و پر شده با فوم (فوم‌های فلزی آلومینیومی و فوم‌های پلیمری) در معرض اثر بارگذاری محوری و مایل قرار گرفته و رفتار فروریزش و قابلیت جذب انرژی آنها به صورت تجربی مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. پارامترهای مورد بررسی عبارتند از: قطر و فاصله بین دودیواره مخروط‌ها و نیز زاویه بارگذاری (صفر درجه و ۴۵ درجه نسبت به محور مرکزی مخروط).

مایل پرداختند. نمونه‌ها در این تحقیق به صورت دو شش ضلعی داخل هم بودند و شیوه قرارگیری این سازه‌ها نسبت به هم متغیر و در برخی نمونه‌ها اتصالاتی بین دو سازه شش ضلعی ایجاد شده بود. نتایج نشان داد تعداد گوشه‌های ایجاد شده در مدل نقش مهمی در افزایش جذب انرژی سازه ایفا می‌کند. همچنین، در این تحقیق با استفاده از بهینه‌سازی سطح مقطع مناسب سازه جهت جذب انرژی بهینه بدست آمد. محمدی‌ها و غریب لو [۱۸] قابلیت جذب انرژی استوانه‌های ضخامت متغیر در معرض بارگذاری مایل را مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که ضخامت نمونه‌ها در نتایج مؤثر بوده و تغییرات ضخامت با زاویه یک درجه جذب انرژی بهتری نسبت به زاویه دو و سه درجه دارد.

گائو^۱ و همکاران [۱۹] قابلیت جذب انرژی لوله‌هایی با مقطع بیضوی پر شده از فوم را مورد مطالعه قرار داده و با لوله‌هایی با سطح مقطع‌های دیگر مقایسه کردند. نتایج نشان داد که لوله‌های با سطح مقطع بیضوی در هر دو حالت پر شده با فوم و توخالی در مقایسه با لوله‌های با مقطع دایره‌ای، مستطیلی و مربعی، نتایج بهتری ارائه می‌دهند. گائو و همکاران [۲۰] در مقاله‌ای دیگر به بررسی جذب انرژی لوله‌هایی با سطح مقطع بیضوی دو دیواره پر شده از فوم در معرض بارگذاری محوری و مایل پرداختند. آنها مقایسه‌ای بین نمونه‌های دو دیواره با مقطع دایره‌ای پر شده از فوم، دو دیواره با مقطع بیضوی پر شده از فوم و نمونه‌های با مقطع بیضوی تک دیواره پر شده از فوم انجام دادند. نتایج بدست آمده نشان داد که بهترین نمونه‌ها از نظر جذب انرژی در بارگذاری مایل، نمونه‌های بیضوی دو دیواره پر شده از فوم هستند. ژو^۲ و همکاران [۲۱] یک لوله آلومینیومی با مقطع دایره‌ای که با یک اسکلت کامپوزیتی داخلی و فوم‌های آلومینیومی تقویت شده بود را در معرض بار محوری فشاری شبه استاتیکی مورد مطالعه قرار دادند. آنها به منظور مقایسه، یک لوله توخالی و لوله‌هایی تنها با یک تقویت‌کننده (فوم‌های آلومینیومی یا اسکلت کامپوزیتی) را نیز آزمایش نموده و الگوهای تغییر شکل و چندین پارامتر کلیدی مرتبط با قابلیت ضربه‌پذیری این سازه‌ها را بررسی و مقایسه کردند.

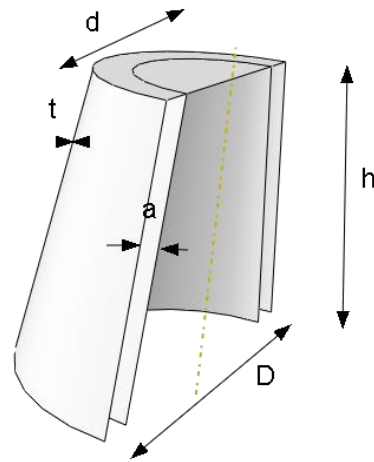
چهار دلی^۳ و علوی نیا [۲۲] ویژگی‌های فروپاشی لوله‌های مخروطی سرپوش دار ساخته شده از آلیاژ فولادی ۴۳۰ با سوراخ‌های دایره‌ای تحت بارگذاری محوری شبه استاتیکی را به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. لی و همکاران [۲۳] دو نوع از لوله‌های آلیاژی آلومینیومی توخالی با مقطع دایره‌ای و مربعی و تعدادی ساختار لوله‌ای پر شده با فوم (لوله‌های تک دیواره با مقطع دایره‌ای و مربعی پر شده با فوم،

جدول (۱): ابعاد، مشخصات هندسی و نامگذاری نمونه‌ها.

ردیف	نامگذاری هندسی	W (gr)	D (mm)	d (mm)	a (mm)	Foam	زاویه پارگناری نسبت به محور طولی مرکزی
۱	D80-d65-a15-HO-0	۱۹۹	۸۰	۶۵	۱۵	-	۰
۲	D80-d65-a15-HO-45	۲۰۹	۸۰	۶۵	۱۵	-	۴۵
۳	D80-d65-a15-FP-0	۲۸۴	۸۰	۶۵	۱۵	PU	۰
۴	D80-d65-a15-FP-45	۲۸۵	۸۰	۶۵	۱۵	PU	۴۵
۵	D80-d65-a15-FA-0	۳۲۴	۸۰	۶۵	۱۵	Al	۰
۶	D80-d65-a15-FA-45	۳۱۶	۸۰	۶۵	۱۵	Al	۴۵
۷	D70-d60-a5-HO-0	۲۳۴	۷۰	۶۰	۵	-	۰
۸	D70-d60-a5-HO-45	۲۲۵	۷۰	۶۰	۵	-	۴۵
۹	D70-d60-a5-FA-0	۲۷۱	۷۰	۶۰	۵	Al	۰
۱۰	D70-d60-a5-FA-45	۲۵۶	۷۰	۶۰	۵	Al	۴۵

۲- هندسه نمونه‌ها و خواص مکانیکی آنها

نمونه‌های مورد مطالعه در این تحقیق از ورق فولادی ضد زنگ SS304L با ضخامت 1 mm و به شکل مخروط ناقص دودیواره ساخته شده‌اند. مخروط‌های استفاده شده در تحلیل‌ها از نظر ابعاد هندسی به دو دسته تقسیم می‌شوند. مخروط‌های با قطر قاعده بزرگ ۸۰ میلی‌متر، قطر قاعده کوچک ۶۵ میلی‌متر و فاصله بین دیواره‌ها ۱۵ میلی‌متر بوده و دسته دیگر مخروط‌های دارای قطر بزرگ ۷۰ میلی‌متر و قطر کوچک ۶۰ میلی‌متر و فاصله بین دیواره‌ها ۵ میلی‌متر هستند. ارتفاع همه مخروط‌ها ۹۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. آزمایش‌ها برای نمونه‌های دسته اول در سه حالت خالی، پر شده از فوم پلی یورتان بین دیواره‌ها و پر شده از فوم آلومینیوم بین دیواره‌ها و برای نمونه‌های دسته دوم در دو حالت خالی و پر شده از فوم آلومینیوم بین دیواره‌ها انجام شده است. پارامترهای هندسی نمونه‌ها بر روی یک مخروط برش خورده در شکل ۱ نمایش داده شده و ابعاد و مشخصات هندسی نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده‌اند.



(الف)



(ب)

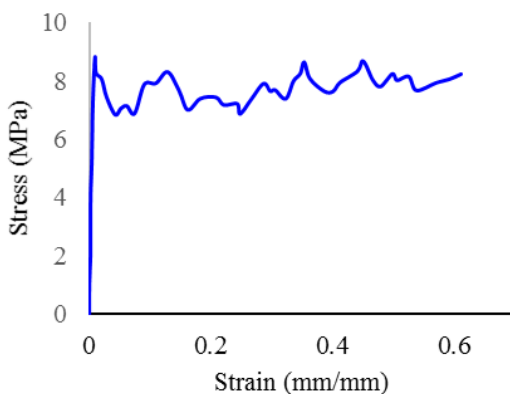
شکل (۱): هندسه نمونه‌ها (الف) نمای برش خورده از هندسه مخروط ناقص دودیواره (ب) تصاویر نمونه‌های خالی و پر شده با هر دو نوع فوم.

(علمی-پژوهشی)

مسعود صالح‌نژاد، محمود شریعتی، امیر نجیبی و مسعود مهدی‌زاده رخی

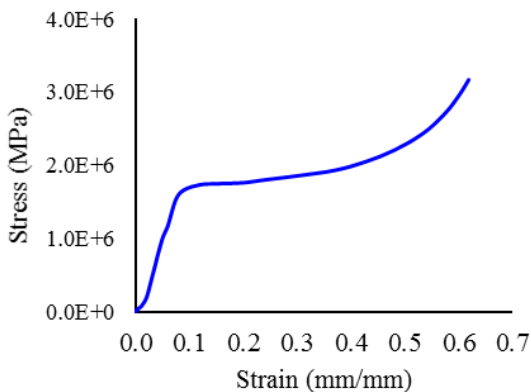
جدول (۲): خواص مکانیکی و اندازه‌ها در فوم آلومینیومی [۱].

خواص	مقدار
اندازه سلول (mm)	۲-۵
دانسیته (g/cm^3)	۰/۴-۰/۷۵
درصد تخلخل	۷۰-۸۵
دانسیته نسبی	۰/۱۵-۰/۳
مدول الاستیک (GPa)	۰/۳-۱/۱
تنش فشاری (MPa)	۲/۲-۱۲/۱۵
کرنش تراکم (mm/mm)	۰/۶-۰/۷۵
جذب انرژی (kJ/mm^3)	۰/۱-۰/۳۵



شکل (۳): نمودار تنش-کرنش فوم آلومینیومی.

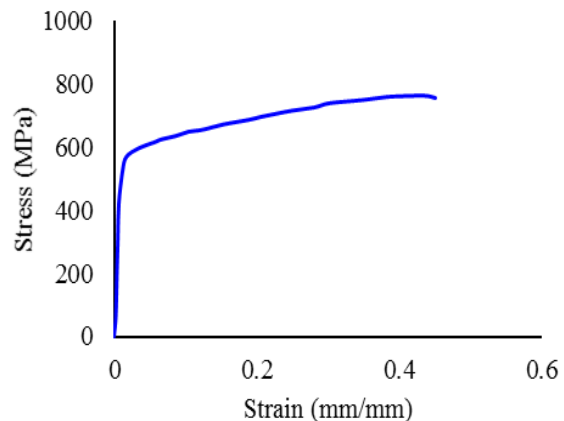
برای تعیین خواص مکانیکی فوم پلی یورتان از آزمایش فشار محوری استفاده می‌شود. آزمایش فشار براساس استاندارد ASTM D1621/69 و با فشردن نمونه‌های مکعبی شکل بین دو صفحه مسطح و موازی انجام می‌شود. در این آزمایش فوم با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه و حدود ۶۵ درصد ضخامت اولیه فشرده شد. شکل ۴ نمودار تنش-کرنش مهندسی فوم پلی یورتان سخت با چگالی ۱۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب را در معرض اثر بارگذاری شبه استاتیکی فشاری نشان می‌دهد.



شکل (۴): نمودار تنش-کرنش مهندسی فوم پلی یورتان سخت با چگالی ۱۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب.

به منظور نام گذاری نمونه‌ها، از پارامترهای هندسی استفاده شده است. به این صورت که پارامترهای هندسی و مقدار عددی مربوطه برحسب میلی‌متر به دنبال هم نوشته شده‌اند. به عنوان مثال، مخروط دو دیواره با قطر بزرگ ۸۰ میلی‌متر، قطر کوچک ۶۵ میلی‌متر، ارتفاع ۹۰ میلی‌متر، ضخامت ۱ میلی‌متر و فاصله بین دو جدار ۱۵ میلی‌متر، پر شده از فوم آلومینیوم بین دیواره‌ها در معرض بارگذاری محوری به صورت D80-d65--a15-FA-0 نامگذاری می‌شود. در این پژوهش به منظور انجام آزمایشات ۵ نوع مخروط دو دیواره طراحی شده که از هر کدام دو نمونه تهیه شده است که یکی برای بارگذاری محوری و دیگری برای بارگذاری مایل مورد استفاده قرار می‌گیرد.

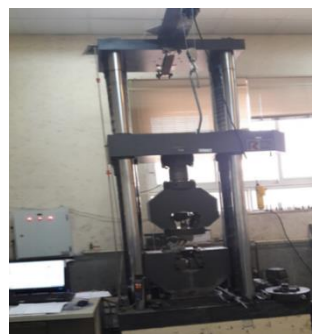
خصوصیات مکانیکی فولاد مورد نظر بر طبق استاندارد ASTM E8 و به وسیله دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ تعیین شده است. نمودار تنش-کرنش مهندسی آن در شکل ۲ نشان داده شده است. پوسته‌های مخروطی استفاده در این پژوهش به روش اسپینینگ یا شکل‌دهی چرخشی ساخته شده‌اند. فوم‌های آلومینیومی مورد استفاده در این پژوهش نیز از سری فوم‌های آلومینیومی سلول بسته هستند که به روش عامل فوم‌ساز با استفاده از اضافه کردن یک عامل تولیدکننده گاز به ماده مذاب تولید می‌شوند. عامل فوم‌ساز تحت تأثیر حرارت تجزیه می‌شود و گاز آزاد می‌کند که موجب ادامه یافتن فرآیند فوم‌سازی می‌شود. این فوم‌ها در گروه پژوهشی مواد جهاد دانشگاهی مشهد در ابعاد و ضخامت‌های مختلف جهت ارائه به مراکز صنعتی، تحقیقاتی و دانشگاهی تولید می‌شوند. جدول ۲ خصوصیات این فوم را نشان می‌دهد. همچنین، خواص مکانیکی فوم آلومینیومی به کار رفته در نمونه‌ها با آزمایش فشار استاندارد ASTM-E9 تعیین و نمودار تنش-کرنش آن در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل (۱): نمودار تنش-کرنش مهندسی برای فولاد SS304L.

۳- دستگاه آزمایش، شرایط تکیه‌گاهی و بارگذاری

آزمایش‌های فشار در این پژوهش با دستگاه هیدرولیک زوئیک^۱ با ظرفیت ۶۰ تن واقع در آزمایشگاه خواص مکانیکی پارک علم و فناوری مشهد انجام شده است. همانطور که در شکل ۵-الف مشاهده می‌شود، این دستگاه دارای دو فک بالا و پایین است که فک پایینی ثابت و فک بالایی متحرک است. سرعت حرکت فک بالا در این آزمایش ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه است. شکل‌های ۵-ب و ج چگونگی قرارگیری نمونه‌ها بر روی دستگاه در حین آزمایش را نشان می‌دهند. در این پژوهش نمونه‌ها در معرض دو نوع بار محوری قائم و بار مایل با زاویه ۴۵ درجه آزمایش شده‌اند. بارگذاری مایل با جایگذاری دو عدد فیکسچر یا فک ۴۵ درجه در دستگاه انجام شد (شکل ۵-ج).



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۵): نمودار تنش - کرنش مهندسی فوم پلی یورتان سخت با چگالی ۱۴۵ کیلوگرم بر مترمکعب.

۴- نتایج آزمایش‌های تجربی

در این بخش نتایج آزمایش‌های تجربی به تفصیل بیان خواهد شد.

۴-۱- منحنی‌های نیرو-جابجایی جذب‌کننده‌ها در معرض بارگذاری فشاری محوری

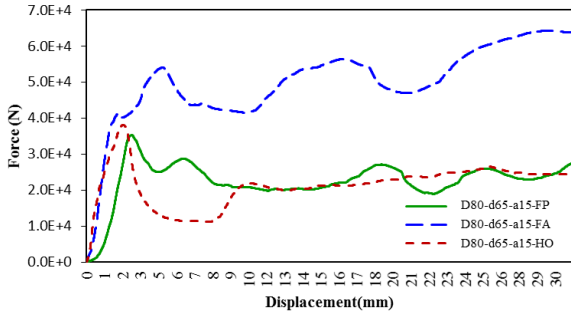
تصاویر سه نمونه از جاذب‌ها با قطر بزرگ ۸۰ mm قبل و بعد از انجام آزمایش، در شکل ۶ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، تغییر شکل به صورت فروریزش نامتقارن اتفاق افتاده است. نمودارهای نیرو-جابجایی بدست آمده برای این نمونه‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در شروع بارگذاری نیرو به صورت خطی تا یک مقدار بیشینه افزایش یافته که علت تغییر خطی نیرو رفتار الاستیک مخروط‌های دو دیواره در معرض اثر بار فشاری قبل از آغاز فروریزش است. نیروی لازم برای تغییر شکل محوری مخروط‌های دو دیواره با شروع فروریزش مخروط‌ها به صورت ناگهانی کاهش یافته و دوباره با تشکیل چین داخلی شروع به افزایش نموده است. برای مخروط بدون فوم این کاهش نیرو بیشتر از مخروط‌های پر شده با فوم است.

در مخروط بدون فوم تماس سطوح نواحی چین خورده مخروط موجب افزایش نیروی لهیدگی پوسته خواهد شد. نیروی بیشینه در مخروط دو دیواره پر شده از فوم آلومینیومی بسیار بیشتر از نیروی بیشینه در دو نمونه قبلی است. همانطور که مشاهده می‌شود، افزودن فوم پلی یورتان تأثیر چندانی بر بیشترین نیروی قابل تحمل ندارد و فقط باعث می‌شود که نیروی عامل پس از رسیدن به مقدار بیشینه افت شدید نداشته باشد و ظرفیت جذب انرژی (سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی) افزایش یابد.

تصاویر دو نمونه دیگر از جاذب‌ها با قطر بزرگ ۷۰mm قبل و بعد از انجام آزمایش در شکل ۸ نشان داده شده است. فاصله دیواره‌های این مخروط‌ها از مخروط‌های قبلی کمتر است. نمودارهای نیرو-جابجایی بدست آمده برای این نمونه‌ها در شکل ۹ ارائه شده است. از شکل ۹ نتیجه می‌شود که در این حالت افزودن فوم آلومینیومی تأثیری بر بیشینه نیرو ندارد ولی وجود فوم آلومینیومی باعث می‌شود که نیروی عامل پس از رسیدن به بیشینه مقدار خودش، افت شدیدی نکرده و ظرفیت جذب انرژی به میزان ۲۵ درصد افزایش یابد. بنابراین، وجود فوم آلومینیومی منجر به افزایش بازدهی جذب‌کننده می‌شود.

(علمی-پژوهشی)

مسعود صالح‌نژاد، محمود شریعتی، امیر نجیبی و مسعود مهدی‌زاده رخی



شکل (۷): نمودار نیرو-جابجایی مخروط‌های دو دیواره بدون فوم، پر شده با فوم پلی یورتان و پر شده با فوم آلومینیوم در معرض بارگذاری محوری.



D80-d65-a15-FA-0



D80-d65-a15-FP-0



D80-d65-a15-HO-0



شکل (۶): تصاویر سه نمونه از مخروط‌های با قطر بزرگ ۸۰ میلی‌متر قبل و بعد از انجام آزمایش.



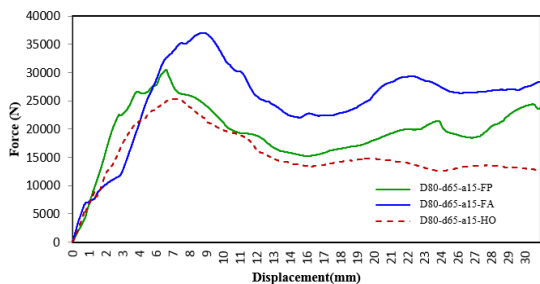
D70-d60-a5-FA-0



D70-d60-a5-HO-0

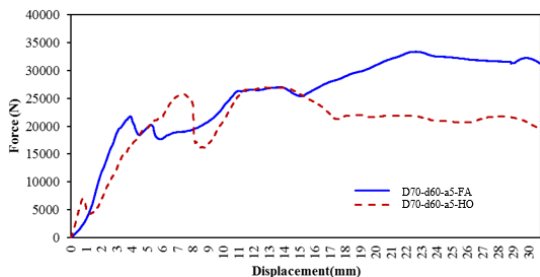


شکل (۸): تصاویر دو نمونه از مخروط‌های با قطر بزرگ ۷۰ میلی‌متر قبل و بعد از انجام آزمایش.

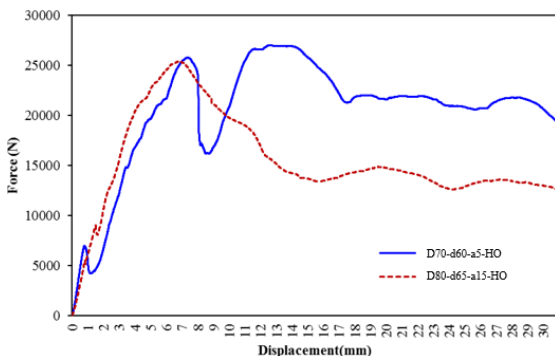


شکل (۱۰): مقایسه نمودار نیرو-جابجایی مخروط دو دیواره تو خالی، پر شده از فوم پلی یورتان و آلومینیومی در معرض بارگذاری مایل با زاویه ۴۵ درجه.

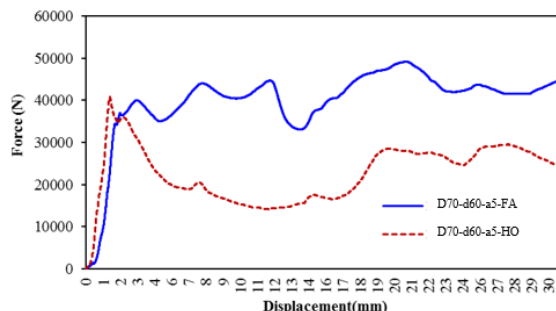
منحنی‌های نیرو-جابجایی مخروط‌هایی که فاصله دیواره‌های آنها کمتر است، در معرض بارگذاری مایل و در دو حالت توخالی و پر شده از فوم آلومینیوم در شکل ۱۲ ترسیم و مقایسه شده‌اند. بر طبق شکل ۱۲ برای این نمونه‌ها که فاصله دیواره‌های آنها کمتر است که افزودن فوم آلومینیومی باعث بیشتر شدن بیشینه نیرو می‌شود. منحنی‌های نیرو-جابجایی مربوط به مقایسه دو مخروط دو دیواره که قطر قاعده مخروط و فاصله بین دیواره‌های آنها متفاوت است، در معرض بارگذاری مایل در شکل ۱۳ ارائه شده‌اند. در بارگذاری مایل بر روی مخروط‌های دو دیواره، کمتر کردن فاصله بین دیواره‌ها تأثیر چندانی بر بیشینه نیرو ندارد، ولی همانطور که از روی شکل پیداست با کم شدن فاصله بین دیواره‌ها نیروی میانگین و در نتیجه سطح زیر نمودار افزایش یافته و باعث بیشتر شدن بازده جذب‌کننده می‌شود.



شکل (۱۲): مقایسه نمودار نیرو-جابجایی مخروط دو دیواره تو خالی و پر شده از فوم آلومینیومی با فاصله دیواره‌های کمتر در معرض بارگذاری مایل با زاویه ۴۵ درجه.

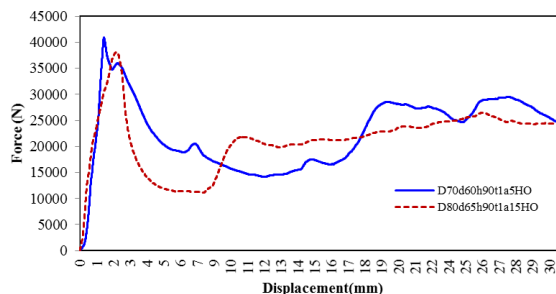


شکل (۱۳): مقایسه نمودار نیرو-جابجایی دو مخروط دو دیواره تو خالی با فاصله دیواره‌های متفاوت در بارگذاری مایل با زاویه ۴۵ درجه.



شکل (۹): مقایسه نمودار نیرو-جابجایی مخروط دو دیواره تو خالی و پر شده از فوم آلومینیومی با فاصله دیواره‌های کمتر در معرض بارگذاری محوری.

برای مقایسه دو مخروط دو دیواره تو خالی در معرض بارگذاری محوری که فاصله بین دیواره‌های آنها متفاوت است، منحنی‌های نیرو-جابجایی مربوط به این نمونه‌ها در شکل ۱۰ ترسیم و مقایسه شده‌اند. همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، در بارگذاری محوری روی مخروط‌های دو دیواره، کمتر کردن فاصله بین دیواره‌ها تأثیر چندانی بر میزان جذب انرژی و بازده جذب‌کننده ندارد. زیرا بر طبق نمودار شکل ۱۰ نیروی بیشینه و همچنین میزان جذب انرژی (سطح زیر نمودار نیرو-جابه جایی) برای هر دو نمونه تقریباً یکسان است.



شکل (۱۰): مقایسه نمودار نیرو-جابجایی دو مخروط دو دیواره تو خالی با فاصله دیواره‌های متفاوت در بارگذاری محوری.

۲-۴- منحنی‌های نیرو-جابجایی جذب‌کننده‌ها در معرض بارگذاری فشاری مایل

در این بخش به بررسی و مقایسه منحنی‌های نیرو-جابجایی مخروط‌های دو دیواره تو خالی و پر شده از فوم پلی یورتان و فوم آلومینیومی در معرض بارگذاری مایل با زاویه ۴۵ درجه می‌پردازیم. شکل ۱۱ نمودار نیرو-جابجایی مخروط‌های دو دیواره تو خالی، پر شده با فوم آلومینیومی و پر شده با پلی یورتان در معرض بارگذاری ۴۵ درجه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزودن فوم پلی یورتان باعث می‌شود که بیشینه نیرو و سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی و در نتیجه بازده جذب در معرض بارگذاری با زاویه ۴۵ درجه افزایش یابد.

(علمی-پژوهشی)

مسعود صالح‌نژاد، محمود شریعتی، امیر نجیبی و مسعود مهدی‌زاده رخی

۵- انرژی ویژه و میزان جذب انرژی

انرژی ویژه بیانگر میزان انرژی جذب شده توسط ضربه‌گیر بر واحد جرم آن است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$E = D_a/M \quad (1)$$

که در این رابطه E انرژی ویژه، D_a انرژی جذب شده توسط جذب‌کننده و M جرم کل جذب‌کننده است. میزان انرژی جذب شده توسط ضربه‌گیر برابر است با:

$$D_a = P_{av} \Delta \quad (2)$$

که P_{av} بار فرو ریزش متوسط و Δ هم میزان جابجایی فشردگی است.

برای بدست آوردن میزان انرژی جذب شده توسط هر جذب‌کننده، می‌بایست سطح زیر نمودار منحنی نیرو-جابجایی را محاسبه کرد که این کار به راحتی و توسط نرم‌افزار اکسل و داده‌های مربوط به هر جذب‌کننده قابل انجام است. بازده یک جذب‌کننده از رابطه P_{av}/P_{max} بدست می‌آید که در آن P_{max} بیشینه نیروی وارد بر جذب‌کننده است. مقدار P_{max} به راحتی از روی نمودار جذب‌کننده قابل استخراج است، ولی برای بدست آوردن P_{av} ابتدا می‌بایست میزان انرژی جذب شده توسط جذب‌کننده که همان سطح زیر نمودار نیرو - جابجایی جذب‌کننده است را بدست آورد و سپس با استفاده از رابطه ۲ مقدار P_{av} یا همان مقدار نیروی میانگین را تعیین کرد. برای اینکه نتایج حاصل از این آزمایش به درستی مقایسه شوند، مقادیر بازده و میزان جذب انرژی برای همه نمونه‌ها باید در یک جابجایی یکسان محاسبه شوند. جابجایی که به منظور مقایسه مقادیر بازده و میزان جذب انرژی نمونه‌ها در نظر گرفته می‌شود، باید مربوط به بعد از فروپاشی جاذب و پس از نوسانی شدن منحنی نیرو-جابجایی باشد. در این تحقیق جابجایی ۳۰ میلی‌متر برای محاسبه مقادیر بازده و میزان جذب انرژی در نظر گرفته شده است. انرژی ویژه، انرژی جذب شده و بازده جذب‌کننده‌های آزمایش شده در معرض بارگذاری محوری و بارگذاری مایل در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین، به منظور مقایسه بهتر انرژی جذب شده توسط جذب‌کننده‌ها در معرض بارگذاری محوری و مایل توسط نمودارهای میله‌ای به ترتیب در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ به نمایش درآمده‌اند.

نتایج ارائه شده در جدول ۳ و شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان می‌دهند که با افزودن فوم پلی یورتان به مخروط دو دیواره تو خالی در معرض بارگذاری محوری، بازده آن به میزان ۷ درصد و با افزودن فوم آلومینیومی بازده آن به میزان ۲۲ درصد افزایش می‌یابد. همچنین، می‌توان نتیجه گرفت که کم کردن فاصله بین دو دیواره مخروط‌ها تأثیر چندانی بر بازده مخروط دو دیواره ندارد.

در بارگذاری مایل با افزودن فوم پلی یورتان به مخروط دودیواره تو خالی، بازده آن به میزان ۴ درصد و با افزودن فوم آلومینیومی بازده آن به میزان قابل توجه ۷ درصد افزایش می‌یابد. نکته قابل توجه در بارگذاری مایل این است که با کاهش فاصله بین دو دیواره مخروط‌ها بازده تا حدود ۱۵ درصد افزایش می‌یابد.

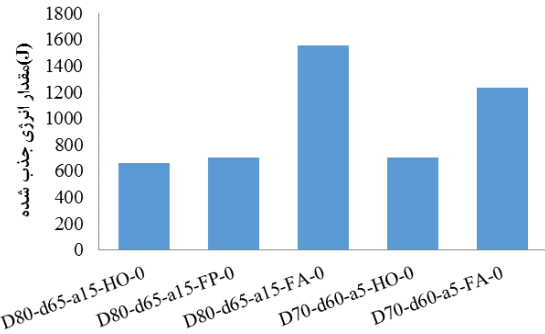
جدول (۳): مقایسه کلی نمونه‌ها از نظر میزان جذب انرژی و بازده جذب‌کننده‌ها.

ردیف	نمونه	بیشینه نیرو P_{max} (N)	نیروی میانگین P_{av} (N)	بازده جذب P_{av}/P_{max} (%)	شده انرژی جذب D_a (J)	انرژی ویژه $E = D_a/M$
۱	D80-d65-a15-HO-0	۳۸۰۴۴/۴	۲۱۲۹۶/۲	۵۶	۶۶۰/۲	۳۳۱۷/۶
۲	D80-d65-a15-FP-0	۳۵۲۶۶/۲	۲۲۵۲۱	۶۳/۹	۶۹۸/۲	۲۴۵۸/۳
۳	D80-d65-a15-FA-0	۶۴۲۴۷/۵	۵۰۰۴۳	۷۷/۹	۱۵۵۱/۴	۴۷۸۸/۲
۴	D70-d60-a5-HO-0	۴۰۹۱۵/۳	۲۲۷۲۰/۳	۵۵/۵	۷۰۴/۴	۳۰۱۰/۱
۵	D70-d60-a5-FA-0	۴۹۲۲۶/۸	۳۹۸۵۹	۸۱	۱۲۵۳/۷	۴۵۵۹/۶
۶	D80-d65-a15-HO-45	۲۵۳۸۵/۵	۱۵۵۰۳/۱	۶۱	۴۸۰/۶	۲۳۰۰
۷	D80-d65-a15-FP-45	۳۰۴۸۹/۶	۱۹۶۲۳/۱	۶۴/۳	۶۰۸/۳	۲۱۳۴/۵
۸	D80-d65-a15-FA-45	۳۷۰۸۹	۲۵۱۱۷/۳	۶۷/۷	۷۷۸/۷	۲۴۶۴/۱
۹	D70-d60-a5-HO-45	۲۷۰۱۷/۷	۲۰۴۹۷	۷۵/۹	۶۳۵/۵	۲۸۲۴/۳
۱۰	D70-d60-a5-FA-45	۳۳۴۰۰/۵	۲۵۴۰۰	۷۶	۷۸۷/۴	۳۰۷۶

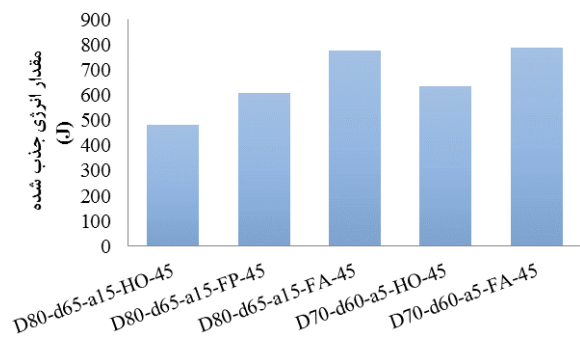
مخروط ردیف ۳ و کمترین میزان انرژی جذب شده مربوط به مخروط ردیف ۹ است. اختلاف نتایج ثبت شده برای این دو نمونه در مقایسه با سایر نمونه‌ها چشمگیر و معنی دار است. دلیل ایجاد این اختلاف در نتایج را می‌توان بدین صورت بیان کرد که نمونه واقع در ردیف ۳ جدول ۳ هر سه عامل افزایش ظرفیت جذب انرژی، یعنی فوم آلومینیومی، فاصله دیواره زیاد و بارگذاری محوری را دارد و بالعکس. نمونه واقع در ردیف ۹ جدول ۳، هر سه عامل کاهش ظرفیت جذب انرژی، یعنی نداشتن فوم، فاصله دیواره کم و بارگذاری مایل را با هم دارد. علاوه بر این، ملاحظه می‌شود که در بارگذاری مایل بیشترین میزان انرژی جذب شده مربوط به مخروط دو دیواره پر شده از فوم آلومینیومی بوده که فاصله بین دیواره‌های آن بیشتر است و بیشترین انرژی ویژه مربوط به مخروط دو دیواره تو خالی با فاصله دیواره‌های کمتر است. همچنین، کمترین میزان انرژی جذب شده مربوط به مخروط دو دیواره تو خالی است که فاصله بین دیواره‌های آن بیشتر بوده و کمترین انرژی ویژه مربوط به مخروط دو دیواره پر شده از فوم پلی یورتان با فاصله دیواره‌های بیشتر است.

۶- مقایسه با حل عددی

به منظور مقایسه نتایج تجربی با نتایج حل عددی، یک تحلیل عددی برای نمونه D70-d60-a5-HO-0 با استفاده از نرم افزار المان محدود آباکوس انجام شده است. هندسه و شرایط مرزی اعمال شده در نرم افزار در شکل ۱۶ نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۶ یک صفحه صلب در لبه پایینی نمونه قرار داده و کاملاً ثابت شده است. یک صفحه صلب دیگر در بالای نمونه قرار داده شده و تمامی درجات آزادی آن به جز درجه آزادی حرکت خطی در امتداد محور مخروط گرفته شده است. با اعمال سرعت به صفحه صلب بالایی فرآیند فروریزش جاذب مخروطی مورد مدلسازی و تحلیل قرار گرفت. برای تحلیل مدل در نرم افزار آباکوس از حلگر دینامیک ضمنی^۱ استفاده شده است. تصویر نمونه پس از اعمال ۳۰ میلیمتر فشرده‌گی حاصل از تحلیل عددی و تحلیل تجربی در شکل ۱۷ ارائه و با همدیگر مقایسه شده‌اند. کانتورهای کرنش پلاستیک معادل نیز در شکل حاصل از تحلیل عددی ارائه شده‌اند. منحنی‌های نیرو - جابجایی حاصل از تحلیل‌های تجربی و عددی مربوط به این نمونه در شکل ۱۸ ارائه شده است که منحنی‌ها مطابقت قابل قبولی دارند.



شکل (۱۴): مقدار انرژی جذب شده مخروط‌های دودیواره در معرض بارگذاری محوری.



شکل (۱۵): مقدار انرژی جذب شده مخروط‌های دودیواره در معرض بارگذاری مایل با زاویه ۴۵ درجه.

با مشاهده نتایج ارائه شده در جدول ۳ می‌توان دریافت که ظرفیت جذب انرژی در بارگذاری مایل به طور کلی کمتر از بارگذاری محوری است. بر طبق نتایج بدست آمده در بارگذاری مایل در هنگام فروپاشی سازه سه ناحیه بر روی جاذب قابل تشخیص است: (۱) منطقه‌ای که در آن فروپاشی محوری پیش رونده غالب است، (۲) ناحیه‌ای که در آن چین خوردگی محوری پیش رونده به خمش کلی تبدیل می‌شود و (۳) ناحیه‌ای است که در آن خمش کلی غالب است. بنابراین همان‌طور که در مرجع [۱۹] نیز اشاره شده است، کاهش ظرفیت جذب انرژی در بارگذاری مایل به این دلیل است که انرژی جذب شده توسط خمش کلی کمتر از انرژی جذب شده توسط فروپاشی محوری پیش رونده است. ملاحظه می‌شود که در بارگذاری محوری بیشترین میزان انرژی جذب شده و انرژی ویژه مربوط به مخروط دو دیواره پر شده از فوم آلومینیومی با فاصله دیواره‌های بیشتر است و کمترین میزان انرژی جذب شده مربوط به مخروط دو دیواره تو خالی بوده که فاصله دیواره‌های آن کمتر است. همچنین، در جدول ۳ مشاهده می‌شود که بین تمام نمونه‌های آزمایش شده، بیشترین میزان انرژی جذب شده مربوط به

(علمی-پژوهشی)

مسعود صالح‌نژاد، محمود شریعتی، امیر نجیبی و مسعود مهدی‌زاده رخی

۷- نتیجه گیری

در این پژوهش قابلیت جذب انرژی و رفتار فروریزش سازه‌های مخروطی جدار نازک دو دیواره در معرض بارگذاری محوری و مایل با زاویه ۴۵ درجه به صورت تجربی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. همچنین، تأثیر عواملی مثل تغییر ابعاد هندسی مخروطها، زاویه بارگذاری و تزریق فوم‌های آلومینیومی و پلی یورتان بین دو دیواره مخروطها بررسی و به طور خلاصه نتایج زیر حاصل شد:

۱- هنگامی که جاذب‌های مخروطی دو دیواره در معرض بارگذاری محوری فشاری قرار می‌گیرند، تزریق فوم پلی یورتان بین دو دیواره تأثیر چندانی بر نیروی بیشینه قابل تحمل توسط سازه ندارد و فقط باعث می‌شود نیروی عامل پس از رسیدن به مقدار بیشینه افت شدیدی نداشته باشد و در نتیجه سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی و همچنین میزان جذب انرژی افزایش یابد. بنابراین، وجود فوم پلی یورتان باعث افزایش بازده جذب‌کننده می‌شود.

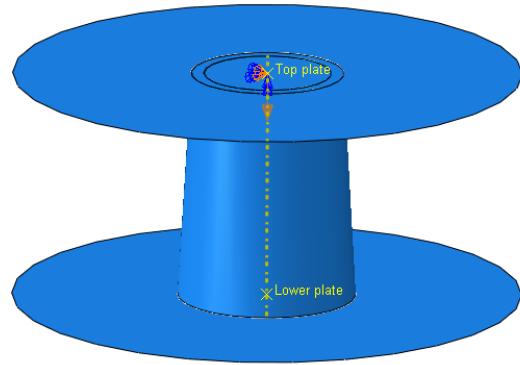
۲- هنگامی که جاذب‌های مخروطی دو دیواره در معرض بارگذاری محوری فشاری قرار می‌گیرند، تزریق فوم آلومینیومی بین دو دیواره باعث بیشتر شدن بیشینه نیروی تحمل شده توسط جاذب و افزایش سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی و در نتیجه باعث افزایش جذب انرژی و بازده جذب‌کننده می‌شود.

۳- هنگامی که جاذب‌های مخروطی دو دیواره در معرض بارگذاری محوری فشاری قرار می‌گیرند، با کمتر شدن فاصله بین دیواره‌ها افزودن فوم آلومینیومی بین دیواره‌ها باعث افزایش بازده جذب‌کننده می‌شود.

۴- هنگامی که جاذب‌های مخروطی دو دیواره در معرض بارگذاری محوری فشاری قرار می‌گیرند، کم کردن فاصله بین دیواره‌های دو مخروط تأثیر چندانی بر میزان انرژی جذب شده و بازده جذب‌کننده ندارد. چرا که بیشینه نیرو و سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی و همچنین نیروی میانگین تا حدودی بی تغییر می‌مانند.

۵- هنگامی که جاذب‌های مخروطی دو دیواره در معرض بارگذاری محوری مایل قرار می‌گیرند، تزریق فوم پلی یورتان بین دیواره‌های جاذب، نیروی بیشینه قابل تحمل توسط سازه و نیروی میانگین را افزایش داده و باعث افزایش بازده جذب‌کننده می‌شود.

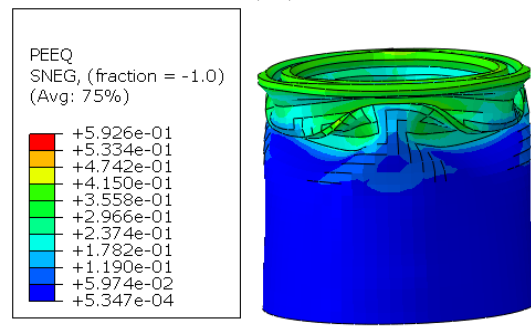
۶- در بارگذاری مایل افزودن فوم آلومینیومی به مخروط دو دیواره باعث بالا رفتن نیروی بیشینه و افزایش سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی شده و در نتیجه بازده جذب‌کننده را افزایش می‌دهد.



شکل (۱۶): هندسه و نحوه بارگذاری نمونه D70-d60-a5-HO-0.

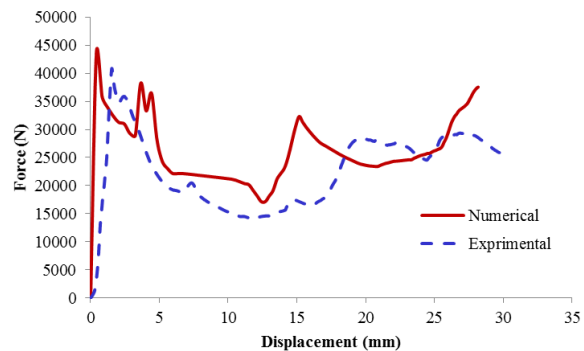


(الف)



(ب)

شکل (۱۶): تغییر شکل نمونه D70-d60-a5-HO-0 پس از اعمال بار، (الف) حاصل از تحلیل تجربی و (ب) حاصل از تحلیل عددی به همراه کانتورهای کرنش پلاستیک معادل.



شکل (۱۶): مقایسه منحنی‌های نیرو-جابجایی برای نمونه D70-d60-a5-HO-0 حاصل از تحلیل‌های عددی و تجربی.

(علمی-پژوهشی)

بررسی اثر فوم‌های پلیمری و آلومینیومی بر روی رفتار فروریزش سازه‌های مخروطی دود دیواره نازک فولادی

می‌گیرند، با تزریق فوم پلی یورتان و فوم آلومینیومی بین دیواره‌های این سازه‌های مخروطی می‌توان میزان جذب انرژی و بازده جذب‌کننده را بالاتر برد. در بارگذاری محوری بر روی پوسته‌های مخروطی دو دیواره جدار نازک به منظور بالا بردن بازده و همچنین افزایش میزان جذب انرژی سازه، می‌توان فاصله بین دو دیواره را کمتر کرد. همچنین، در بارگذاری محوری بر روی جاذب‌های مخروطی دو دیواره، با توجه به تأثیر کم فوم پلی یورتان بر عملکرد جاذب می‌توان از بکارگیری فوم پلی یورتان در طراحی این جاذب‌کننده‌ها صرف‌نظر کرد.

۷- هنگامی که جاذب‌های مخروطی دو دیواره در معرض بارگذاری محوری مایل قرار می‌گیرند، کم کردن فاصله بین دو دیواره مخروط باعث بیشتر شدن سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی و میزان جذب انرژی می‌شود، در حالی که بیشینه نیروی آن تغییری نمی‌کند. در نتیجه کم کردن فاصله بین دو دیواره مخروط باعث افزایش بازده جذب‌کننده می‌شود.

۸- ظرفیت جذب انرژی در بارگذاری مایل به طور کلی کمتر از بارگذاری محوری است.

به‌طور کلی می‌توان گفت هنگامی که پوسته‌های مخروطی دو دیواره جدار نازک در معرض بارگذاری محوری فشاری قرار

۸- مراجع

- [1] F. M. n. M. Tagdari, S. Saleh ghafari,, "Introduction to the design of cylindrical shock absorbers," Malek Ashtar University of Technology, Tehran, 2011. (in Persia).
- [2] X. Zhang and H. Huh, "Energy absorption of longitudinally grooved square tubes under axial compression," *Thin-Walled Structures*, vol. 47, pp. 1469-1477, 2009.
- [3] M. A. F. A.Ghamarian, "Experimental and numerical analysis of axial collapse of hybrid thin-walled," *Mechanics Aerospace journal*, vol. 8, pp. 99-109, 2012. (in Persian).
- [4] M. Shariati, M. Davarpanah, H. Chavoshan, and H. Allahbakhshy, "Numerical and experimental investigations on buckling and control amount of energy absorption of stainless steel 304L shells with various shapes under axial loading," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 14, pp. 60-68, 2014.
- [5] A. Dadrasi, "Numerical and experimental study on effect of rectangular cutout on buckling load of steel conical shells," in *17th ISME conference*, 2008.
- [6] N. Gupta, N. M. Sheriff, and R. Velmurugan, "A study on buckling of thin conical frusta under axial loads," *Thin-walled structures*, vol. 44, pp. 986-996, 2006.
- [7] Z. Li, J. Yu, and L. Guo, "Deformation and energy absorption of aluminum foam-filled tubes subjected to oblique loading," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 54, pp. 48-56, 2012.
- [8] A. Ghamarian, H. R. Zarei, and M. T. Abadi, "Experimental and numerical crashworthiness investigation of empty and foam-filled end-capped conical tubes," *Thin-Walled Structures*, vol. 49, pp. 1312-1319, 2011.
- [9] C. Qi, S. Yang, and F. Dong, "Crushing analysis and multiobjective crashworthiness optimization of tapered square tubes under oblique impact loading," *Thin-Walled Structures*, vol. 59, pp. 103-119, 2012.
- [10] Z. Ahmad, D. Thambiratnam, and A. 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.
- [11] Q. Cheng, W. Altenhof, and L. Li, "Experimental investigations on the crush behaviour of AA6061-T6 aluminum square tubes with different types of through-hole discontinuities," *Thin-walled structures*, vol. 44, pp. 441-454, 2006.
- [12] H. Yin, G. Wen, Z. Liu, and Q. Qing, "Crashworthiness optimization design for foam-filled multi-cell thin-walled structures," *Thin-Walled Structures*, vol. 75, pp. 8-17, 2014.
- [13] S. Hou, X. Han, G. Sun, S. Long, W. Li, X. Yang, *et al.*, "Multiobjective optimization for tapered circular tubes," *Thin-Walled Structures*, vol. 49, pp. 855-863, 2011.
- [14] F. Djameluddin, S. Abdullah, A. Ariffin, and Z. Nopiah, "Optimization of foam-filled double circular tubes under axial and oblique impact loading conditions," *Thin-walled structures*, vol. 87, pp. 1-11, 2015.
- [15] M. B. Azimi and M. Asgari, "A new bi-tubular conical-circular structure for improving crushing behavior under axial and oblique impacts," *International journal of mechanical sciences*, vol. 105, pp. 253-265, 2016.
- [16] G. Li, Z. Zhang, G. Sun, X. Huang, and Q. Li, "Comparison of functionally-graded structures under multiple loading angles," *Thin-Walled Structures*, vol. 94, pp. 334-347, 2015.
- [17] N. Qiu, Y. Gao, J. Fang, Z. Feng, G. Sun, and Q. Li, "Crashworthiness analysis and design of multi-cell hexagonal columns under multiple loading cases," *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 104, pp. 89-101, 2015.
- [18] O. Mohammadiha and H. Ghariblu, "Crush response of variable thickness distribution inversion tubes under oblique loading," *Thin-Walled Structures*, vol. 109, pp. 159-173, 2016.
- [19] Q. Gao, L. Wang, Y. Wang, and C. Wang, "Crushing analysis and multiobjective crashworthiness optimization of foam-filled ellipse tubes under oblique impact loading," *Thin-Walled Structures*, vol. 100, pp. 105-112, 2016.
- [20] Q. Gao, L. Wang, Y. Wang, F. Guo, and Z. Zhang, "Optimization of foam-filled double ellipse tubes under multiple loading cases," *Advances in Engineering Software*, vol. 99, pp. 27-35, 2016.
- [21] G. Zhu, Z. Wang, X. Huo, A. Cheng, G. Li, and C. Zhou, "Experimental and numerical investigation into axial compressive behaviour of thin-walled structures filled with foams and composite skeleton," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 122, pp. 104-119, 2017.
- [22] S. Chahardoli and A. A. Nia, "Experimental and numerical investigations on collapse properties of capped-end frusta tubes with circular triggers under axial quasi-static loading," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 134, pp. 545-561, 2017.
- [23] Z. Li, R. Chen, and F. Lu, "Comparative analysis of crashworthiness of empty and foam-filled thin-walled tubes," *Thin-Walled Structures*, vol. 124, pp. 343-349, 2018.
- [24] M. Mahbod and M. Asgari, "Crushing analysis of empty and foam-filled cylindrical and conical corrugated composite tubes," *Mechanics of Advanced Composite Structures*, vol. 6, pp. 35-44, 2019.
- [25] V. Hoseini, M. Shariati, M. Mirzababae, and M. Mahdizadeh Rokhi, "Experimental and

Numerical Analysis of Energy Absorption of Hollow and Foam filled thick-wall Aluminum Tubes Considering Different Damage Models," *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 51, pp. 95-104, 2022.

[26] V. Hoseini, M. Shariati, and M. Mahdizadeh Rokhi, "Collapse Behaviour and Energy

Absorption of Hemispherical and Conical Shells under Impact Loading Considering Different Damage Models," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 20, pp. 1611-1623, 2020.