



بررسی تجربی و عددی تاثیر هندسه مقطع و فوم فلزی بر روی تغییر شکل و ویژگی‌های جذب انرژی لوله‌های جدارنازک

علی علوی نیا^{۱*} و علی فرشاد^۲

^۱دانشیار، دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک، همدان

^۲دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان، تاکستان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۴/۱۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۲/۷/۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۰/۲۶

چکیده

در این تحقیق، اثر هندسه مقطع و وجود پرکننده فوم فلزی بر رفتار مکانیکی مقاطع جدار نازک تحت تاثیر بارهای محوری شبه استاتیکی به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. سه نوع از مقاطع جدار نازک (دایره‌ای، شش ضلعی و مربع) از جنس آلومینیوم ۱۲۰۰ به صورت توخالی و پر شده از فوم تحت بارگذاری محوری شبه‌استاتیکی قرار داده شده و خصوصیات جذب انرژی آنها شامل نیروی بیشینه، نیروی متوسط لهیدگی، انرژی جذب شده و نحوه تغییر شکل مورد مطالعه و مقایسه واقع شده‌اند. از دستگاه اینسترون مدل ۸۳۰۵ برای بارگذاری شبه‌استاتیکی استفاده شده است. نتایج پژوهش نشان داد که مقطع دایره‌ای دارای بیشترین میزان جذب انرژی و نیروی متوسط است؛ فوم فلزی باعث بالا رفتن میزان جذب انرژی و مقدار نیروی میانگین می‌شود؛ فوم فلزی در حالت کلی تاثیری بر تعداد چین خوردگی‌ها ندارد و نهایتاً مقدار جذب انرژی سازه پر شده از فوم، از مجموع انرژی‌های جذب شده توسط لوله توخالی و فوم تنها بیشتر است. بعلاوه، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و داده‌های تجربی تطابق خوبی با هم دارند.

کلمات کلیدی: لوله جدارنازک؛ فوم فلزی؛ جذب انرژی؛ حالت تغییر شکل.

Experimental and numerical investigations of effects of section geometry and metallic foam filler on deformation and energy absorption characteristics of thin-walled tubes

A. Alavi Nia^{1,*} and A. Farshad²

¹Assoc. Prof., Mech. Eng., Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

²M.Sc. Student, Mech. Eng., Islamic Azad University, Takestan, Iran

Abstract

In this research, effects of section geometry and metallic foam filler on mechanical behavior of thin-walled tubes under axial quasi-static loads are studied both experimentally and numerically. Three types of Al-1200 thin-walled geometries, circular, square and hexagonal in the forms of hollow and foam-filled tubes are subjected to quasi-static loads and their energy absorption characteristics including maximum load, mean crushing load, absorbed energy and deformation modes are studied and compared. Instron 8305 model machine was used to axial quasi-static loading of the samples. Results of the research show that circular section has the greatest values of mean crushing load and absorbed energy; metallic foam filler increases the mean crushing load and energy absorption capacity; foam-filling does not affect the number of folds in general and finally, absorbed energy for foam-filled tube is larger than the sum of energies absorbed by the tube and foam when are loaded separately. Furthermore, numerical results are in good agreement with the experimental data.

Keywords: Thin-walled tube; Metallic foam; Energy absorption; Deformation mode.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۸۱۳۸۲۹۲۵۰۸؛ فکس: ۰۸۱۳۸۲۹۲۶۳۱

آدرس پست الکترونیک: alavi1338@yahoo.com

۱- مقدمه

بسیاری از مواد نرم که در سازه‌های مهندسی به کار می‌روند، پس از تسلیم اولیه، قبل از شکست مقاومت قابل توجهی از خود نشان می‌دهند [۱]. به همین دلیل بیشتر جاذب‌های انرژی از مواد نرم ساخته می‌شوند. بجز فلزات، مواد دیگر مثل چوب، پلاستیک، مواد مرکب و پلیمرها نیز در ساخت جاذب‌های انرژی کاربرد دارند. پیشرفت تکنولوژی منجر به ساخت مواد جدیدی شده است که تاثیرات بزرگی بر تولیدات صنعتی داشته‌اند. فوم‌های فلزی یکی از این مواد هستند که عموماً بین ۷۵٪ تا ۹۵٪ ساختار آن‌ها از منفذ ساخته شده است. این مواد در سه گروه عمده شامل فوم‌های پلیمری، سرامیکی و فلزی دسته‌بندی می‌شوند. کاربرد ابتدایی فوم در صنایع دریایی بود، سپس در دهه هفتاد میلادی در صنایع بسته‌بندی مورد استفاده قرار گرفت. بعدها کاربرد این مواد در صنایع ساختمان، خودرو سازی، ورزشی، الکتریکی و تجهیزات پزشکی گسترش یافت. ویژگی‌های کلیدی فوم‌ها شامل خواص جذب انرژی، عایق‌صوتی و خواص مکانیکی هستند [۲]. فوم‌های فلزی دارای چگالی کم (چگالی نسبی بین ۰/۰۲ تا ۰/۲) و استحکام مناسب برشی و شکست هستند. ظرفیت میراگری فوم‌های فلزی حدود ده برابر فلزات است. فوم‌های فلزی دارای برخی ویژگی‌های شبیه چوب مانند سبکی، سفتی و قابلیت اتصال توسط پیچ‌های چوبی هستند. این مواد غیر قابل اشتعال بوده و توانایی انتقال حرارت استثنایی دارند [۳]. استحکام کششی و فشاری فوم آلومینیومی تقریباً به ترتیب، برابر ۱۴-۰/۶ و ۳۰-۱ و مگاپاسکال است [۳]. از سوی دیگر، فوم‌های پلیمری دارای چگالی کمتر بوده (بین ۳۰ تا ۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب) و تولید آن‌ها ساده‌تر است [۴]. استحکام کششی و فشاری فوم‌های پلیمری تقریباً به ترتیب، برابر ۸۳ و ۱۴۰ کیلوپاسکال است [۴].

فوم‌های فلزی برخلاف فوم‌های پلیمری بسیار مستحکم هستند. به دلیل سبکی، بسیاری از فوم‌های فلزی از آلومینیوم ساخته می‌شوند. با توجه به نو بودن مواد فوم فلزی، تحقیق در زمینه روش تولید، خواص و کاربردهای آن - هر دو سال‌های اخیر رو به گسترش بوده است [۵].

آکتای^۱ و همکارانش [۶] بر روی مقاطع جدار نازک و فوم پلی‌استایرن تحقیق کردند و نشان دادند که مقاطع پر شده از فوم در جذب انرژی رفتار بهتری از خود نشان می‌دهند. میرمحمد صادقی و همکارانش [۷] رفتار مکانیکی لوله‌های جدار نازک شیاردار را مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که نحوه لهیدگی و میزان انرژی جذب شده در لهیدگی محوری لوله‌های جدارنازک شیاردار می‌تواند به وسیله فواصل شیارها کنترل شود. محمدی‌پور و همکارانش [۸] نشان دادند که میزان جذب انرژی لوله‌های جدارنازک در بارگذاری مایل با افزایش زاویه بارگذاری کاهش می‌یابد و رفتار جذب انرژی لوله‌های جدار نازک را می‌توان با استفاده از پارامترهای هندسی کنترل کرد. هانسن^۲ و همکارانش [۹] اثر چگالی فوم را در جذب انرژی مقاطع جدار نازک پر شده از فوم آلومینیومی بررسی کردند. ژانگ^۳ و همکارانش [۱۰] مقاطع مربعی پر شده از فوم را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که مقاطع مربع جدار نازک پر شده با فوم فلزی نسبت به لوله‌های بدون فوم از نظر جذب انرژی رفتار بهتری از خود نشان می‌دهند. شوچوان^۴ و همکارانش [۱۱] با بررسی مقاطع جدار نازک با ضخامت‌های متفاوت و چگالی‌های مختلف فوم نشان دادند که افزایش ضخامت تاثیر قابل توجهی در جذب انرژی دارد. مرزبان‌راد و همکارانش [۱۲] نشان دادند که مقطع بیضی نسبت به مقاطع مربع و دایره‌ای ظرفیت جذب انرژی بهتری دارد و چنانچه جنس مقطع از آلومینیوم به فولاد تغییر کند زمان مورد نیاز جهت جذب انرژی و لهیدگی لوله تا ۴/۵ برابر بیشتر می‌شود. صالح غفاری و همکارانش [۱۳] دو نوع مقطع جدار نازک بهبود یافته با کارایی جذب انرژی بهتر را معرفی کردند. در نوع اول، حلقه‌ای فولادی از انتهای بالایی لوله جا زدند و در نوع دوم، شیارهای محیطی بر روی لوله ایجاد کردند که هر دو وضعیت موجب افزایش جذب انرژی گردید. گویلو^۵ و همکارانش [۱۴] در رابطه با جذب انرژی و چگونگی تغییر شکل متقارن و غیر متقارن لوله‌ها تحقیق کردند. علوی‌نیا و حداد [۱۵] نحوه تغییر شکل

¹ Aktay² Hanssen³ Zhang⁴ Shujuan⁵ Guillow

در بازار، آلومینیوم ۱۲۰۰ انتخاب و قطعات مورد نظر از این نوع ورق ساخته شد.

جهت تعیین خواص مکانیکی ورق‌های مورد استفاده، آزمایش کشش مطابق استاندارد ASTM E 8 M -04 و با دستگاه اینسترون 5500R بر روی سه نمونه انجام شد. شکل (۱)، نمودار تنش - کرنش یکی از نمونه‌های آزمایش شده را نشان می‌دهد. با میانگین گرفتن از نتایج آزمایش‌های انجام شده، مقادیر تنش تسلیم و تنش نهایی به ترتیب، برابر ۱۳۸ مگاپاسکال و ۱۷۹ مگاپاسکال به دست آمد.

خواص مکانیکی فوم آلومینیومی، با استفاده از آزمایش فشار تعیین شد. جهت حصول اطمینان از صحت نمودار آزمایش تجربی، به وسیله نرم‌افزار ال‌اس‌دینا^۱ نیز شبیه‌سازی آزمایش فشار بر روی فوم انجام گرفت. نمودارهای نیرو-جابجایی به دست آمده از آزمایش و شبیه‌سازی در شکل (۲) مقایسه شده‌اند. نمودار نیرو-جابجایی فوم مورد استفاده در این تحقیق، دارای یک بخش الاستیک خطی اولیه و یک بخش خمیری فزاینده بود. همچنین در شکل ۳ نمونه فوم قبل از بارگذاری و بعد از بارگذاری نشان داده شده است.

تمامی نمونه‌ها از ورق آلومینیومی ۱۲۰۰ با ضخامت ۱/۵، طول ۹۰ و محیط ۱۰۴ میلی‌متر ساخته شدند و جرم تقریبی همه آن‌ها برابر ۴۴ گرم بود. سایر مشخصات نمونه‌ها در جدول ۱ آورده شده‌اند. به دلیل همسانی طول، ضخامت، جرم و محیط مقطع همه نمونه‌ها، ابعاد ورق‌های اولیه برای همه نمونه‌ها برابر است. پس از برش و خم کردن ورق‌ها، نمونه‌ها با روش جوش کاری ساخته شدند. برای حذف تنش‌های پسماند ناشی از جوش کاری، خنک‌کاری نمونه‌ها به آرامی انجام شد. در انتها، برای داشتن نمونه‌های بدون عیب عملیات سنگ‌زنی و پرداخت صورت گرفت. برخی از نمونه‌های تولید شده در شکل ۴ نشان داده شده‌اند.

به منظور ساده شدن شرایط، برای هر حالت یک کد تعریف شد (جدول ۲). هدف اصلی این پژوهش، مطالعه اثر هندسه مقطع و پرکننده فوم فلزی بر رفتار مکانیکی لوله‌های جاذب انرژی بوده است. مقاطع جدار نازکی که در این تحقیق

و ظرفیت جذب انرژی لوله‌های جدارنازک با هندسه‌های مختلف مقطع (دایره، مربع، مستطیل، شش‌ضلعی، مثلث، هرمی و مخروطی) را به صورت تجربی و عددی بررسی نمودند و نشان دادند که در بین مقاطع مورد بررسی، مقطع دایره‌ای دارای بیشترین میزان جزی انرژی و نیروی متوسط لهیدگی است. علوی‌نیا و همکاران [۱۶] 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 تاثیر گذاشته و راندمان نیروی لهیدگی و جذب انرژی را افزایش دهد. در تحقیق دیگری، علوی‌نیا و همکاران [۱۷] اثر آغازگر فروریزش بر خواص جذب انرژی لوله‌های با مقطع مربع تحت بار مایل شبه‌استاتیکی را به دو روش تجربی و عددی بررسی کرده و نشان دادند که این آغازگرها حالت فروپاشی سازه را از کماتش کلی به کماتش پیش‌رونده تغییر داده و به میزان قابل توجهی نیروی بیشینه اولیه را کاهش می‌دهند.

در تحقیق حاضر، رفتار مقاطع جدار نازک آلومینیومی با محیط، ضخامت، ارتفاع و جرم یکسان اما هندسه متفاوت مقطع (دایره، شش‌ضلعی و مربع) در دو حالت با و بدون فوم آلومینیومی تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی به دو روش تجربی و عددی مطالعه شده است. قابلیت جذب انرژی، مقدار نیروی متوسط، نیروی بیشینه و نحوه تغییر شکل سازه‌ها مهم‌ترین عوامل مورد بررسی در این پژوهش می‌باشند.

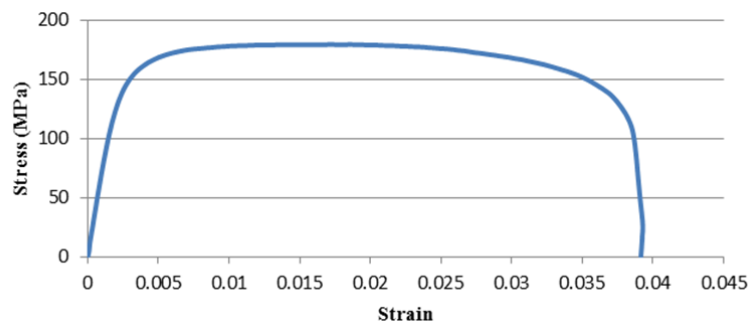
۲- آزمایش‌های تجربی

۲-۱- ویژگی‌های نمونه‌ها

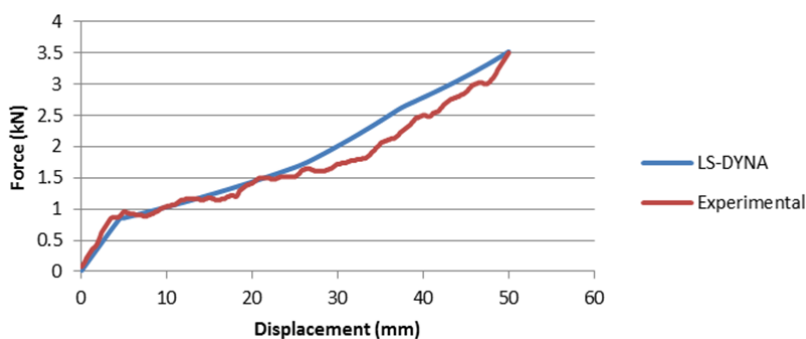
به دلیل مقدور نبودن تهیه نمونه‌ها به شکل آماده با مشخصات و ابعاد مورد نظر در بازار، اقدام به ساخت نمونه‌ها به روش کارگاهی شد. عملیات برش، خم‌کاری و جوش‌کاری ورق‌ها انجام شد و خنک کردن پس از جوش‌کاری به صورت آرام صورت گرفت تا اثرات ناخواسته بر خواص نمونه‌ها به حداقل برسد.

به دلیل شرایط خاص آلومینیوم، مانند وزن کم و مزایای دیگر برای تهیه اغلب جاذب‌های انرژی جدار نازک از آلیاژهای آلومینیوم استفاده می‌شود. از میان ورق‌های موجود

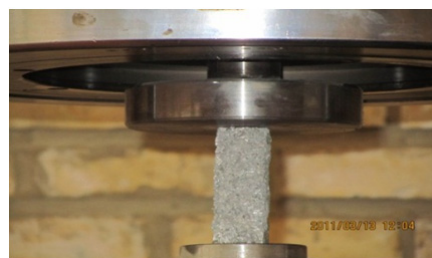
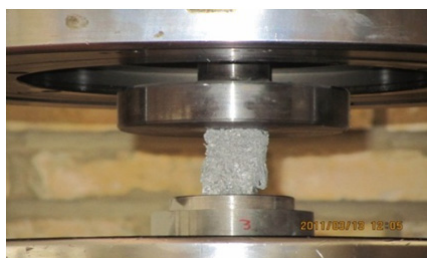
^۱ LS-Dyna



شکل ۱- نمودار تنش - کرنش آلومینیوم ۱۲۰۰



شکل ۲- نمودار نیرو - جابجایی فشاری فوم (تجربی و عددی)



شکل ۳- نمونه فوم قبل و بعد از آزمایش فشار

هندسه مقطع و پرکننده فوم فلزی بر رفتار مکانیکی لوله‌های جاذب انرژی بوده است. مقاطع جدار نازکی که در این تحقیق بررسی شده‌اند عبارتند از دایره، مربع و شش‌ضلعی. آزمایش برای دو حالت با و بدون فوم انجام گرفته است. ردیف‌های اول تا سوم در جدول ۲ برای حالتی هستند که مقطع بدون فوم است (F1) و ردیف‌های چهارم تا ششم برای حالت با فوم (F2) در نظر گرفته شده‌اند. حرف C مربوط به دایره، S مربوط به مربع و H مربوط به شش‌ضلعی است.

بررسی شده‌اند عبارتند از دایره، مربع و شش‌ضلعی. آزمایش برای دو حالت با و بدون فوم انجام گرفته است. ردیف‌های اول تا سوم در جدول ۲ برای حالتی هستند که مقطع بدون فوم است (F1) و ردیف‌های چهارم تا ششم برای حالت با فوم (F2) در نظر گرفته شده‌اند. حرف C مربوط به دایره، S مربوط به مربع و H مربوط به شش‌ضلعی است. به منظور ساده شدن شرایط، برای هر حالت یک کد تعریف شد (جدول ۲). هدف اصلی این پژوهش، مطالعه اثر

فشاری تا سقف ۶۰ تن در این دستگاه توسط سیستم هیدرولیکی میسر است. نمونه مورد نظر بدون هیچ نوع قیدی بین دو فک قرار گرفته و نمودار نیرو-جابجایی و یا تنش- کرنش در حین تغییر شکل توسط نرم‌افزار دستگاه قابل استخراج است. در این آزمایش‌ها، سرعت بارگذاری ۵۰ میلی-متر بر دقیقه و مسافتی که فک طی می‌کند ۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۵- نمایی از دستگاه اینسترون مدل ۸۳۰۵

۲-۲- نتایج آزمایش‌ها

برای اطمینان از صحت نتایج، برای هر یک از شش حالت ارائه شده در جدول ۲ سه آزمایش انجام شده و مقادیر میانگین کمیت‌های مورد نظر (انرژی جذب شده، نیروی میانگین لهیدگی، نیروی بیشینه لهیدگی و تعداد چین‌ها) ثبت شده است. نتایج آزمایش‌های انجام شده در جدول ۳ ارائه شده‌اند. بعلاوه، نمودارهای نیرو-جابجایی سازه‌های توخالی و سازه‌های پر شده با فوم در شکل‌های ۶ و ۷ مقایسه شده‌اند. نمودارهای نیرو-جابجایی هر مقطع در دو حالت توخالی و پر شده با فوم نیز در شکل‌های ۸-۱۰ مقایسه شده‌اند. شکل‌های ۷-۱۰ نشان می‌دهند که نمودارهای نیرو-جابجایی سازه‌های پر شده با فوم برخلاف نمونه‌های توخالی روند افزایشی دارند؛ این وضعیت به دلیل متراکم شدن فوم طی بارگذاری فشاری است.



شکل ۴- برخی از نمونه‌های ساخته شده (بالا: لوله‌های توخالی، پایین: لوله‌های پر شده از فوم)

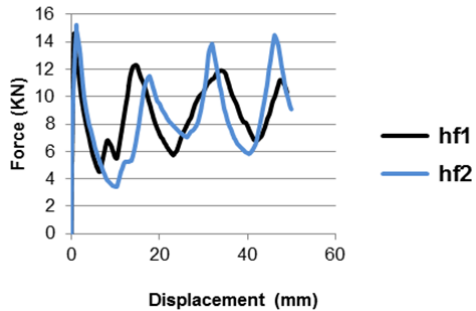
جدول ۱- مشخصات نمونه‌ها

شش-ضلعی	مربع	دایره (قطر داخلی)		
				طول هر ضلع (داخلی) (mm)
۱۷/۳۳	۲۶	۳۳		
				ضخامت (mm)
۱/۵	۱/۵	۱/۵		
				ارتفاع (mm)
۹۰	۹۰	۹۰		
				مساحت (mm ²)
۷۷۹	۶۷۶	۸۵۵		
				محیط (mm)
۱۰۴	۱۰۴	۱۰۴		
				جرم متوسط لوله و فوم (gr)
۶۲/۳۴	۵۹/۳۴	۶۳/۵		
				جرم متوسط لوله (gr)
۴۴/۸	۴۴/۱۳۷	۴۴/۲۶		
				جرم متوسط فوم (gr)
۱۷/۵۴	۱۵/۲۱	۱۹/۲۴		
				چگالی فوم (gr.cm ⁻³)
۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵		

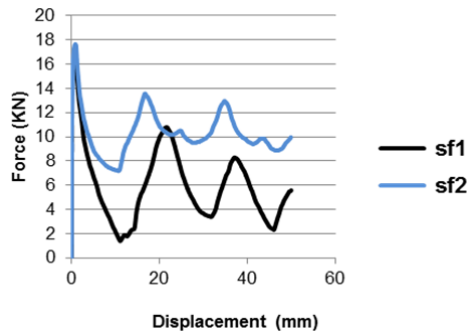
برای اعمال بارگذاری شبه‌استاتیکی از دستگاه اینسترون ۸۳۰۵ استفاده شده است (شکل ۵). این دستگاه دارای دو فک یکی در بالا و دیگری در پایین است. فک بالای دستگاه ثابت بوده و فک پایین می‌تواند با سرعت ثابت یا متغیر، مسافت تعریف شده را طی کند. اعمال نیروی کششی و

جدول ۲- کدهای نمونه‌ها

ردیف	۱	۲	۳	۴	۵	۶
نوع مقطع	دایره بدون فوم	مربع بدون فوم	شش‌ضلعی بدون فوم	دایره با فوم	مربع با فوم	شش‌ضلعی با فوم
کد آزمایش	CF1	SF1	HF1	CF2	SF2	HF2



شکل ۹- مقایسه نمودارهای نیرو-جابجایی مقطع شش-ضلعی در دو حالت توخالی و پر شده با فوم



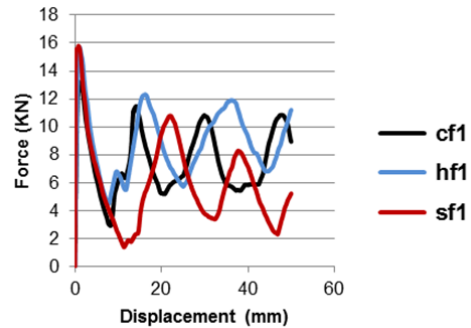
شکل ۱۰- مقایسه نمودارهای نیرو-جابجایی مقطع مربعی در دو حالت توخالی و پر شده با فوم

۳- شبیه‌سازی

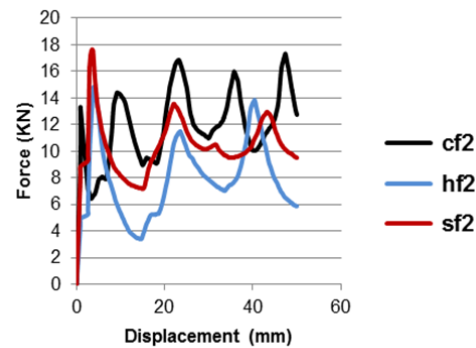
در این پژوهش، علاوه بر انجام آزمایش‌های تجربی، شبیه‌سازی رایانه‌ای نیز توسط نرم‌افزار LS-DYNA971 صورت گرفته است. برای مدل‌سازی فرایند شبه‌استاتیکی با کد صریح اجزاء محدود، از روش مقیاس جرمی (mass scale) استفاده شده که قابلیت بزرگ کردن پله زمانی را فراهم می‌کند. باید گفت که این روش به شرطی مفید است که نسبت انرژی جنبشی سازه به انرژی داخلی آن بسیار کوچک باشد. مدل‌سازی نمونه‌ها با همان شرایط آزمایشی به صورت سه-بعدی انجام شده است.

۳-۱- مدل‌سازی فوم

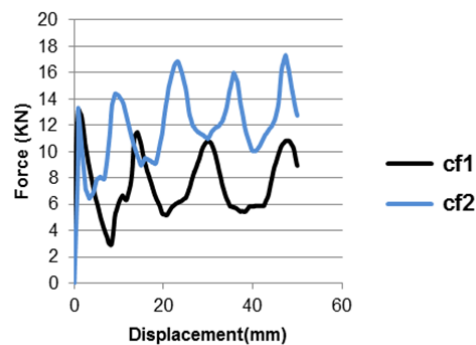
ماده فوم به صورت یک بخش مستقل و با استفاده از مدل مادی فوم قابل فشردگی (MAT-CRUSHABLE-FOAM)



شکل ۶- نمودارهای نیرو-جابجایی برای سه هندسه مختلف مقطع (بدون فوم)



شکل ۷- نمودارهای نیرو-جابجایی برای سه هندسه مختلف مقطع (پر شده با فوم)



شکل ۸- مقایسه نمودارهای نیرو-جابجایی مقطع دایره‌ای در دو حالت توخالی و پر شده با فوم

جدول ۳- مقادیر میانگین کمیت‌های مهم برای مقاطع مختلف

شکل مقطع نمونه	نحوه آزمایش	محل شروع چین خوردگی	شیوه چین خوردگی	تعداد چین خوردگی	نیروی بیشینه (N)	نیروی متوسط (N)	انرژی جذب شده (J)
دایره‌ای بدون فوم	تجربی - شبیه سازی	انتهای ثابت	مقارن و نامقارن	۴	۱۴۳۵۱	۷۵۶۴/۸	۳۷۸/۲۴
دایره‌ای با فوم	تجربی - شبیه سازی	انتهای ثابت	مقارن و نامقارن	۴	۱۴۸۰۴/۲۵	۸۰۶۲/۲	۴۰۳/۱
شش ضلعی بدون فوم	تجربی - شبیه سازی	محل برخورد	مقارن و نامقارن	۳	۱۴۶۲۴	۶۵۱۶	۳۲۵/۸
شش ضلعی با فوم	تجربی - شبیه سازی	انتهای ثابت	مقارن	۳	۱۵۲۰۹/۳	۷۰۳۶	۳۵۱/۸
مربعی بدون فوم	تجربی - شبیه سازی	محل برخورد	مقارن و نامقارن	۲	۱۵۶۲۳/۶	۵۴۷۸	۲۷۳/۹
مربعی با فوم	تجربی - شبیه سازی	انتهای ثابت	مقارن	۳	۱۶۳۹۹	۷۹۶۲/۸	۳۸۹/۱۴

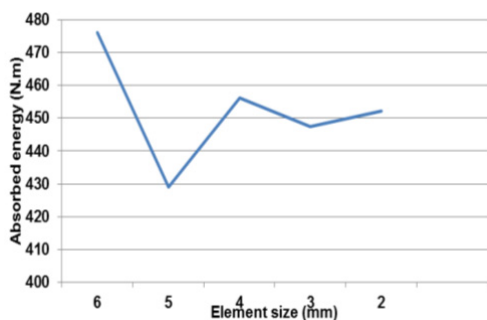
۳-۲. مدل‌های لوله و فک‌ها

هندسه مدل شامل لوله جدار نازک و دو جسم صلب (به جای فک‌های دستگاه) در دو انتهای آن است که جسم صلب بالایی در تمام جهات مقید شده در حالی که فک پایینی می‌تواند با سرعتی برابر ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه به سمت بالا حرکت کند. برای فک‌های صلب و لوله به ترتیب، از مدل‌های مادی صلب (MAT-RIGID) و تکه تکه خمیری (MAT-PICewise-LINEAR-PLASTICITY) استفاده شده است. نوع تماس بین فوم و دیواره لوله از نوع تماس خودکار سطح به سطح انتخاب شده است. مدل اجزاء محدود سیستم در شکل ۱۱ نشان داده است.

برای تعیین اندازه بهینه المان‌ها، شبیه‌سازی با اندازه‌های مختلف المان تکرار شده و اثر اندازه المان بر انرژی جذب شده

مدل شده است. دلیل انتخاب این مدل مادی، در دسترس بودن ثابت‌های آن و نیز انطباق مناسب با رفتار فوم مورد نظر بوده است. در نرم‌افزار LS-DYNA چند مدل مادی برای فوم پیشنهاد شده است که شامل مدل ماده شماره ۵۷ (Mat-low density foam) و مدل ماده شماره ۶۳ (Mat-crushable foam) می‌باشد. برای نوع اول، ثابت‌های مادی متعددی لازم است در حالی که برای نوع دوم تنها به شش ثابت نیاز است که از آزمایش فشار قابل استخراج هستند. علاوه بر آن، نتایج به دست آمده از مدل دوم با داده‌های تجربی سازگارترند.

برای شبکه‌بندی فوم از المان‌های توپر استفاده شده است. نمودار حقیقی تنش-کرنش فوم با استفاده از شکل ۲ استخراج شده و به نرم‌افزار معرفی شده است.

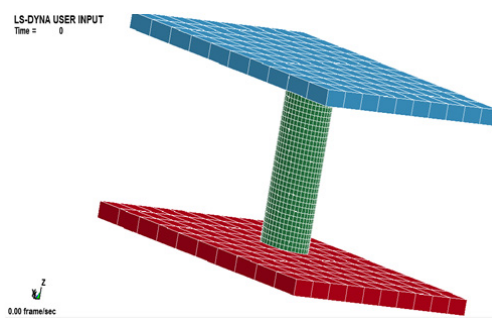


شکل ۱۲- تغییرات انرژی جذب شده با اندازه المان

چگونگی تغییر شکل نمونه‌ها که از دو روش مختلف به دست آمده‌اند در شکل ۱۳ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. ملاحظه می‌شود که در این شکل تفاوت‌هایی بین نتایج دو روش وجود دارد که ممکن است مربوط به عدم یکنواختی در نمونه‌های ساخته شده باشد. در شکل‌های ۱۴ تا ۱۹ نیز نمودارهای نیرو-جابجایی نمونه‌ها نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که این شکل‌ها مشخص می‌کنند، سازگاری بین نتایج مربوط به نمونه‌های پر شده از فوم (شکل‌های ۱۵، ۱۷ و ۱۹) بهتر از نمونه‌های بدون فوم است (شکل‌های ۱۴، ۱۶ و ۱۸). این موضوع را می‌توان چنین توضیح داد:

نمونه‌های آزمایشی به روش جوشکاری و از ورق ساخته شده‌اند، در حالی که نمونه‌های شبیه‌سازی شده بدون درز و بدون خط جوش هستند. بنابراین، نتایج حاصل از آزمایش و شبیه‌سازی مربوط به نمونه‌های بدون فوم قدری متفاوت هستند. با توجه به این‌که فوم موجود در نمونه‌های پر شده با فوم، تا حدودی از ناهمگنی سازه می‌کاهد منحنی‌ها در این حالت به هم شبیه‌تر هستند.

بررسی شده است. این تغییرات در شکل ۱۲ رسم شده و بر اساس آن اندازه بهینه المان انتخاب شده است. برای تمام حالت‌های ارائه شده در جدول ۲ شبیه‌سازی‌ها انجام شده و مقادیر کمیت‌های مهم تعیین و در جدول ۳ آورده شده است.



شکل ۱۱- مدل اجزاء محدود سیستم مورد بررسی

۴- مقایسه نتایج و بحث

نتایج شبیه‌سازی‌ها با داده‌های تجربی در جدول ۴ مقایسه شده‌اند. تفاوت بین مقادیر کمیت‌ها که از دو روش به دست آمده‌اند را می‌توان به عملیات ساخت نمونه‌ها و کاستی‌های شبیه‌سازی مانند ضریب اصطکاک نسبت داد. از آنجا که در بارگذاری ضربه‌ای شروع چین‌خوردگی از سمت محل ضربه بوده اما در حالت بارگذاری شبه‌استاتیکی این شروع محل ثابتی ندارد [۱]، داده‌های تجربی قابل اعتمادترند. غیر از محل شروع چین‌خوردگی، نتایج شبیه‌سازی‌ها با داده‌های تجربی تطابق قابل قبولی دارند. بنابراین، می‌توان از شبیه‌سازی به عنوان روشی قابل اعتماد و ساده‌تر برای مطالعه فرایند جذب انرژی استفاده کرد.

جدول ۴- مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های تجربی

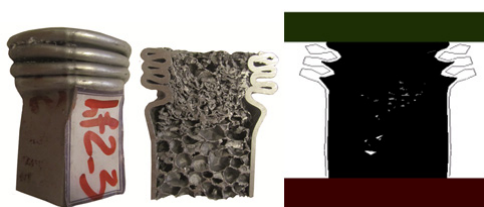
درصد اختلاف		شیوه چین-خوردگی	محل شروع چین-خوردگی	تعداد چین-خوردگی	شکل مقطع نمونه
انرژی جذب شده (J)	نیروی متوسط (N)				
۳	۴	مشابه	مشابه	مشابه	دایره‌ای بدون فوم
-۱	-۵	مشابه	مشابه	مشابه	دایره‌ای با فوم
-۲	۳	مشابه	مشابه	مشابه	شش‌ضلعی بدون فوم
۱	-۷	مشابه	مشابه	مشابه	شش‌ضلعی با فوم
۴/۵	۴	تاحدودی مشابه	مشابه	مشابه	مربعی بدون فوم
-۴	-۵	نامشابه	نامشابه	مشابه	مربعی با فوم



(ب) مقطع دایره‌ای پر شده با فوم



(الف) مقطع دایره‌ای توخالی



(د) مقطع شش ضلعی پر شده با فوم



(ج) مقطع شش ضلعی توخالی

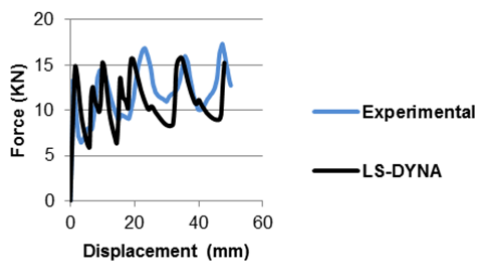


(و) مقطع مربعی پر شده با فوم

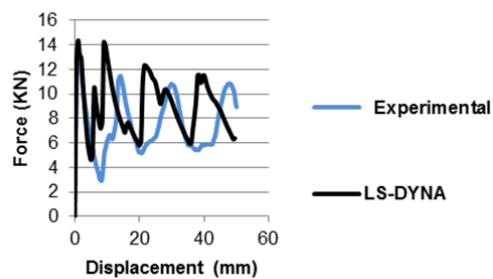


(ه) مقطع مربعی توخالی

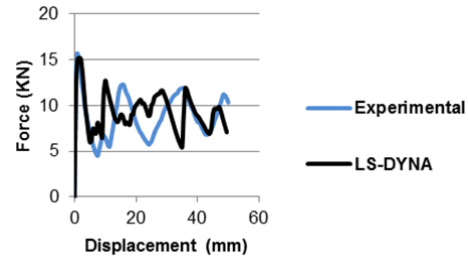
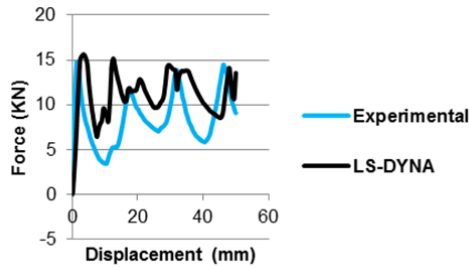
شکل ۱۳- چگونگی تغییر شکل نمونه‌های بررسی شده، راست: شبیه‌سازی، چپ: آزمایش



شکل ۱۵- نمودار نیرو-جابجایی مقاطع دایره‌ای پر شده با فوم

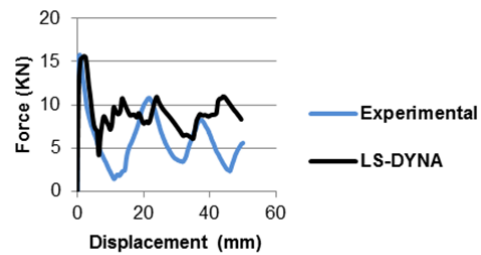
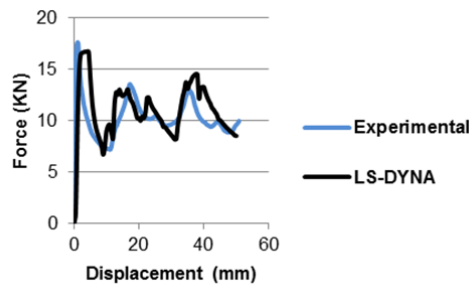


شکل ۱۴- نمودار نیرو-جابجایی مقاطع دایره‌ای بدون فوم



شکل ۱۶- نمودار نیرو-جابجایی مقاطع شش‌ضلعی بدون فوم

شکل ۱۷- نمودار نیرو-جابجایی مقاطع شش‌ضلعی پر شده با فوم



شکل ۱۸- نمودار نیرو-جابجایی مقاطع مربعی بدون فوم

شکل ۱۹- نمودار نیرو-جابجایی مقاطع مربعی پر شده با فوم

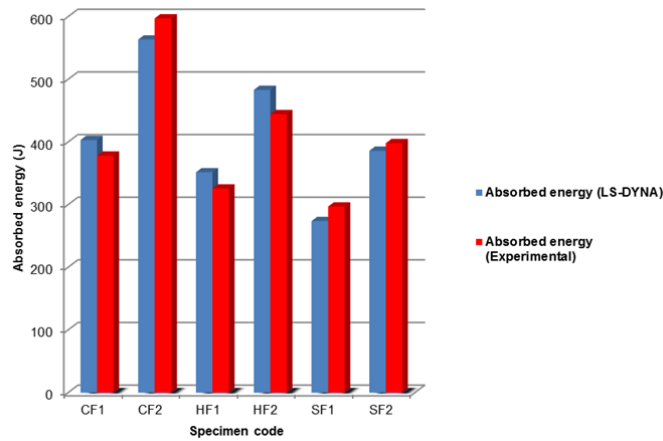
۴-۱- جذب انرژی

ظرفیت جذب انرژی مقاطع مختلف (تجربی و شبیه‌سازی) در شکل ۲۰ با هم مقایسه شده‌اند. بر اساس این شکل، کمترین و بیشترین میزان انرژی جذب شده به ترتیب، به مقطع مربعی بدون فوم و مقطع دایره‌ای پر شده با فوم تعلق دارند. این نتیجه را می‌توان با توجه به تعداد وجوه هر لوله توضیح داد. جدول ۳ نشان می‌دهد که تعداد چین‌خوردگی‌ها برای مقاطع دایره، شش‌ضلعی و مربع به ترتیب، برابر ۴، ۳ و ۲ می‌باشد. به عبارت دیگر، هر چه تعداد وجوه افزایش یافته است تعداد چین‌خوردگی‌ها هم زیاد شده است. از سوی دیگر، اتلاف انرژی با تعداد چین‌خوردگی‌ها و یا تعداد لولاهای خمیری متناسب است. بنابراین، مقطعی که تعداد وجوه بیشتری داشته باشد انرژی بیشتری جذب می‌کند. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که در حالت کلی، تعداد چین‌خوردگی‌های مقاطع بدون فوم همانند مقاطع پر شده با فوم است.

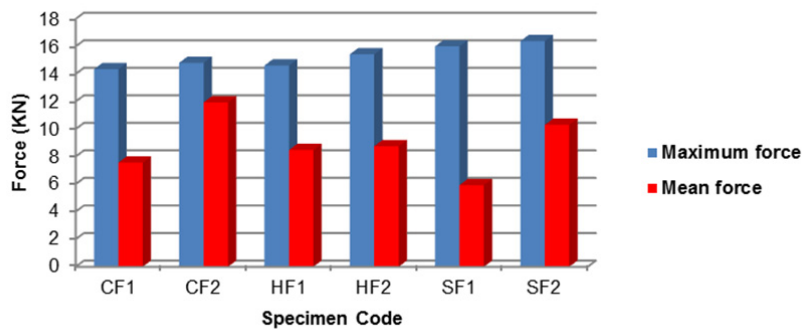
۴-۲- نیروهای پیشینه و متوسط لهیدگی

نیروی پیشینه که اولین قله نیرو در نمودار نیرو-جابجایی است، عاملی خطرناک در تصادفات بوده و تلاش می‌شود که مقدار آن کاهش یابد. مقادیر نیروی پیشینه برای همه نمونه‌های مورد بررسی در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ با هم مقایسه شده‌اند. بیشترین مقدار نیروی پیشینه به مقطع مربعی تعلق دارد. از سوی دیگر، کمترین مقدار نیروی متوسط هم به همین نمونه مربوط می‌شود. نیروی متوسط لهیدگی به صورت نسبت انرژی جذب شده بر مقدار جابجایی تعریف می‌شود؛ از آنجا که مقدار جابجایی همه نمونه‌ها با هم برابر است، و نمونه مربعی دارای کمترین مقدار جذب انرژی است. بنابراین، همین نمونه کمترین میزان نیروی متوسط را در بین نمونه‌های مطالعه شده داراست.

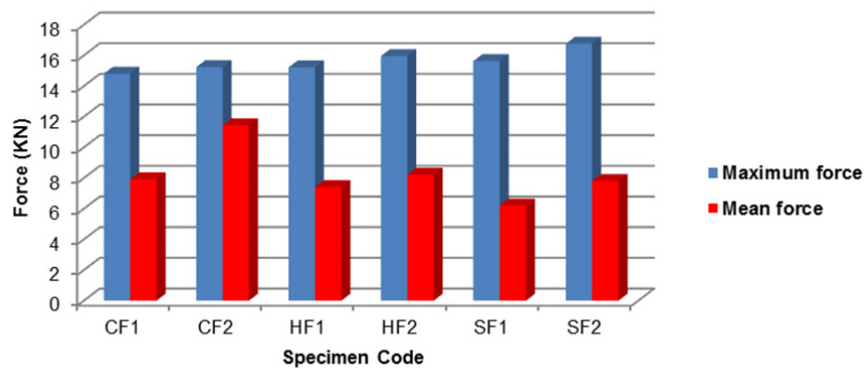
یکنواختی منحنی نیرو-جابجایی و به بیان دیگر، کاهش اختلاف بین نیروی پیشینه و متوسط یک خاصیت



شکل ۲۰- مقایسه ظرفیت جذب انرژی نمونه‌های مختلف



شکل ۲۱- مقایسه نیروهای بیشینه و متوسط لهدگی برای نمونه‌های مورد بررسی (آزمایش)



شکل ۲۲- مقایسه نیروهای بیشینه و متوسط لهدگی برای نمونه‌های مورد بررسی (شبیه‌سازی)

جدول ۵- مقایسه نیروی متوسط لهیدگی و جذب انرژی لوله پر شده از فوم با تک تک اجزاء آن

درصد اختلاف	لوله پر شده از فوم	فوم تنها + لوله تنها	فوم تنها	لوله تنها		
۱۹	۱۱۴۲۶/۴	۹۳۶۱/۵	۱۴۵۵/۱	۷۹۰۶/۴	(N)	نیروی متوسط
۵	۵۴۴/۷	۵۱۹/۶	۷۲/۷	۴۴۶/۹	(J)	انرژی جذب شده
-۳	۸۲۰۶/۴	۸۵۱۰/۳	۱۱۰۵/۷	۷۴۰۴/۶	(N)	نیروی متوسط
۵	۵۵۰/۳	۵۲۶/۶	۶۵/۲	۴۶۱/۴	(J)	انرژی جذب شده
۸	۷۸۰۴/۲	۷۲۴۷/۵	۱۰۴۳/۳	۶۲۰۴/۲	(N)	نیروی متوسط
۵	۴۴۰/۶	۴۲۲/۴	۵۷/۱	۳۶۵/۲	(J)	انرژی جذب شده

سه بعدی قرار گرفته است و در نتیجه برای تغییر شکل آن انرژی بیشتری لازم است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، لوله‌های ساخته شده از آلومینیوم ۱۲۰۰ با مقاطع دایره، مربع و شش ضلعی در دو حالت توخالی و پر شده با فوم تحت بارگذاری فشاری محوری قرار گرفته و ویژگی‌های جذب انرژی آن‌ها مقایسه شدند. علاوه بر آزمایش‌ها، این فرایند به روش شبیه‌سازی نیز بررسی شد. نتایج پژوهش نشان داد که بیشترین و کمترین مقادیر جذب انرژی به ترتیب، مربوط به مقاطع دایره و مربع هستند. از نظر نیروی متوسط لهیدگی هم همین ترتیب مشاهده شد. سازه‌های پر شده با فوم نسبت به لوله‌های توخالی جاذب‌های کاراتری هستند و اندرکنش بین لوله و فوم منجر به افزایش جذب انرژی آن‌ها نسبت به مجموع جذب انرژی لوله تنها و فوم تنها از ۵٪ تا ۱۴٪ می‌شود. پر کننده فوم بر تعداد چین-خوردگی‌ها اثری ندارد. نهایتاً، نیروی متوسط و میزان جذب انرژی مجموع لوله تنها و فوم تنها کمتر از حالت لوله پر شده از فوم است.

مراجع

- [۱] شاکری م، درویره ا (۱۳۷۹) مکانیک ضربه. انتشارات دانشگاه گیلان.
- [2] Lee S, Park C, Ramesh NS (2007) Polymeric foams; science and technology. Taylor & Francis.
- [3] Ashby MF, Evans AG, Fleck NA, Gibson LJ, Hutchinson JW, Wadley HNG (2000) Metal foams: a design guide. Butterworth & Heinemann.
- [4] Ashida K (2007) Polyurethane and related foams. Taylor & Francis.
- [۵] دیواندری م، وحیدگلپایگانی ع، شاهوردی ح (۱۳۸۵) فوم-های فلزی. انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

مطلوب در جاذب‌های انرژی است. روش‌های متعددی از قبیل پر کردن با فوم، مخروطی کردن و شیار زدن برای تامین این ویژگی پیشنهاد شده‌اند. مقدار تفاوت این دو نیرو برای همه نمونه‌ها در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ مقایسه شده‌اند. به دلیل بزرگ‌تر بودن نیروی متوسط نمونه دایره‌ای، بویژه در حالت پر شده با فوم، کمترین اختلاف بین نیروهای بیشینه و متوسط متعلق به نمونه دایره‌ای پر شده با فوم است.

۴-۳- تاثیر اندرکنش فوم و لوله

به منظور مطالعه اثر متقابل لوله و فوم بر قابلیت جذب انرژی، لوله بدون فوم، فوم تنها با همان مقطع لوله و نیز لوله پر شده با فوم تحت بارگذاری فشاری قرار داده شدند. سپس، نیروی متوسط و میزان جذب انرژی لوله پر شده با فوم با مجموع هر یک از این دو کمیت برای لوله بدون فوم و فوم تنها مقایسه شدند. نتایج این مقایسه برای همه نمونه‌ها در جدول (۵) ارائه شده‌اند که نشان می‌دهد همیشه میزان جذب انرژی لوله پر شده با فوم از مجموع مقادیر این کمیت برای دو حالت لوله بدون فوم و فوم تنها بیشتر است. هرچند، اثر اندرکنش برای مقاطع مختلف با هم متفاوت است؛ بزرگ‌ترین و کمترین اثر به ترتیب، مربوط به مقاطع دایره و مربع هستند. در مورد نیروی متوسط لهیدگی نیز وضعیت مشابهی وجود دارد. بیشتر بودن مقادیر جذب انرژی و نیروی متوسط سیستم‌های پر شده با فوم در مقایسه با نمونه‌های توخالی به اندرکنش بین لوله و فوم نسبت داده می‌شود. در حقیقت، وقتی لوله با فوم پر می‌شود نیروی لازم برای تغییر شکل آن از نیروی لازم برای تغییر شکل لوله توخالی بیشتر است، زیرا دیواره‌های لوله پر شده با فوم به راحتی لوله توخالی نمی‌توانند حرکت کرده و تغییر شکل دهند؛ به عبارت دیگر، لوله پر شده با فوم و بویژه فوم آن مانند سازه‌های رفتار می‌کند که تحت بارگذاری

- [12] Marzbanrad J, Mehdikhanlo M, Saeedipour A (2009) An energy absorption comparison of square, circular, and elliptic steel and aluminum tubes under impact loading. *Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences* 33: 159–166.
- [13] Salehghaffari S, Tajdari M, Panahi M, Mokhtarnezhad F (2010) Attempts to improve energy absorption characteristics of circular metal tubes subjected to axial loading. *Thin-Walled Structures* 48: 379–390.
- [14] Guillowa SR, Lua G, Grzebieta RH (2001) Quasi-static axial compression of thin-walled circular aluminium tubes. *International Journal of Mechanical Sciences* 43: 2103–2123.
- [15] Alavi Nia A, Haddad Hamedani J (2010) Comparative analysis of energy absorption and deformations of thin walled tubes with various section geometries. *Thin-Walled Struct* 48: 946–954.
- [16] Alavi Nia A, Badnava H, Fallah Nejad Kh (2011) An experimental investigation on crack effect on the mechanical behavior and energy absorption of thin-walled tubes. *Materials and Design* 32: 3594–3607.
- [17] Alavi Nia A, Fallah Nejad Kh, Badnava H, Farhoudi HR (2012) Effects of buckling initiators on mechanical behavior of thin-walled square tubes subjected to oblique loading. *Thin-Walled Struct* 59: 87–96.
- [6] Aktay L, Toksoy AK, Guden M (2006) Quasi-static axial crushing of extruded polystyrene foam-filled thin-walled aluminum tubes: Experimental and numerical analysis. *Materials and Design* 27: 556–565.
- [۷] میرمحمدصادقی س ا، حسینی‌پور س ج، بخشی م، گرچی ع ا (۱۳۸۷) مقایسه لهیدگی محوری لوله‌های جدارنازک شیاردار به کمک آزمایشات تجربی و شبیه‌سازی اجزاء محدود. چهارمین کنفرانس شکل‌دهی فلزات و مواد ایران، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳ و ۱۴ آذرماه ۱۳۸۷.
- [۸] محمدی‌پور ر، واحدی خ، امام س م ر (۱۳۸۹) مطالعه پارامتریک مقاطع جدارنازک مربعی در جذب انرژی ناشی از بارگذاری مایل. *مجله علمی - پژوهشی مهندسی مکانیک* مجلسی (۳): ۳۵–۴۶.
- [9] Hanssen AG, Langseth M, Hopperstad OS (2000) Static and dynamic crushing of circular aluminium extrusions with aluminium foam filler. *International Journal of Impact Engineering* 24: 475–507.
- [10] Chun-ji Z, Yi F, Xue-bin Z (2010) Mechanical properties and energy absorption properties of aluminum foam-filled square tubes. *Trans Nonferrous Met Soc China* 20: 1380–1386.
- [11] Hou Sh, Li Q, Long Sh, Yang X, Li W (2009) Crashworthiness design for foam filled thin-wall structures. *Materials and Design* 30: 2024–2032.