

بررسی تجربی و عددی رفتار مکانیکی سازه‌های ساندویچی استوانه‌ای پر شده با فوم EVA تحت بارگذاری محوری شبه‌استاتیکی و ضربه‌ای

علی علوی‌نیا*

رضا رحمانی

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران

دانشجوی کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران

چکیده

در بسیاری از سازه‌های مهندسی و به خصوص دستگاه‌های متحرک، برای جلوگیری از خسارت ناشی از ضربه یا کاهش آن از سیستم‌های جذب انرژی استفاده می‌شود. هدف از پژوهش حاضر، بررسی تغییر شکل و جذب انرژی سازه‌های ساندویچی متشکل از دو لوله آلومینیومی متداخل که بین آن‌ها از فوم پلیمری EVA پر شده‌است، می‌باشد. بارگذاری محوری لوله‌ها به صورت شبه‌استاتیکی و دینامیکی بوده و رفتار مکانیکی این سازه‌ها، شامل نحوه تغییر شکل، میزان جذب انرژی و نیروی متوسط لهیدگی بررسی شده‌است. همچنین، اثر تغییرات طول لوله و چگالی فوم بر کمیت‌های ذکر شده مورد مطالعه قرار گرفته‌است. علاوه بر آزمایش‌های تجربی، به منظور بررسی پارامتری، شبیه‌سازی عددی نیز با استفاده از نرم‌افزار LS-Dyna انجام گرفته‌است. نتایج پژوهش نشان می‌دهند که وجود فوم باعث افزایش میزان جذب انرژی در سازه‌ها می‌شود؛ این افزایش در میزان جذب انرژی و نیروی متوسط لهیدگی در چگالی‌های بالاتر فوم، نمایان‌تر است. به علاوه، مقایسه نحوه چین‌خوردگی در سازه‌های پر شده از فوم با سازه‌های خالی نشان می‌دهد که وجود فوم تأثیری در نحوه چین‌خوردگی سازه‌ها ندارد. **واژه‌های کلیدی:** سازه‌های ساندویچی، جذب انرژی، نیروی لهیدگی، فوم، LS-Dyna.

Experimental and Numerical Investigations of Mechanical Behavior of EVA Foam-filled Cylindrical Sandwich Structures Subjected to Axial Quasi-static and Impact Loading

A. Alavi Nia
R. Rahmani

Department of Mechanical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
Department of Mechanical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

Abstract

Energy absorbing systems are used in many engineering structures, especially in moving machines, to prevent or to reduce impact induced damages. The aim of this study is to survey deformation and energy absorption of sandwich structures consisted of two concentric aluminum tubes with EVA polymer foam between them. Two loading methods have been used; quasi-static loading and impact loading. Deformation mode, energy absorption and mean crush force were investigated as mechanical behavior parameters. Moreover, the effects of changes in tubes length and foam density on these parameters have been studied. For parametric study, finite element simulations carried out using LS-Dyna software. Results of the study show that using foam increases energy absorption; the higher the foam density the greater the energy absorption and mean crush force. Furthermore, comparison of folding mechanism between foam-filled structures and empty ones shows that using foam does not affect the folding mode.

Keywords: Sandwich Structures, Energy Absorption, Crushing Force, Foam, LS-Dyna.

۱- مقدمه

سازه ساندویچی شامل دو ورق خارجی با استحکام بالا است که به یک هسته با چگالی پایین چسبانده شده‌است. این سازه‌ها به دلیل خواص مکانیکی و بالستیکی ویژه نسبت به وزن، کاربردهای گسترده‌ای در صنایع خودروسازی، هوافضا و نظامی دارند. این نوع سازه‌ها توانایی خوبی در تحمل هر دو نوع بارهای درون صفحه‌ای و برون صفحه‌ای دارند. در بسیاری از سیستم‌های مهندسی، به خصوص در دستگاه‌های متحرک برای جلوگیری از خسارت ناشی از ضربه یا کاهش آن از سیستم‌های جذب انرژی استفاده می‌کنند. سازه‌های جدار نازک دارای خاصیت استحکام به وزن بالایی هستند و قابلیت جذب انرژی بالایی دارند. ضربه‌گیرها و جاذب‌های انرژی از جمله اجزایی هستند که در برخی سامانه‌ها برای جذب انرژی جنبشی و تبدیل آن به صورت‌های دیگر انرژی استفاده می‌شوند. مرسوم‌ترین نوع ضربه‌گیرها، پوسته‌های جدار نازک استوانه‌ای هستند که با فروریزش در اثر بار محوری انرژی را مستهلک می‌کنند. اکثر جاذب‌های انرژی یک بار مصرف هستند. بنابراین، هدف طراحی چنین جاذب‌هایی معمولاً دستیابی به جذب انرژی بالا با جرم کمتر و با تکیه بر جذب انرژی مخصوص بالا می‌باشد.

فرآیند لهیدگی محوری معمولاً شامل سه مرحله می‌باشد. اول، نیروی لهیدگی به بیشینه اولیه می‌رسد تا بر مقاومت اولیه جاذب غلبه کند. دوم، با پیشرفت لهیدگی، نیرو کاهش و نوسان پیدا می‌کند. سوم، نیرو به سرعت افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده پایان تقریبی تغییر شکل و افزایش صلیب سازه است [۱].

کمانش یک پوسته استوانه‌ای مدور تحت بار محوری یکی از مسائل کلاسیک مهم در مکانیک جامدات است. بردی و همکاران با قرار دادن نمونه اکستروژنه بر دستگاه کشش-فشار و گیردار کردن دو سر لوله‌ها سعی در چین‌دار کردن فروریزش لوله نمودند و نتایج به دست آمده تجربی را با نتایج نظریه الکساندر، ویرزبکی و سینگاس که شامل محاسبه نیروی متوسط فروریزش شبه استاتیکی می‌شود، مقایسه کردند [۲]. الغلیب و لیام، از روش تحلیل اجزای محدود غیرخطی برای شبیه‌سازی شرایط آزمایش شبه‌استاتیکی و دینامیکی استفاده کردند. نیروی فروریزش و نحوه فروریزش در شبیه‌سازی تطابق خوبی با نتایج تجربی داشت. در این مطالعه، عوامل مؤثر بر فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای نظیر سرعت برخورد و تأثیر عیوب اولیه بررسی شد [۳]. آکتای و همکاران به بررسی تجربی و عددی فروریزش محوری شبه

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: alavi1338@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۰/۰۳

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۱/۱۹

استاتیکی لوله‌های آلومینیومی جدارنازک استوانه‌ای تقویت شده با فوم پلی‌استایرن پرداختند. در این تحقیق، تحلیل عددی فروریزش لوله‌های توخالی و تقویت شده با فوم انجام شد. نتایج نشان داد که انرژی جذب شده لوله‌های تقویت شده با فوم بیشتر از مجموع جذب انرژی‌های لوله‌ی توخالی و فوم پر شده در آن است [۴]. هوو و همکاران با بررسی مقاطع جدار نازک با ضخامت‌های مختلف و چگالی‌های متفاوت فوم نشان دادند که افزایش ضخامت تأثیر قابل توجهی در جذب انرژی خواهد داشت [۵].

علوی‌نیا و همدانی، پس از مطالعه ظرفیت جذب انرژی جاذب‌های انرژی با سطح مقطع‌های مختلف به این نتیجه رسیدند که جاذب‌هایی با سطح مقطع دایره‌ای دارای بیشترین ظرفیت جذب انرژی هستند [۶]. علوی‌نیا و صادقی تأثیر فوم پرکننده در رفتار پلاستیک و خواص مکانیکی پنج مدل لانه زنبوری آلومینیومی را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که نیروی میانگین لهیدگی و ظرفیت جذب انرژی لانه زنبوری‌ها تا ۳۰۰٪ افزایش پیدا کرده است [۷]. نیک-نژاد و همکاران رابطه نظری جدیدی برای پیش‌بینی بهتر نیروی لحظه-ای چین‌خوردگی در ستون‌های چهارگوش پر شده از فوم پلی‌یورتان ارائه دادند. برای این منظور با توجه به پیروی نکردن رفتار چین‌خوردگی ستون‌های پر شده از فوم از اصل جمع آثار، علاوه بر در نظر گرفتن انرژی‌های تلف شده در خمش و انبساط ستون و تغییر حجم فوم، اثر متقابل بین فوم پلی‌یورتان و جداره داخلی ستون را نیز در نظر گرفتند، که این اثر متقابل ضریبی از انرژی جذب شده توسط فوم پلی‌یورتان است [۸].

در بارگذاری ضربه‌ای، تغییر جرم ضربه‌زننده فقط بر روی نیروی ضربه‌ای و نوع تغییر شکل سازه و میزان لهیدگی اثر می‌گذارد و تأثیر قابل توجهی بر روی بهره‌وری جذب انرژی ندارد. تغییر سرعت جسم ضربه‌زننده به طور مستقیم موجب تغییر در نیروی ضربه و باعث تغییرات در نیروی بیشینه اولیه و نیروی میانگین می‌شود. در آزمایش‌های ضربه‌ای و آنالیز عددی، بر روی مکانیزم شکست و ظرفیت تحمل بار متمرکز می‌شود [۹]. بارگذاری ضربه‌ای در سرعت متوسط به وسیله دستگاه وزنه افتان صورت می‌گیرد. با توجه به مشخصه بارگذاری ضربه‌ای، پاسخ دینامیکی سازه تحت بار ضربه‌ای به طور آشکار نسبت به بارگذاری شبه-استاتیکی متفاوت است [۱۰]. زمانی و مولوی سلول‌های استوانه‌ای و مربعی را به صورت منفرد و دوتایی تحت آزمایش تجربی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که در سلول‌های دوتایی قابلیت جذب انرژی تا ۳۰ درصد و مقدار انرژی جذب شده به حجم اشغال شده تا ۹۶ درصد افزایش می‌یابد [۱۱]. کاتیرسان و مانیسکار فروپاشی مخروط‌های ناقص ساخته شده از کامپوزیت‌های با هسته‌ی آلومینیومی تحت بار ضربه‌ای با سرعت کم را به دو صورت تجربی و عددی بررسی نمودند [۱۲]. یوانگ ژانگ و هوئی ژانگ نیز فرآیند فروپاشی جاذب‌های مخروطی ناقص با ضخامت متغیر را تحت بارگذاری مایل و ضربه‌ای بررسی کردند. پژوهش آن‌ها به دو صورت تجربی و عددی و با استفاده از نرم‌افزار LS-Dyna انجام شد [۱۳]. پاتیل و همکارانش [۱۴] رفتار پانل‌های ساندویچی با هسته‌های ساخته

شده از سلول‌های لانه زنبوری و پوسته‌های آلومینیومی که در سیرهای خودرو استفاده می‌شود را به صورت شبیه‌سازی و تجربی بررسی کردند. در مرجع [۱۵] نوع جدیدی از جاذب‌های انرژی معرفی شده است که انرژی را از طریق انبساط و چین‌خوردگی جذب می‌کند و می‌تواند جایگزین مناسبی برای جاذب‌های معمولی باشد. در این مرجع نشان داده شده است که مقاطع دایره‌ای بیشترین جذب انرژی را دارند.

دوارت و همکاران [۱۶] پس از افزودن نوعی فوم جدید الومینیوم-پلیمری به عنوان پرکننده لوله‌های جدار نازک الومینیومی با مقطع مربع، رفتار این سازه را در برابر بارهای فشاری شبه‌استاتیکی و دینامیکی بررسی کردند. آن‌ها رفتار جذب انرژی و مدهای واماندگی این سازه را با سازه‌های توخالی آلومینیومی و نیز با سازه‌های الومینیومی پر شده با فوم الومینیومی معمولی مقایسه نمودند و نتیجه گرفتند که خواص سازه جدید نسبت به قبلی‌ها بهبود یافته است. سو و همکاران [۱۷] رفتار پوسته‌های ساندویچی استوانه‌ای بسیار سبک و جدار و پر شده با فوم را تحت بار فشار محوری با روش‌های نظری، تجربی و شبیه‌سازی بررسی کردند. آن‌ها این بررسی را به منظور کشف عوامل هندسی اصلی موثر بر نیروی شکست و جذب انرژی انجام دادند. جعفریان و رضوانی [۱۸] رفتار لهیدگی مخروط‌های جدار نازک چند جزئی را در دو حالت با انتهای باز و انتهای بسته مقایسه کردند. این لوله‌ها، با طول، ضخامت و خواص متفاوت برای هر قطعه ساخته شدند تا نیروی لهیدگی اولیه کاهش و جذب انرژی مخصوص افزایش یابد. این تحقیق نشان داد که استفاده از چنین ساختاری به عنوان جاذب انرژی در خودرو می‌تواند موجب کاهش خسارات وارد بر خودرو و سرنشینان شود. ژانگ و همکاران [۱۹]، رفتار هانی‌کام الومینیومی پر شده با فوم پلی‌پروپیلن را تحت بار ضربه‌ای مطالعه نمودند. آن‌ها نتیجه گرفتند که استحکام اولیه و نیز استحکام متوسط لهیدگی سازه به دلیل اندرکنش دیواره سلول‌ها و فوم به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد اما جذب انرژی مخصوص کاهش می‌یابد. همچنین مشخص شد که در مقایسه با بارگذاری شبه‌استاتیکی، استحکام اولیه افزایش ولی استحکام متوسط و جذب انرژی مخصوص کاهش می‌یابد. لیو و همکاران [۲۰] تأثیر نسبت پواسان فوم را بر ضربه‌پذیری استوانه‌های جدار نازک پر شده با فوم مقایسه کردند. آن‌ها با مدل‌سازی رفتار فوم‌های با نسبت پواسان مثبت و منفی، نوعی مدل فوم ترکیبی معرفی و رفتار سازه‌های ساندویچی پر شده با سه نوع فوم متفاوت (با نسبت پواسان مثبت، منفی و ترکیبی) را در برابر بارگذاری ضربه محوری بررسی نموده و نشان دادند که سازه پر شده با فوم ترکیبی دارای جذب انرژی مخصوص بالاتری نسبت به دو نوع فوم دیگر است. دوارت و همکاران [۲۱] رفتار لهیدگی لوله‌های آلومینیومی با جداره بسیار نازک پر شده با فوم را در بارگذاری محوری به صورت تجربی بررسی کردند و نشان دادند که این سازه‌ها نسبت به لوله‌های جدار نازک تو خالی دارای قابلیت جذب انرژی بسیار بهتری هستند.

درباره رفتار مکانیکی لوله‌های جدارنازک کارهای بسیار زیادی در داخل و خارج انجام شده است، اما در باره فروریزش لوله‌های آلومینیومی تودرتی تقویت شده با فوم EVA قبلاً کاری انجام نگرفته است. در این مقاله، جذب انرژی و شیوه فروریزش سازه‌های جدارنازک ساندویچی توخالی و پر شده با فوم EVA با شرایط مرزی یکسرگیردار تحت بارگذاری محوری شبه‌استاتیکی و ضربه‌ای (به دو روش تجربی و شبیه-

سازی) بررسی شده است.

۲- مبانی و روش ها

۲-۱- روش تحقیق

در این پژوهش، به بررسی تجربی و شبیه سازی بارگذاری شبه-استاتیکی و ضربه محوری جاذب های انرژی استوانه ای ساندویچی پرداخته شده است. آزمایش ها برای دو حالت مختلف از ضخامت لوله بیرونی انجام گرفته است. در ابتدا یک سیستم دو لوله ای متداخل بررسی شده که مابین آن ها خالی است و سپس به لوله هایی پرداخته شده است که بین آن ها با فوم EVA پر شده است. شرایط بارگذاری در حالت یک سر گیردار انجام گرفته است. به منظور انجام آزمایش شبه-استاتیکی از دستگاه سنتم و برای آزمایش دینامیکی از دستگاه سقوط وزنه استفاده شده است.

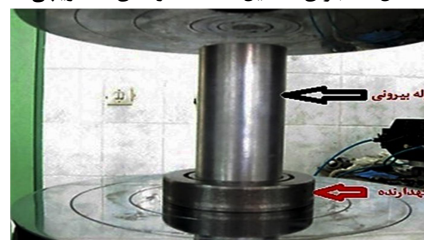
۲-۲- آماده سازی سازه های جاذب انرژی

لوله های آلومینیومی با سه قطر خارجی ۲۲، ۴۰ و ۵۰ میلی متر که به ترتیب، دارای ضخامت ۱/۵، ۲ و ۱/۵ میلی متر هستند، در سه ارتفاع ۸۳، ۵۱ و ۱۱۰ میلی متر به وسیله دستگاه برش بریده شده اند. فوم های پلیمری اتیلن وینیل استات به صورت استوانه های جدار ضخیم در دو قطر خارجی ۳۶ و ۴۷ میلی متر و قطر داخلی ۲۲ میلی متر از ورق های این ماده به وسیله مته های مخصوص به دقت بریده شده اند. سپس فوم های بریده شده بدون فشار در لوله ها جا زده شده اند (شکل ۱).

برای ثابت نگه داشتن لوله ها در موقعیت مورد نظر از یک قطعه مدور فولادی استفاده شده که بر روی آن سه شیار به عرضی برابر با ضخامت های لوله ها و عمق ۱ الی ۲ میلی متر ایجاد گردیده است (شکل ۲).



شکل ۱- اجزای تشکیل دهنده سازه های ساندویچی



شکل ۲- نمایی از لوله و قطعه نگه دارنده

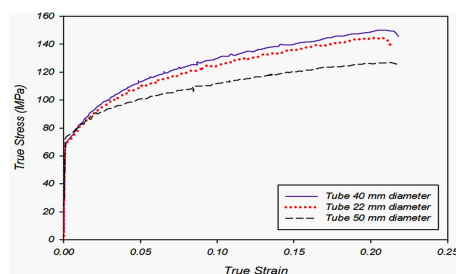
۲-۳- آزمایش های تجربی

مشخص کردن خواص نمونه های آزمایشی از قبیل تنش تسلیم، تنش نهایی و ضریب الاستیسته ضروری می نماید. به این منظور در ابتدای کار آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM E 8M بر روی لوله های آلومینیومی انجام گرفت (شکل ۳). برای به دست آوردن خواص مکانیکی فوم، از آزمایش فشار مطابق با استاندارد ISO3386-1 استفاده شد.

آزمایش های شبه استاتیکی این پژوهش با دستگاه سنتم STM 150 واقع در آزمایشگاه خواص مکانیکی دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی سینا انجام و نمودار نیرو-جابجایی استخراج شد. پس از انجام آزمایش ها نمودار تنش-کرنش حقیقی برای هر یک از نمونه ها تهیه گردید که این نمودارها در شکل های ۴ و ۵ نشان داده شده اند. برای آزمایش های دینامیکی از دستگاه سقوط وزنه استفاده شد. مشخصات دستگاه های آزمایش در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

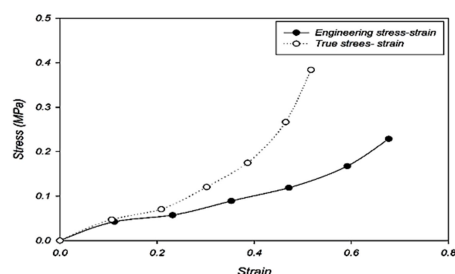


شکل ۳- نحوه انجام آزمون کشش



شکل ۴- نمودار تنش-کرنش حقیقی ماده لوله های آلومینیومی

به منظور بررسی تاثیر ضخامت، قطر لوله ها، ارتفاع و فوم بر نیروی لهیدگی و میزان جذب انرژی، در مجموع تعداد ۸۱ نمونه تهیه شد (برای هر حالت حداقل ۲ نمونه) که در جدول ۳ مشخصات و ابعاد نمونه های ساخته شده برای آزمایش های شبه استاتیکی نشان داده شده است.



شکل ۵- نمودار تنش-کرنش حقیقی و مهندسی فوم EVA

جدول ۱- مشخصات دستگاه سننام

نام دستگاه	سننام STM 150
قابلیت دستگاه	بارگذاری کششی، فشاری خمشی
ظرفیت	۱۵ تن
سرعت بارگذاری	از ۰/۵ تا ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه
طول کورس	۵۰۰ میلی‌متر

جدول ۲- مشخصات دستگاه سقوط وزنه

نام دستگاه	سقوط وزنه
قابلیت دستگاه	اعمال بار ضربه‌ای با سرعت کم
ظرفیت	حمل وزنه با جرم ۲۴ تا ۷۰ کیلوگرم
سرعت بارگذاری	حداکثر سرعت بارگذاری ۹/۵ متر بر ثانیه
حداکثر ارتفاع	۴/۵ متر

جهت مشخص نمودن و سهولت شناسایی هر قطعه، به هر کدام از نمونه‌های تحت آزمایش، کدی مرکب از شش رقم و حرف به شرح ذیل اختصاص داده شد:

علامت اول از سمت چپ (O) مشخص کننده خصوصیات لوله خارجی می‌باشد که نویسه ۱ مربوط به لوله با قطر خارجی ۴۰ mm و نویسه ۲ برای لوله با قطر ۵۰ mm می‌باشد. علامت دوم از سمت چپ (I) مشخص کننده لوله داخلی سازه می‌باشد که داری قطر ثابت ۱۱ mm می‌باشد. علامت سوم که، مشخص کننده استفاده یا عدم استفاده از فوم در سازه می‌باشد، که نویسه صفر به معنای عدم کاربرد فوم و نویسه ۱ استفاده از فوم EVA می‌باشد. علامت چهارم کد مشخصه ارتفاع لوله‌ها می‌باشد که نویسه صفر ارتفاع ۸۳ mm، نویسه ۱ ارتفاع ۵۱ mm و نویسه ۲ ارتفاع ۱۱۰ mm را نشان می‌دهد. علامت آخر کد مشخص کننده نوع بارگذاری می‌باشد. نویسه صفر نشان دهنده بارگذاری شبه استاتیکی با دستگاه سننام می‌باشد و نویسه ۱ نشان دهنده بارگذاری ضربه‌ای با دستگاه سقوط وزنه می‌باشد. کدهای نمونه-های مورد استفاده در آزمایش‌ها در جداول ۳ و ۴ ارائه شده‌اند.

جدول ۳- مشخصات و ابعاد نمونه‌ها برای آزمایش‌های شبه استاتیکی

جرم کلی نمونه (gr)	ارتفاع (mm)	چگالی فوم (kg/m ³)	لوله بیرونی		کد نمونه‌ها
			ضخامت (mm)	قطر خارجی (mm)	
۷۱/۱۶	۸۳	-	۲	۴۰	$O_1IF_0L_00$
۷۶/۷۲	۸۳	۱۳۲	۲	۴۰	$O_1IF_1L_00$
۵۰/۸۶	۲۵	۱۳۲	۲	۴۰	$O_1IF_1L_10$
۹۹/۲۹	۱۱۱	۱۳۲	۲	۴۰	$O_1IF_1L_20$
۷۲/۸۸	۸۳	-	۱/۵	۵۰	$O_2IF_0L_00$
۸۰/۷۸	۸۳	۱۳۲	۱/۵	۵۰	$O_2IF_1L_00$
۵۲/۲۴	۵۲	۱۳۲	۱/۵	۵۰	$O_2IF_1L_10$
۱۰۰/۹	۱۱۱	۱۳۲	۱/۵	۵۰	$O_2IF_1L_20$

جدول ۴- مشخصات و ابعاد نمونه‌ها برای آزمایش‌های ضربه‌ای

جرم کلی نمونه (gr)	ارتفاع (mm)	چگالی فوم (kg/m ³)	لوله بیرونی		کد نمونه‌ها
			ضخامت (mm)	قطر خارجی (mm)	
۷۲/۱۹	۸۳	-	۲	۴۰	$O_1IF_0L_01$
۷۶/۱۲	۸۳	۱۳۲	۲	۴۰	$O_1IF_1L_01$
۵۱/۱۶	۵۲	۱۳۲	۲	۴۰	$O_1IF_1L_11$
۱۰۱/۱	۱۱۱	۱۳۲	۲	۴۰	$O_1IF_1L_21$
۷۲/۱۶	۸۳	-	۱/۵	۵۰	$O_2IF_0L_01$
۸۳/۹۴	۸۳	۱۳۲	۱/۵	۵۰	$O_2IF_1L_01$
۵۵/۰۷	۵۲	۱۳۲	۱/۵	۵۰	$O_2IF_1L_11$
۱۰۸/۶	۱۱۱	۱۳۲	۱/۵	۵۰	$O_2IF_1L_21$

۴-۲- بارگذاری شبه استاتیکی نمونه‌های توخالی

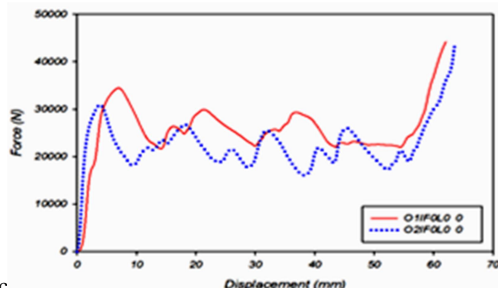
بارگذاری شبه استاتیکی با سرعت ۱۵ mm/min اعمال شده‌است. دستگاه سننام دارای دو فک جهت نگه داشتن نمونه می‌باشد. حداکثر سرعت دستگاه برای فک متحرک ۳۰۰ mm/min و حداقل ۰/۵ mm/min می‌باشد. محل شروع چین‌خوردگی برای سازه با قطر لوله بیرونی ۴۰ mm از بالا (شکل ۶) و برای سازه با قطر لوله بیرونی ۵۰ mm از پایین (شکل ۷) سازه بوده است.



شکل ۶- نحوه چین‌خوردگی نمونه $O_1IF_0L_00$ (الف) نمای روبرو. (ب) نمای بالا



شکل ۷- نحوه چین‌خوردگی نمونه $O_2IF_0L_00$ (الف) نمای روبرو. (ب) نمای بالا.



شکل ۸- نمودار نیرو - جابجایی برای سازه‌های تو خالی با قطرهای خارجی ۴۰ و ۵۰ میلی‌متر

نمودار نیرو- جابجایی نمونه‌های یاد شده در شکل ۸ نشان داده شده‌است. در این شکل، سطح زیر نمودار نشان دهنده میزان جذب انرژی در هر سازه می‌باشد.



(ب)

(الف)



(د)

(ج)

شکل ۱۳- نحوه چین‌خوردگی سازه‌های جاذب انرژی تحت بارگذاری دینامیکی: (الف) سازه $O_1IF_0L_2$ قبل و بعد از برخورد وزنه. (ب) سازه $O_1IF_1L_2$ قبل و بعد از برخورد وزنه. (ج) سازه $O_1IF_1L_0$ قبل و بعد از برخورد وزنه. (د) سازه $O_2IF_0L_0$ قبل و بعد از برخورد وزنه.

برای محاسبه مقدار سرعت وزنه رها شده بر حسب ارتفاع رهاسازی از رابطه (۱) استفاده می‌شود [۲۲]:

$$V = 0.108 h^{0.53} \quad (1)$$

که در آن h ارتفاع ضربه‌زننده بر حسب میلی‌متر و V سرعت برخورد بر حسب متر بر ثانیه است. ارتفاع 330 cm ، ارتفاعی است که در آن ضعیف‌ترین سازه دچار لهیدگی کامل می‌شود. جرم جسم ضربه‌زننده $30/234$ کیلوگرم و سرعت آن بنا بر رابطه (۱) برابر $7/492$ متر بر ثانیه بود.

در مجموع ۷ آزمون دینامیکی مجزا بر روی نمونه‌ها انجام گرفت که تعدادی از آن‌ها در شکل ۱۳ مشاهده می‌شوند.

انرژی جذب شده توسط نمونه‌های آزمایشی در حین چین‌خوردگی با صرف‌نظر کردن از اصطکاک، برابر با سطح زیر نمودار منحنی نیرو-جابجایی می‌باشد. نمودار نیرو-جابجایی برای دو نمونه در شکل ۱۱ نشان داده شده‌است.

انرژی جذب شده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$E_{total} = m \left(\frac{1}{2} V^2 + gx \right) \quad (2)$$

که در آن V سرعت ضربه‌زننده در لحظه برخورد، m جرم آن و x میزان تغییر طول نمونه در راستای برخورد می‌باشد. با اندازه‌گیری طول نمونه بعد از لهیدگی و کم‌کردن آن از طول کلی لوله، طول لهیدگی نمونه به‌دست می‌آید. همچنین، نیروی متوسط لهیدگی از تقسیم انرژی جنبشی بر طول لهیدگی نمونه محاسبه می‌شود.

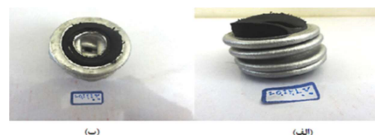
۲-۶- شبیه‌سازی

در این مقاله، رفتار سازه‌های ساندویچی تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی و ضربه‌ای، به‌وسیله نرم‌افزار LS-Dyna شبیه‌سازی شده‌است. تحلیل در این نرم‌افزار بر اساس روش اجزای محدود انجام می‌شود. همچنین امکان استفاده از تکنیک فرسایش المان^۱، برای تحلیل مسائلی که در

^۱ Erosion element

نمونه‌های پر شده با فوم

سازه‌هایی که بین لوله داخلی و بیرونی آن‌ها با فوم EVA پر شده‌است از یک انتها در صفحه شیاردار فولادی ثابت گردیده و سپس بین فک‌های دستگاه قرار داده شدند. محل شروع چین‌خوردگی برای سازه با قطر لوله بیرونی 40 mm از بالا (شکل ۹) و برای سازه با قطر لوله بیرونی 50 mm از پایین (شکل ۱۰) سازه بوده است.



(ب)

(الف)

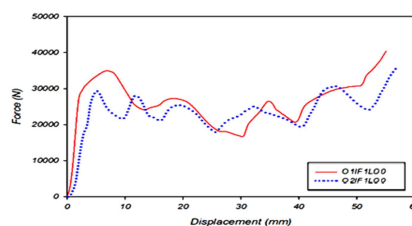
شکل ۹- نحوه چین‌خوردگی سازه $O_1IF_1L_0$ (الف) نمای روبرو. (ب) نمای بالا



(ب)

(الف)

شکل ۱۰- نحوه چین‌خوردگی سازه $O_2IF_1L_0$ (الف) نمای بالا. (ب) نمای روبرو



شکل ۱۱- نمودار نیرو - جابجایی برای سازه پر شده با فوم با قطر لوله خارجی 40 و 50 میلی‌متر

انرژی جذب شده توسط نمونه‌های آزمایشی در حین چین‌خوردگی با صرف‌نظر کردن از اصطکاک، برابر با سطح زیر نمودار منحنی نیرو-جابجایی می‌باشد. نمودار نیرو-جابجایی برای دو نمونه در شکل ۱۱ نشان داده شده‌است.

۲-۵- بارگذاری دینامیکی

برای آزمایش‌های دینامیکی از دستگاه سقوط وزنه (شکل ۱۲) استفاده شده‌است. دستگاه سقوط وزنه با رها کردن وزنه با جرم مشخص و از ارتفاع مورد نظر (توسط مکانیزم رها ساز) که در داخل میل‌های راهنما حرکت می‌کند، انرژی جنبشی مورد نیاز را تأمین و پس از برخورد وزنه با نمونه، تغییر شکل خمیری در آن به وجود می‌آورد.



(ب)



(الف)

شکل ۱۲- نمایی از دستگاه سقوط وزنه: (الف) نمای کلی دستگاه. (ب) نمای قطعه ضربه‌زننده.

جدول ۶- خصوصیات مادی لوله آلومینیومی

ρ	$2.7 \times 10^{-3} \text{ kg/mm}^3$
ν	0.3
E	70 GPa
مدل ماده	Piecewise linear plasticity

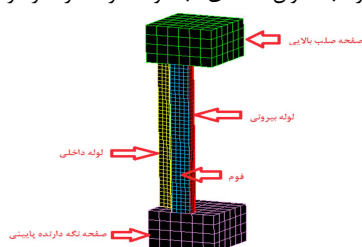
تعریف تماس^۳ میان اجزا

تماسی که میان تمام سطوح تعریف شده‌است از نوع تماس سه بعدی سطح با سطح^۴ و سطح تنها^۵ است که در پنجره مربوط به تماس‌ها تعریف شده‌است. ضرایب اصطکاک دینامیکی و استاتیکی میان لوله‌ها، فوم و دیواره صلب متحرک، به ترتیب ۰/۳ و ۰/۲ در نظر گرفته شده‌است. در مجموع ۸ تماس برای این سازه‌ها تعریف شده‌است.

شرایط مرزی و انتساب ویژگی‌های المان‌ها

انتهای زیرین لوله‌ها در پایه ثابت شده‌است و جابجایی در اثر بارگذاری به سر آزاد آن‌ها (انتهای بالایی) اعمال می‌شود. ویژگی المان لوله‌های استفاده شده از نوع Hughes-Liu و shell elements هستند و برای فوم از solid استفاده شده‌است.

در شکل ۱۴ نمونه‌ای از سازه مدل شده مشاهده می‌شود. دو صفحه در دو طرف سازه، به عنوان فک‌های ثابت و متحرک در نظر گرفته شده‌اند



شکل ۱۴- مدل اجزاء محدود سازه ساندویچی و فک‌های دستگاه

که باعث فشردگی سازه می‌شوند و می‌توان آنها را صلب در نظر گرفت. با این فرض تغییر شکل آن‌ها از حل مسئله حذف شده و زمان حل مسئله کوتاه‌تر می‌شود. فک پایینی ثابت و فک بالایی با سرعت ثابت ۱۵ mm/min به سمت پایین حرکت می‌کند.

المان بندی

از آنجا که جسم برخورد کننده و تکیه‌گاه صلب در نظر گرفته شده‌اند، بنابراین، در مش‌بندی آن‌ها تعداد المان‌ها تا حد امکان کم انتخاب شده‌است. برای تعیین تعداد المان‌های لوله‌ها و فوم از روش اعتبارسنجی مش‌ها استفاده شده‌است. بدین ترتیب که شبیه‌سازی چندین بار تکرار شده‌است و در هر بار تعداد المان‌های لوله‌ها نسبت به دفعه قبلی بیشتر در نظر گرفته شده و نتایج با هم مقایسه شده‌اند. این روند تا جایی ادامه داده شده‌است که تأثیر افزایش تعداد المان‌ها در نتایج بسیار ناچیز و قابل اغماض باشد. با ریز کردن اندازه المان‌ها تا ۱ میلی‌متر، تغییرات انرژی جذب شده نسبتاً قابل توجه است، اما وقتی اندازه المان از ۱ به ۰/۸ میلی‌متر کاهش می‌یابد مقدار جذب انرژی از

آن شبکه‌بندی دچار تغییر شکل‌های شدید می‌شود، وجود دارد. انتخاب صحیح مدل ماده و معادله حالت، همچنین اعمال صحیح شرایط فیزیکی مسئله، از قبیل شرایط مرزی و استفاده از سطوح تماس و المان‌های متناسب با نوع مسئله، امکان انجام شبیه‌سازی صحیح، به کمک این نرم‌افزار را فراهم می‌کند.

برای شبیه‌سازی ابتدا باید در یک نرم‌افزار مدل‌سازی، اجزای مسئله را مدل کرد. این نرم‌افزار می‌تواند FEMB27 باشد. در این نرم‌افزار ابتدا باید همه اجزای مسئله را که به نوعی در حل آن اثر دارند تحت عنوان پارت^۱ مدل کرد. یعنی باید به هر جزء مسئله یک پارت اختصاص داد. سازه مورد بررسی دارای پنج جزء متفاوت می‌باشد که عبارتند از: ۱- لوله داخلی، ۲- لوله بیرونی، ۳- فوم، ۴- فک متحرک بالایی و ۵- فک ثابت پایینی که نمایی از این مجموعه در شکل ۱۴ نشان داده شده‌است.

مشخصات هندسی

سازه‌های مورد بررسی از دو لوله جدار نازک آلومینیومی متداخل تشکیل شده‌اند که میان آنها از فوم پلیمری EVA پر شده‌است. ضخامت لوله داخلی $t = 2 \text{ mm}$ و قطر بیرونی آن ۲۲ mm می‌باشد. ابعاد و مشخصات هر یک از نمونه‌ها در جدول ۴ آمده است. با توجه به این‌که سازه مورد نظر دارای بی‌نهایت صفحه تقارن است که همگی از محور لوله می‌گذرند، با بهره‌گیری از تنها دو صفحه تقارن عمودی، می‌توان یک‌چهارم همه اجزا را مدل کرد. بنابراین، چنانچه محور Y محور تقارن فرض شود، صفحات XY و YZ به عنوان صفحات تقارن خواهند بود. با توجه به کم بودن ضخامت لوله در مقایسه با سایر ابعاد آن می‌توان لوله را در شبیه‌سازی‌ها پوسته^۲ فرض کرد.

مشخصات ماده

برای پر کردن فضای خالی بین دو لوله آلومینیومی در هر یک از نمونه‌ها از فوم پلیمری EVA استفاده شده‌است که خواص مکانیکی آن در جدول ۵ آورده شده‌است.

جدول ۵- خصوصیات فوم EVA به‌کار برده شده در شبیه‌سازی

ρ	$1.32 \times 10^{-3} \text{ kg/mm}^3$
E	۱/۲۱ GPa
Tension cutoff stress	۰/۴ MPa
مدل ماده	Low Density Foam

لوله‌های مورد استفاده از آلیاژ آلومینیوم می‌باشند که نمودار تنش- کرنش هر یک از نمونه‌ها در شکل ۴ نشان داده شده‌است. خواص مکانیکی لوله‌های آلومینیومی به‌کار رفته در شبیه‌سازی در جدول ۶ ارائه شده‌است.

در این شبیه‌سازی از اثر نرخ کرنش صرف‌نظر شده‌است و شکست یا خرابی در این شبیه‌سازی تعریف نشده‌است.

^۳Contact

^۴Contact_Automatic_Surface_To_Surface

^۵Contact_Automatic_Single_Surface

^۱Part

^۲Shell

در جدول ۷ نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای نمونه‌های مختلف نشان داده شده‌است. همان‌طور که در نتایج دیده می‌شود وجود فوم باعث افزایش میزان جذب انرژی و نیروی میانگین لهیدگی شده‌است.

۳- بحث و بررسی نتایج

در این بخش، ابتدا نتایج حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های تجربی همین تحقیق مقایسه شده و سپس بررسی پارامتری صورت گرفته‌است.

۳-۱- مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشی

در جدول ۸ نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی و عددی با یکدیگر مقایسه شده‌است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بیشترین درصد اختلاف بین این نتایج در آزمایش‌های شبه‌استاتیکی حدود پانزده درصد و در آزمایش‌های ضربه‌ای حدود ده درصد می‌باشد. همچنین ترتیب جذب انرژی، نیروی بیشینه و نیروی متوسط مقاطع مختلف در آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی مشابه است، ولی همان‌طور که در شکل‌های ۱۷ تا ۱۹ و جدول ۸ دیده می‌شود، تا حدودی اختلاف در نمودار نیرو و انرژی و ناحیه آغاز چین‌خوردگی وجود دارد. این موضوع می‌تواند تا حدی ناشی از نحوه ساخت لوله‌ها با شرایط در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی‌ها باشد. همچنین، تفاوت موجود در ناحیه چین‌خوردگی می‌تواند ناشی از نحوه ثابت کردن انتهای لوله‌ها باشد. به‌هر حال نتایج به دست آمده از جداول مقایسه‌ای ارائه شده در خصوص عوامل مهم جذب انرژی و مقایسه صورت گرفته، نشانگر اختلاف کمی بین دو روش بوده و بنابراین، می‌توان نسبت به نتایج شبیه‌سازی اطمینان حاصل نمود. در جدول ۸ علامت منفی نشانه کمتر بودن مقدار کمیت در روش عددی نسبت به آزمایش‌های تجربی می‌باشد. همان‌طور که در جدول ۸ مشاهده می‌شود اختلاف نتایج انرژی جذب شده در نمونه $O_2IF_1L_20$ نسبتاً زیاد است که به علت کمایش این نمونه در آزمایش تجربی بوده است.

جدول ۸- نتایج حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش‌ها در بارگذاری شبه-استاتیکی

کد نمونه‌ها	درصد اختلاف %				محل شروع چین خوردگی
	انرژی جذب شده E(J)	نیروی متوسط لهیدگی Fm (kN)	نیروی بیشینه Fp (kN)	طول لهیدگی Δ (mm)	
$O_1IF_0L_00$	۲	-۵/۷	-۸/۴	-۸/۵	مشابه
$O_1IF_1L_00$	-۸/۶	-۶/۸	-۱/۴	-۱/۷	مشابه
$O_2IF_0L_00$	۸/۱	۲/۹	۸/۱	۹	تفاوت
$O_2IF_1L_00$	-۳/۹	-۲/۱	-۷/۲	۸/۱	مشابه
$O_2IF_1L_10$	-۵/۴	-۸/۴	۷/۶	-۱/۶	تفاوت
$O_2IF_1L_20$	۱۵/۸	۴/۴	۳/۸	۷/۱	مشابه

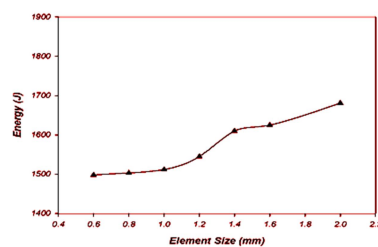
۱۵۵۰ ژول به ۱۵۰۸ ژول کاهش می‌یابد که تغییری به اندازه کمتر از ۰/۵ درصد دارد که قابل اغماض است. با این روش اندازه مناسب المان-ها $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ به‌دست آمده است. کوچک‌تر نمودن اندازه المان تأثیر ناچیزی در نتایج دارد اما زمان حل را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. در شکل ۱۵ نمودار تغییرات انرژی جذب شده در حین فرایند چین‌خوردگی برای سازه ساندویچی بدون فوم بر حسب اندازه المان رسم شده‌است.

جدول ۷- نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی برای بارگذاری شبه-استاتیکی نمونه‌های مختلف

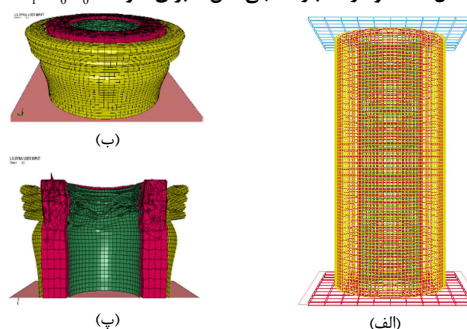
تعداد چین	طول لهیدگی Δ (mm)	نیروی بیشینه F_p (kN)	نیروی متوسط لهیدگی F_m (kN)	انرژی جذب شده E (J)	کد نمونه‌ها
۴	۶۰/۵	۳۱/۹	۲۵/۰	۱۵۱۲	$O_1IF_0L_00$
۳	۴۲/۰	۳۶/۴	۳۳/۶	۱۴۱۱	$O_1IF_1L_00$
۵	۶۰/۷	۳۳/۷	۲۲/۳۵	۱۳۵۷	$O_1IF_1L_10$
۵	۶۰/۱	۳۶/۲	۲۴/۹	۱۵۰۲	$O_1IF_1L_20$
۳	۳۸/۰	۳۷/۸	۲۳/۲۱	۸۸۲	$O_2IF_0L_00$
۵	۶۲/۰	۳۳/۵	۲۴/۵۱	۱۵۲۰	$O_2IF_1L_00$

نتایج شبیه‌سازی

روشن است که برای همه شبیه‌سازی‌های انجام شده در این پژوهش، مواردی مانند المان‌بندی لوله و شرایط مرزی ثابت می‌باشند. شبیه‌سازی‌ها شامل سازه‌های تو خالی و پر شده با فوم می‌باشد. در شکل ۱۶ نمونه $O_1IF_0L_00$ قبل و بعد از بارگذاری نشان داده شده‌است. قسمت قرمز رنگ در شکل نشان‌دهنده فوم می‌باشد.

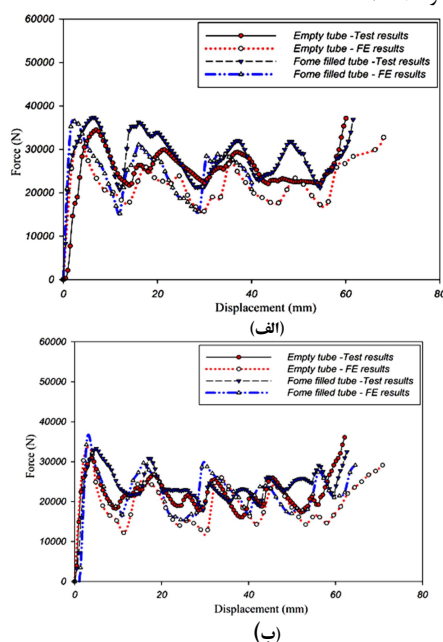


شکل ۱۵- نمودار اعتبار سنجی مش‌ها برای نمونه $O_1IF_0L_00$



شکل ۱۶- نحوه چین‌خوردگی نمونه $O_1IF_1L_00$ ، مدل سیمی سازه قبل از لهیدگی. (ب) چین‌خوردگی سازه. (پ) برش سازه بعد از چین‌خوردگی

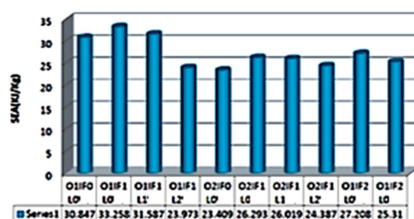
$(O_2IF_1L_00)$ نسبت به سازه خالی $(O_2IF_0L_00)$ به ترتیب، برابر $۲۵/۳\%$ و $۱۷/۹\%$ است.



شکل ۲۰- تأثیر وجود فوم بر نمودار نیرو- جابجایی (الف) نمونه‌های $O_2IF_1L_00$ و $O_1IF_0L_00$. (ب) نمونه‌های $O_2IF_0L_00$ و $O_1IF_1L_00$

از آنجا که در سازه‌های جاذب انرژی وزن سازه نیز اهمیت دارد، به همین منظور انرژی جذب شده مخصوص (SEA) برای مقایسه کارایی سازه‌ها مناسب‌تر است. در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ انرژی جذب شده مخصوص نمونه‌های مختلف در دو حالت بارگذاری شبه‌استاتیکی و ضربه‌ای با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

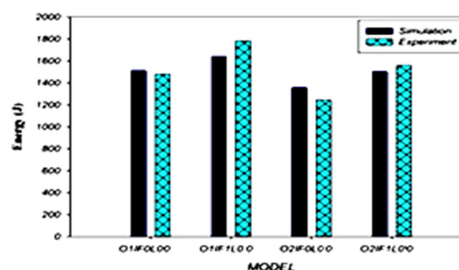
مقایسه‌ای بین انرژی جذب شده مخصوص بین سازه‌های مختلف تحت بارگذاری دینامیکی انجام گرفته‌است که مشاهده می‌شود تغییر طول سازه تأثیر چندانی بر میزان جذب انرژی مخصوص ندارد. همچنین، وجود فوم باعث افزایش میزان جذب انرژی مخصوص شده- است گرچه این افزایش چشمگیر نیست.



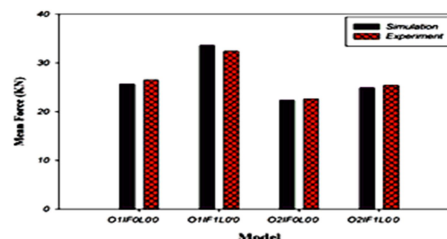
شکل ۲۱- نمودار جذب انرژی مخصوص برای سازه‌های مختلف تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی (آزمایش تجربی)

۳-۳- اثر ضخامت لوله بیرونی بر نیروی لهیدگی و جذب انرژی سازه‌ها

اثر ضخامت لوله‌های بیرونی برای دو نمونه در چهار ضخامت $۱/۵$ ، $۲/۵$ و ۳ میلی‌متر شبیه‌سازی شده و نمودار نیرو- جابجایی آنها در شکل ۲۳ نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود با افزایش ضخامت لوله‌ها شکل نمودار نیرو- جابجایی تغییر چندانی نمی‌کند، اما

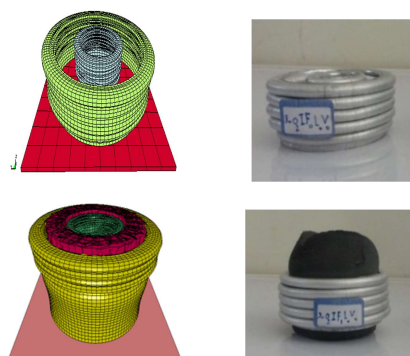


شکل ۱۷- میزان جذب انرژی در روش‌های عددی و تجربی (بارگذاری شبه‌استاتیکی)



شکل ۱۸- نیروی متوسط لهیدگی در روش‌های عددی و تجربی (بارگذاری شبه‌استاتیکی)

همان‌طور که مشاهده شد نتایج شبیه‌سازی از تطابق خوبی با نتایج تجربی برخوردار است. بنابراین، می‌توان با اطمینان بیشتری به نتایج آن استناد کرد. در ادامه تأثیر تغییرات چگالی فوم و ضریب اصطکاک بین سطوح با شبیه‌سازی بررسی شده‌است.

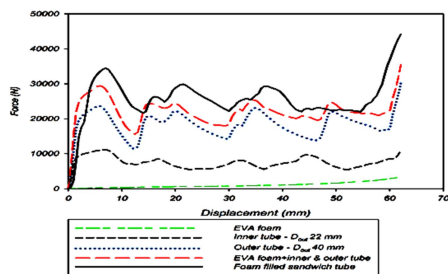


شکل ۱۹- چین‌خوردگی برای دو نمونه $O_2IF_0L_00$ و $O_2IF_1L_00$ در روش تجربی و شبیه‌سازی در بارگذاری شبه‌استاتیکی

۳-۲- مقایسه جذب انرژی و نیروی لهیدگی در سازه‌های توخالی با سازه‌های پر شده با فوم

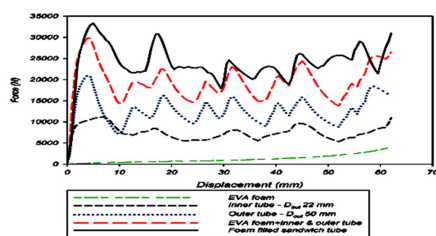
در شکل ۲۰ نمودار نیرو- جابجایی برای دو سازه توپر و توخالی نشان داده شده‌است. همان‌گونه که این شکل نشان می‌دهد، برای بارگذاری شبه‌استاتیکی، جذب انرژی و میانگین نیروی لهیدگی در سازه‌هایی که از فوم پر شده‌اند نسبت به سازه‌های توخالی به صورت قابل توجهی افزایش یافته‌است. به عنوان مثال، برای سازه با لوله بیرونی ۴۰ میلی‌متر و پر شده با فوم $O_1IF_1L_00$ ، نسبت به سازه خالی با همین قطر $(O_1IF_0L_00)$ میزان جذب انرژی $۲۰/۴\%$ و نیروی میانگین $۱۶/۳\%$ افزایش یافته‌است. این افزایش برای سازه پر شده با فوم

و نیز تاثیر متقابل تغییر شکل‌های اجزاء سازه نسبت داد که باعث افزایش مقاومت در برابر چین خوردگی می‌شود.



شکل ۲۵- نمودار نیرو- جابجایی سازه ($O_1IF_1L_0$) با اجزای سازنده آن

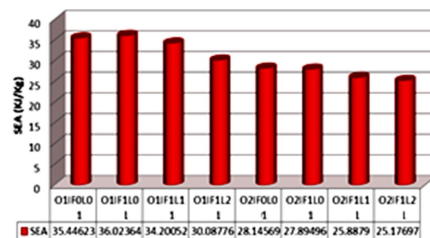
۴-۳- بررسی تاثیر چگالی فوم بر لهیدگی سازه‌ها
جهت بررسی کامل‌تر تاثیر فوم بر رفتار لهیدگی، برای مقدار چگالی فوم علاوه بر 132 kg/m^3 ، مقادیر 200 kg/m^3 و 300 kg/m^3 نیز در شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شده‌است که نتایج آن در شکل ۲۷ نشان داده شده‌است. با افزایش چگالی، میزان جذب انرژی به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد که این افزایش در چگالی‌های بالاتر نمایان‌تر است. با افزایش ۱۲۷٪ در چگالی، میزان جذب انرژی مخصوص برای نمونه $O_1IF_1L_0$ ، به میزان ۳۷٪ و برای مدل $O_2IF_1L_0$ ۲۶/۵٪ افزایش می‌یابد.



شکل ۲۶- نمودار نیرو- جابجایی سازه ($O_2IF_1L_0$) با اجزای سازنده آن

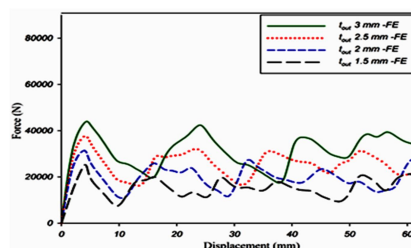
جدول ۹- بین نیروی میانگین لهیدگی و انرژی جذب شده اجزای تشکیل دهنده سازه ساندویچی با خود سازه

کد نمونه	مجموع نیروی میانگین لهیدگی اجزای تشکیل دهنده سازه (kN)	نیروی میانگین لهیدگی سازه پر شده با فوم (kN)	درصد اختلاف برای نیروی میانگین	مجموع انرژی جذب شده اجزای تشکیل دهنده سازه (J)	انرژی جذب شده سازه ساندویچی (J)	درصد اختلاف برای انرژی جذب شده سازه
$O_1IF_1L_0$	۲۶/۰۵	۳۲/۰۴	۱۸/۷	۱۵۱۱	۱۷۸۳	۱۵/۲
$O_2IF_1L_0$	۲۳/۱۶	۲۵/۵۹	۹/۵	۱۳۸۱	۱۵۶۱	۱۱/۵



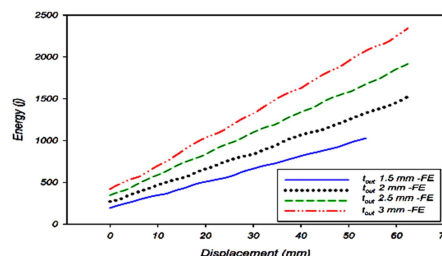
شکل ۲۲- نمودار جذب انرژی مخصوص برای سازه‌های مختلف تحت بارگذاری ضربه‌ای (آزمایش تجربی)

سبب افزایش بیشینه نیرو و نیروی میانگین لهیدگی می‌شود. با افزایش ضخامت لوله بیرونی از ۱/۵ تا ۳ میلی‌متر، میزان نیروی میانگین لهیدگی در حدود ۱۵۰٪ افزایش می‌یابد.



شکل ۲۳- تأثیر ضخامت لوله بیرونی بر نمودار نیرو- جابجایی نمونه $O_1IF_0L_0$

نتایج حاصل از تغییر ضخامت سازه‌ها بر روی میزان جذب انرژی و انرژی ویژه در شکل ۲۴ ارائه شده‌است. بر اساس این شکل، با افزایش ضخامت لوله میزان جذب انرژی نیز افزایش می‌یابد که علت این امر افزایش نیروی میانگین لهیدگی می‌باشد.



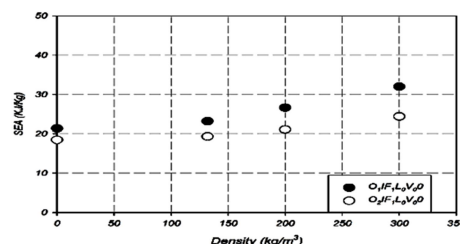
شکل ۲۴- اثر ضخامت لوله بر میزان جذب انرژی

۳-۳- مقایسه کارایی سازه‌های ساندویچی نسبت به اجزای سازنده آن

نمودار نیرو- جابجایی برای لوله داخلی، بیرونی، فوم و مجموع آن- ها برای دو نمونه $O_1IF_1L_0$ و $O_2IF_1L_0$ در شکل‌های ۲۵ و ۲۶ با سازه ساندویچی پر شده با فوم مقایسه شده‌است. ملاحظه می‌شود که سطح زیر نمودار نیرو- جابجایی که نشان‌دهنده میزان جذب انرژی است، برای سازه ساندویچی پر شده با فوم نسبت به مجموع اجزای سازنده آن بیشتر است.

در جدول ۹ نیروی میانگین لهیدگی و انرژی جذب شده اجزاء سازه با سازه کامل مقایسه شده‌است. علت بیشتر بودن نیروی میانگین لهیدگی و انرژی جذب شده سازه ساندویچی نسبت به اجزای سازه آن را می‌توان به اصطکاک مابین فوم و دیواره‌های لوله‌های بیرونی و درونی

- honeycombs under axial loading experimental study. *Materials and Design*, Vol. 31, pp.1216–1230, 2010.
- [8] Niknejad A., Liaghat G. H., Moslemi Naeini H. and Behraves A. H., Theoretical and experimental studies of the instantaneous folding force of the polyurethane foam-filled square honeycombs. *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 69–75, 2010.
- [9] Tai Y. S., Huang M. Y. and Hu H.T., Axial compression and energy absorption characteristics of high-strength thin-walled cylinders under impact load. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 53, pp.1–8, 2011.
- [10] Hui Q., Jingsi H., Chao X. and Feng F., Numerical studies on dynamic behavior of tubular T-joint subjected to impact loading. *International Journal of Impact Engineering*. Vol. 67, pp. 12-26, 2014.
- [11] Zamani J., Baran B. and Rafahi A., An experimental analysis of single and double thin-walled structure under static load. *In The 22th International Conference on Mechanical Engineering*, Ahvaz, Iran, 2014.
- [12] Kathiresan M. and. Manisekar K., Axial crush behaviours and energy absorption characteristics of aluminium and E-glass/epoxy over-wrapped aluminium conical frusta under low velocity impact loading, *Composite Structures*, Vol. 136, pp. 86-100, 2016 .
- [13] Zhang X. and Zhang H., Relative merits of conical tubes with graded thickness subjected to oblique impact loads, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 98, pp. 111-125, 2015 .
- [14] Patil R. V., Lande P. R., Tadamalle A. P. and Reddy Y. P., Determination of Impact Absorbing Capacity and toughness of Aluminum Honeycomb Sandwich Panel in Bumper Beam, *International Conference on Advancements in Aeromechanical Materials for Manufacturing*, Vol. 4, Issue 8, pp. 8816-8826, 2017.
- [15] Chahardoli S. and Alavi Nia A., Investigation of mechanical behavior of energy absorbers in expansion and folding modes under axial quasi-static loading in both experimental and numerical methods *Thin-Walled Structures*, Vol. 120, pp. 319-332, 2017.
- [16] Duarte I., Krstulović-Opara L., Dias-de-Oliveira J. and Vesenjak M., Axial crush performance of polymer-aluminium alloy hybrid foam filled tubes, *Thin-Walled Structures*, Vol. 138, pp. 124–136, 2019.
- [17] Su P., Han B., Yang M., Wei Z., Zhao Z., Zhang Q., Zhang Q., Qin K. and Jian Lu T., Axial compressive collapse of ultralight corrugated sandwich cylindrical shells, *Materials and Design*, Vol. 160, pp. 325–337, 2018.
- [18] Jafarian N. and Rezvani M.J., Crushing behavior of multi-component conical tubes as energy absorber: A comparative analysis between end-capped and non-capped conical tubes, *Engineering Structures*, Vol. 178, pp. 128–135, 2019.
- [19] Zhang Y., Liu Q., He Z., Zong Z. and Fang J., Dynamic impact response of aluminum honeycombs filled with Expanded Polypropylene foam, *Composites Part B*, Vol. 156, pp. 17–27, 2019.
- [20] Liu W., Huang J., Deng X., Lin Z. and Zhang L., Crashworthiness analysis of cylindrical tubes filled with conventional and negative Poisson's ratio foams, *Thin-Walled Structures*, Vol. 131, pp. 297–308, 2018.
- [21] Duarte I., Krstulović-Opara L. and Vesenjak M., Axial crush behaviour of the aluminium alloy in-situ foam filled tubes with very low wall thickness, *Composite Structures*, Vol. 192, pp. 184–192, 2018.
- [۲۲] سارایی م.، بررسی تحلیلی و تجربی رفتار المان زاویه‌ای تحت بار ضربه-ای. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا همدان، ۱۳۸۶.



شکل ۲۷- نمودار جذب انرژی مخصوص بر حسب چگالی فوم برای دو

نمونه $O_2IF_1L_0$ و $O_1IF_1L_0$

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، رفتار مکانیکی سازه‌های ساندویچی متشکل از دو لوله آلومینیومی متداخل که بین آن‌ها از فوم پلیمری EVA پر شده‌است، تحت بارگذاری‌های شبه‌استاتیکی و ضربه‌ای به دو روش تجربی و شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، اثر فوم، تغییرات ضخامت لوله، طول لوله و چگالی فوم بر نحوه تغییر شکل، میزان جذب انرژی و نیروی متوسط لهیدگی سازه‌ها مطالعه شد. مهم‌ترین نتایج حاصل از این پژوهش به شرح ذیل می‌باشد:

مقایسه بین نتایج آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی با نرم‌افزار LS-Dyna نشان‌دهنده توافق خوب آن‌ها است. استفاده از فوم پلیمری EVA در سازه‌های ساندویچی باعث بالا رفتن میزان نیروی میانگین لهیدگی، جذب انرژی و جذب انرژی مخصوص سازه‌ها می‌شود. با افزایش چگالی فوم، میزان تأثیر آن در جذب انرژی سازه‌ها افزایش می‌یابد. وجود فوم اثری در نحوه چین‌خوردگی‌ها ندارد ولی تا حدودی باعث منظم‌تر شدن چین‌ها می‌شود. تغییر طول لوله، تأثیر عمده‌ای در میزان انرژی مخصوص جذب شده ندارد، فقط با کاهش طول، میانگین نیروی لهیدگی افزایش می‌یابد. کارایی سازه ساندویچی پر شده با فوم نسبت به اجزای سازنده آن بیشتر است و از اصل جمع آثار پیروی نمی‌کند.

۵- مراجع

- [1] Jie S., Yan C. and Guoxing L., Light-Weight thin-walled structures whit patterned windows under axial crushing. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 66, pp. 239-248, 2013.
- [2] Bardi F. C., Yun H. D. and Kyriakides S., On the axisymmetric progressive crushing of circular tubes under axial compression. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 40, pp. 3137–3155, 2003.
- [3] Al Galib D. and Limam, A., Experimental and Numerical Investigation of Static and Dynamic Axial Crushing of Circular Aluminum Tubes. *Thin-Walled Structures*, Vol. 42, pp.1103-1137, 2004.
- [4] Aktay L., Toksoy A. K. and Guden M., Quasi-static Axial Crushing of Extruded Polystyrene Foam Filled Thin-Walled Aluminum Tubes: Experimental and Numerical Analysis. *Materials and Design*, Vol. 27, pp.556–565, 2006.
- [5] Hou Sh., Li Q., Long Sh., Yang X. and Li W., Crashworthiness design for foam filled thin-wall structures. *Materials and Design*, Vol. 30, pp. 2024–2032, 2009.
- [6] Alavi Nia A. and Haddad Hamedani J., Comparative Analysis of Energy Absorption and deformation of thin walled tubes with various section geometries. *Thin-Walled structures*, Vol. 48, pp. 946-954, 2010.
- [7] Alavi Nia A. and Sadeghi M. Z., The effects of foam filling on compressive response of hexagonal cell aluminum