



بررسی تجربی و عددی جذب انرژی و تغییر شکل لوله‌های جدار نازک تو خالی و توپر با هندسه مقاطع دایره و مربع تحت بار ضربه‌ای عرضی

مهدی چوبینی¹، غلامحسین لیاقت^{2*}، محمدحسین پل³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

* تهران، صندوق پستی 141-14115، ghlia530@modares.ac.ir

چکیده

در این تحقیق به بررسی تجربی و عددی جذب انرژی و تغییر شکل لوله‌های جدار نازک با هندسه‌های مربعی و دایروی تحت بار ضربه‌ای عرضی پرداخته شده است. هدف از انجام این تحقیق بررسی اثر تغییر شکل هندسی برای لوله آلومینیومی بر میزان جذب انرژی و بررسی اثر وجود فوم درون آن برای جذب انرژی بیشتر ناشی از ضربه عرضی است. در بخش تجربی، ابتدا لوله‌هایی از جنس آلومینیوم به صورت تو خالی و توپر با فوم پلی اورتان تهیه شد و سپس آزمایش‌های شبه استاتیکی با نرخ بارگذاری ثابت و دینامیکی توسط دستگاه سقوط وزنه بر روی نمونه‌ها با انرژی‌های مختلف انجام گرفت و دیاگرام شتاب لحظه‌ای بر حسب زمان در هر آزمایش اندازه‌گیری شد. در بخش عددی، شبیه‌سازی پدیده‌ی ضربه‌ی عرضی بر مقاطع جدار نازک با نرم افزار آباکوس صورت گرفت. مقایسه نتایج تجربی و عددی نشان‌دهنده هم‌خوانی خوب (اختلاف کمتر از بیست درصد) میان این نتایج است. در پایان چنین نتیجه‌گیری شد که با توجه به جنس سازه، در انرژی‌های بالا لوله مربعی نسبت به دایروی 50 درصد جذب انرژی ویژه بالاتر و لوله توپر نسبت به لوله توخالی 20 درصد جذب انرژی ویژه بالاتری دارد. میزان خیز در لوله توخالی و لوله دایروی همواره به ترتیب بیشتر از لوله توپر و لوله مربعی است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 21 تیر 1393

پذیرش: 19 مهر 1393

ارائه در سایت: 01 آذر 1393

کلید واژگان:

جذب انرژی

لوله جدار نازک

آلومینیوم

بار ضربه‌ای عرضی

فوم پلی اورتان

Investigation of energy absorption and deformation of thin walled tubes with circle and square section geometries under transverse impact loading

Mahdi Choubini¹, Gholam Hossein Liaghat^{1*}, Mohammad Hossein Pol²

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran.

*P.O.B. 14115-141 Tehran, Iran, ghlia530@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 12 July 2014
Accepted 11 October 2014
Available Online 22 November 2014

Keywords:

Energy Absorber
Thin Walled Tube
Aluminum
Transverse Impact Load
Polyurethane Foam

ABSTRACT

In this study, the numerical and experimental study of energy absorption and deformation of thinwalled tubes with square geometry and circular cross under impact loading is studied. The purpose of this study was to investigate the effect of geometry on the energy absorption of aluminum tubes and the effect of foam filled tubes to absorb more energy under transverse impact.

In the experimental part, hollow aluminum tubes filled with solid polyurethane foam were prepared and then the quasi-static tests with static and dynamic loading rates were performed by drop hammer method on samples with different energy and the acceleration-time diagrams in each test were obtained. In the last part of this study simulation of the phenomenon of transverse impact on thin sections was carried out with the ABAQUS software. The discussion and conclusions of this study and the results of experimental tests carried out by the author of the thesis have been compared with the results of numerical analysis and show a good agreement (difference below twenty percent). Finally, it was concluded that with regard to material of structure, at high energies square tubes have 50 percent specific energy absorbed higher than circular tubes and filled tubes have 20 percent specific energy absorbed higher than hollow ones.

Also, transverse displacement of the hollow tube and circular tube is always higher than the filled tube and square tube.

1- مقدمه

در صورت برخورد ناخواسته جسم عمل می‌کنند. در واقع یک جاذب انرژی سیستمی است که بتواند تمام یا قسمتی از انرژی جنبشی را به شکل دیگری از انرژی به منظور کاهش نیروی آسیب‌رسان منتقل شده به سازه تبدیل کند.

جاذب‌های انرژی ضربه¹ (IEA) عناصر ساختاری مصرفی مکانیکی هستند که

1- Impact Energy Absorbers

برخورد تجهیزات متحرک و توقف آن‌ها در مدت زمان کوتاه، موجب اعمال شتاب بیش از حد و تخریب تجهیزات و صدمه جانی سرنشینان آن‌ها می‌شود. ضربه‌گیرها که برای کاهش شتاب توقف تجهیزات متحرک استفاده می‌شوند به عنوان فیوزهای مکانیکی عمل می‌کنند تا بارهایی که ممکن است در ساختار اصلی بلافاصله پس از برخورد اثر کنند، را محدود نمایند. این سیستم‌ها یک بار مصرف بوده و پس از انجام نقش خود در آسیب‌ها تعویض می‌شوند.

سیستم‌های جاذب انرژی بسته به سرعت جذب انرژی آن‌ها و نوع رویداد، کاربردشان در شرایط عملی مختلف جذب انرژی تعیین می‌شود. شرایط عملی ممکن است عبارت از جذب انرژی در هواپیما و بالگرد [1]، زیر آسانسورها، زنده‌های بزرگراه‌ها، اتومبیل [2]، قطار، کشتی [3] و سازه‌های دریایی و ساحلی (برای جذب انرژی برخورد کشتی با اسکله) [4]، صنایع هوا و فضا، راکتورهای هسته‌ای [5] و مخازن حمل و نقل ایمن مواد جامد و مایع [6] باشد.

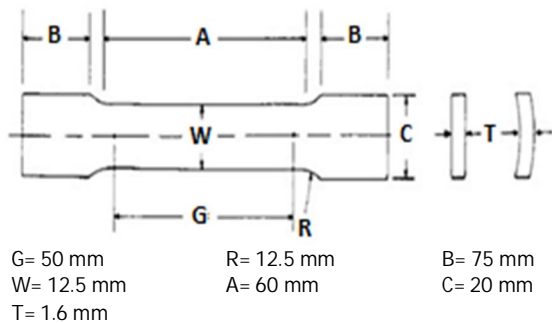
انرژی جنبشی حاصل از برخورد صرف غلبه بر اصطکاک، تغییر شکل پلاستیک یا شکست قطعات می‌شود. سیستم‌های جاذب انرژی می‌توانند انرژی الاستیک و غیر الاستیک را از طریق روش‌های مختلف تغییر شکل به پاسخ‌های جذب انرژی متفاوت تبدیل کنند. مکانیزم‌های تغییر شکل شامل فشردگی جانبی، تورفتگی جانبی، خرد کردن محوری، شکافتگی و وارونگی است. ضربه‌پذیری سیستم جذب انرژی به خاطر محدودیت در مقدار نیروی قابل تحمل و میزان تغییر شکل سیستم، دارای حالت بهینه‌ای است که باید برای هر سیستم جذب انرژی ضربه بررسی و تعیین شود. محدودیت در مقدار نیروی قابل تحمل به این دلیل است که با افزایش ظرفیت تحمل نیروی سیستم، این نیرو به سرنشینان وسیله نقلیه وارد شده و سلامت جان آن‌ها را به خطر می‌اندازد. از طرف دیگر اگر به خاطر کاهش نیروی وارد به سرنشینان در سیستم جذب ضربه از مواد با استحکام پایین استفاده شود، سازه و بدنه تجهیزات دچار تغییر شکل‌های شدید شده که در آن حالت خسارات وارده قابل قبول نیست. بطور کلی جاذب‌های انرژی را می‌توان به دو دسته بازگشت پذیر (مانند جریان سیال در میراکننده‌های هیدرولیک) و بازگشت ناپذیر (مانند تغییر شکل پلاستیک در مواد) تقسیم کرد. اغلب ضربه گیرهای دسته اول برای برخورد با انرژی کم و فقط با احتمال آسیب سازه استفاده می‌شوند در صورتی که ضربه گیرهای دسته دوم برای برخورد با انرژی بالا و با احتمال آسیب اجزای مهم و خطر جانی طراحی شده‌اند. ضربه گیرهای مکانیکی که انرژی جنبشی را به وسیله انجام کار پلاستیک جذب می‌کنند از جمله ضربه‌گیرهای بازگشت ناپذیری هستند که در سامانه‌های حمل و نقل کاربرد دارند. از رایج‌ترین انواع جاذب انرژی می‌توان به سازه‌های میان تهی (لوله‌ها) با مقاطع دایروی، مربعی و یا سازه‌های لانه زنبوری اشاره کرد.

امروزه جاذب‌های انرژی ناشی از برخورد به اشکال مختلفی ساخته شده و مورد استفاده قرار می‌گیرند که عمده‌ترین قشر آن‌ها سازه‌های جدار نازک است که بیشترین مقدار جذب انرژی ضربه در این جاذب‌های انرژی در ناحیه تغییر فرم پلاستیکی آن‌ها رخ می‌دهد [7].

سبکی، ظرفیت جذب انرژی بالا، فضای کم، طول لهیدگی بالا، پایداری بهتر به هنگام لهیدگی، نسبت بالای جذب انرژی به وزن، در دسترس بودن و صرفه اقتصادی مزیت‌هایی است که سبب شده سازه‌های جدار نازک یکی از بهترین سیستم‌های جذب ضربه بوده و تحقیقات برای استفاده از این

سیستم‌های جذب انرژی و همچنین بهینه‌سازی این سیستم‌ها یک موضوع علمی جدید در مباحث مکانیک ضربه باشد [8]. اولین مطالعات تجربی درباره فروریزش خمشی لوله‌های جدار نازک مربعی و مستطیلی توسط ککمن صورت گرفت که تطابق خوبی را بین آزمایش‌های شبه استاتیکی خمشی و پیش‌بینی‌های تئوری گشتاور خمشی لولاهای بر حسب زاویه چرخش نشان داد [9]. رید و همکارانش [10]، تغییر شکل لوله‌های دایروی جدار نازک تحت بار جانبی را مورد بررسی قرار دادند. آنها رفتار لوله‌های دایروی با تکیه‌گاه ساده تحت بارگذاری عرضی سمبه‌گوه‌ای شکل را بر مرکز لوله بررسی کردند. تحت این بارگذاری سه مرحله در تغییر شکل شناسایی شده و رابطه‌ای بین مشخصات مختلف نیروها با پارامترهای موقعیت بدست آمد. گوپتا و سینها [11] فروپاشی جانبی لوله‌های مربعی ساکن بر روی یک پایه تخت را مطالعه کردند. در این تحقیق لوله مربعی از آلومینیوم و فولاد نرم بر روی یک سطح صاف و سخت قرار داده شده و به وسیله پرتابه‌های مختلف تحت برخورد قرار گرفت. در این تحقیق چگونگی تغییر شکل اهداف و پاسخ فشردگی - بار آن‌ها مورد بحث قرار گرفت. سانتوزا و همکاران [12]، رفتار فروپاشی خمشی ستون‌های جدار نازک پرشده با فوم آلومینیوم سلول بسته را مورد مطالعه قرار دادند. دو مکانیسم برای تقویت لوله‌های آلومینیوم توسط آن‌ها در نظر گرفته شد. فوم پرکننده آلومینیوم چین خوردگی به سمت داخل (وجه تحت فشار) را به تعویق می‌اندازد، بنابراین مانع کاهش ظرفیت تحمل بار در اثر له شدن مقطع می‌شود. از این پدیده در آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی عکس‌برداری شد. گوپتا و ری [13]، آزمایش‌های تجربی بر روی مقاطع مربعی جدار نازک با طول‌های متفاوت با تکیه‌گاه ساده و تحت بار عرضی را توسط سمبه‌گوه‌ای شکل در دستگاه اینسترون¹ و سقوط وزنه² انجام داده و اثر ماده پرکننده و نرخ بارگذاری بر مشخصه‌های جذب انرژی لوله‌ها را مورد بحث قرار دادند. از آزمایش‌ها یک تحلیل بر پایه مکانیک تغییر شکل برای محاسبه بار فروریزش و منحنی نیرو- فشردگی پیش از فروریزش برای لوله‌های با تکیه‌گاه ساده ارائه شد. کارامانوس و الفدریادیس [14]، به بررسی فروپاشی لوله‌های الاستوپلاستیک تحت فشار بارهای جانبی پرداختند. در این تحقیق آن‌ها به بررسی اثر فشار بر روی بار جانبی لوله‌ها و ظرفیت جذب انرژی آن‌ها پرداختند. طبق این نتایج حضور فشار، اثرات قابل توجهی در پاسخ لوله دارد. تجزیه و تحلیل تورفتگی لوله‌های با فشار داخلی تحت بار جانبی در سال 2006 توسط کارامانوس و آندریداکیس [15]، انجام شد، در این پژوهش آن‌ها به بررسی پاسخ سازه ساخته شده از لوله‌های تحت بارگذاری جانبی شبه‌استاتیک اعمال شده توسط پرتابه گوه‌ای شکل در حضور فشار داخلی پرداختند. آن‌ها دریافتند وجود فشار داخلی به طور قابل توجهی نیروی فرورفتگی را افزایش می‌دهد. یوچنگ لیو و مایکل ال‌دی [16]، به بررسی فروپاشی خمشی لوله‌های دایروی جدار نازک به صورت تحلیلی و عددی با استفاده از نرم‌افزار ال‌اس‌دینا³ پرداختند. زارعی و کروگر [17]، رفتار خمشی لوله‌های خالی و پرشده از فوم را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها بیان می‌کنند که تیرهای پرشده از فوم نسبت به تیرهای توخالی نسبت جذب انرژی به وزن بیشتری دارند. ژانگ و همکارانش [18]، به بهینه‌سازی طراحی مقطعی پیکربندی تیر تقویت شده جدار نازک پرداختند. نتایج تحلیل عددی آن‌ها نشان داد که تیرهای پرشده از فوم در مقایسه با تیرهای خالی با وزن یکسان، قابلیت جذب انرژی بیشتر و نیروی اولیه برخورد کوچکتری دارند.

1- Instron
2- Drop Hammer
3- Ls- dyna



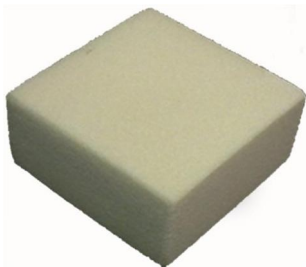
G= 50 mm
W= 12.5 mm
T= 1.6 mm

R= 12.5 mm
A= 60 mm

B= 75 mm
C= 20 mm



شکل 1 نمونه دمبلی شکل برای تست کشش



شکل 2 شمایی از نمونه فوم برای تست فشار محوری

سرعت انجام آزمایش $2/5\text{mm/min}$ می‌باشد. بدین ترتیب خواص مکانیکی فوم مورد استفاده شامل تنش تسلیم و مدول الاستیسیته جهت کاربرد در شبیه سازی عددی به دست می‌آید.

4-2- آزمایش خمش سه نقطه‌ای لوله‌های توخالی و پر شده از فوم
آزمایش خمش سه نقطه‌ای با استفاده از دستگاه اینسترون 5500 R در دانشگاه تربیت مدرس بر روی لوله‌های مقطع مربعی و دایروی توخالی و توپر انجام شد. به این منظور نمونه‌هایی از مقاطع به صورت مربع با طول ضلع 25mm و دایره با قطر 25mm و ضخامت $1/6\text{mm}$ با طول 350mm به صورت توخالی و پر شده با فوم پلی‌اورتان با دانسیته 320 kg/m^3 مورد آزمایش قرار گرفت. این آزمایش‌ها با شرایط تکیه‌گاه ساده به صورت استوانه-ای با قطر 30mm و طول 50mm و فاصله میان دو تکیه‌گاه (طول مفید لوله-ها) 250mm که در شکل 3 نمایش داده شده، با سرعت ثابت 5 mm/min انجام شده است.

عرب‌زاده و زینوددینی [19]، پاسخ دینامیکی لوله‌های تحت فشار زیر آب در معرض بارهای ضربه‌ای عرضی را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که خصوصیات بستر دریا ممکن است اثرات بسیار مهمی در میزان تورفتگی لوله، به خصوص در فشارهای داخلی نسبتاً کم داشته باشد و با افزایش عمق جایگذاری لوله در بستر، حداکثر بار ضربه و حداکثر عمق تورفتگی افزایش پیدا می‌کند.

در این تحقیق، مقدار جذب انرژی و نحوه تغییر شکل لوله‌های توخالی با مقاطع مربعی و دایروی پر شده با فوم تحت بار ضربه‌ای عرضی به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد. و در نهایت مقدار جذب انرژی و مکانیزم تغییر شکل آن‌ها مقایسه خواهد شد. همچنین تأثیر پر کردن این لوله‌ها با فوم نسبت به لوله‌های توخالی مورد مقایسه قرار خواهد گرفت.

2- آزمایش‌ها

1-2- مواد

لوله‌های مورد استفاده از جنس آلومینیوم تجاری بوده و شامل دو مقطع دایروی به قطر 25mm و مربعی به طول ضلع 25mm و ضخامت هر دو مقطع $1/6\text{mm}$ است که برای بدست آوردن خواص مکانیکی آن‌ها تست کشش انجام شده است. طول لوله‌ها 350mm است و از لوله‌هایی به طول 6m که به روش اکستروژن تولید شده‌اند جدا شده است.

فوم پرکننده در این آزمایش از جنس پلی‌اورتان است، این نوع فوم با دانسیته‌های مختلف موجود است. برای تهیه فوم پلی‌اورتان از دو ماده اولیه با نام‌های تجاری پلی‌آل¹ و ایزوسیانات² استفاده می‌شود، این دو ماده در شرایط محیطی حالت مایع دارند. برای تهیه این نوع فوم دو واحد جرمی پلی و یک واحد جرمی ایزو با هم به صورت کامل مخلوط می‌شوند و سپس این مخلوط را به داخل لوله‌ها ریخته می‌شوند، حدود $30-60$ ثانیه پس از تماس دو ماده، واکنش شیمیایی آغاز می‌شود که این واکنش با افزایش حجمی حدود سه برابر حجم اولیه همراه است. این واکنش گرمازا است. پس از چند دقیقه فوم پلی‌اورتان به صورت کاملاً جامد درمی‌آید. دانسیته فوم مورد استفاده در این آزمایش 320 kg/m^3 است.

2-2- آزمایش‌های کشش لوله‌های آلومینیومی

آزمایش کشش طبق استاندارد ASTM E8 (استاندارد آزمایش کشش آلیاژهای فلزی) [20]، با استفاده از دستگاه اینسترون 5500 R در دانشگاه تربیت مدرس بر روی لوله‌های مربعی و دایروی آلومینیومی انجام گردید. به این منظور نمونه‌هایی دمبلی شکل طبق استاندارد مطابق شکل 1 با استفاده از برش وایرکات تهیه شد.

سرعت بارگذاری در این آزمایش 5 mm/min است و خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم مورد استفاده از آزمایش کشش استاتیکی نمونه دمبلی شکل به دست آمد.

3-2- آزمایش‌های فشار بر روی فوم پلی‌اورتان

آزمایش فشار نیز طبق استاندارد ASTM D1621 [21]، با استفاده از دستگاه اینسترون 5500 R در دانشگاه تربیت مدرس بر روی نمونه‌های فوم به صورت مکعب با ابعاد $2 \times 2 \times 1\text{ in}^3$ انجام شد (شکل 2).

1- Polyol
2- Isocyanate

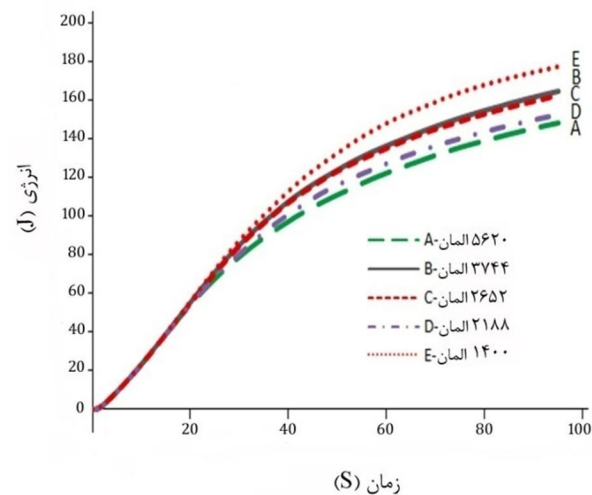
اصطکاک 0/2 در جهت مماس مشترک سطوح تماس، استفاده شد. تکیه‌گاه‌ها به فاصله 50mm از دو انتهای لوله و سنبه در مرکز لوله مشابه شرایط آزمایش در نظر گرفته شد. فرایند شبیه‌سازی برای تمامی نمونه‌ها با همین روال انجام شده است.

برای شبکه‌بندی هدف و رسیدن به جواب‌های همگرا و با دقت مناسب شبیه‌سازی با شبکه درشت شروع شده و با انجام شبیه‌سازی‌های متوالی، شبکه مناسب انتخاب شده است (شکل 5).

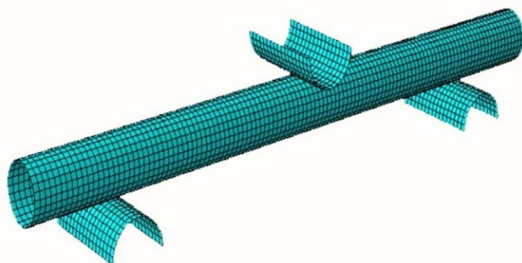
در نهایت برای المان‌بندی لوله آلومینیومی مربعی توخالی از 3744 المان S4R و برای هر یک از تکیه‌گاه‌ها و سنبه 255 المان صلب R3D4 در نظر گرفته شد. المان S4R، یک المان چهار گوش با 4 نود و از نوع پوسته و المان R3D4 یک المان صلب چهار گوش با 4 گر³ و از نوع پوسته است.

همچنین برای مدل‌سازی لوله‌های دایروی تو خالی شبیه‌سازی شده، با ابعاد طول 350 mm و ضخامت 1/6 mm و قطر 25mm از 3042 المان S4R استفاده شد (شکل 6). فوم پر کننده به صورت ایزوتروپ فرض شده و برای مدل کردن فوم پرکننده از تعداد 5733 المان C3D8R (المان شش وجهی) در لوله مربعی و تعداد 7020 المان در لوله دایروی استفاده شده است. برای تماس فوم با لوله به صورت قید تماسی صفحه به صفحه با ضریب اصطکاک 0/2 استفاده شد.

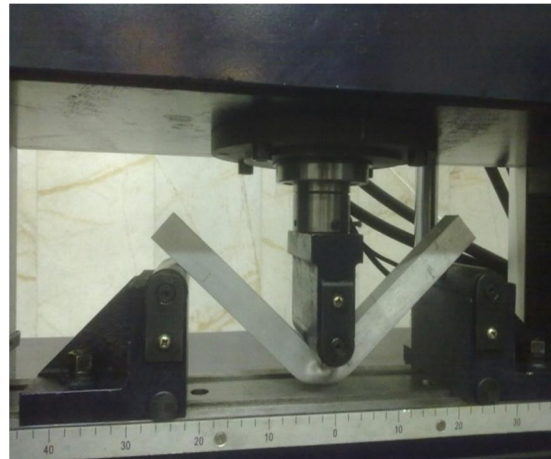
در ادامه داده‌های ورودی به نرم‌افزار برای مدل‌سازی به صورت جدول 1 ارائه شده است.



شکل 5 نمودارهای انرژی بر حسب زمان برای تست لوله مربعی توخالی با تعداد المان‌های مختلف



شکل 6 مدل هندسی لوله آلومینیومی توخالی با سطح مقطع دایروی



شکل 3 شمایی از روش بارگذاری لوله در آزمایش‌خمش سه نقطه‌ای لوله آلومینیومی مربعی

2-5- آزمایش سقوط وزنه لوله‌های توخالی و پر شده از فوم

آزمایش سقوط وزنه بر روی لوله‌های توخالی و پر شده از فوم با مقاطع دایروی و مربعی در دانشگاه امیرکبیر با استفاده از وزنه‌های 5 و 10 کیلوگرم و ارتفاع سقوط وزنه 45 سانتی‌متر انجام شد. برای انجام آزمایش بارگذاری عرضی بر لوله توسط این دستگاه، تکیه‌گاه و سنبه به صورت استوانه‌ای به قطر 30 mm و طول 50 mm طراحی و تهیه شده و شرایط تکیه‌گاهی و ضربه زننده با شرایط آزمایش خمش سه نقطه‌ای یکسان است.

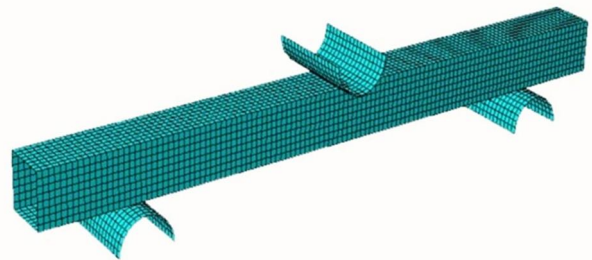
در این آزمایش فاصله تکیه‌گاه‌ها از یکدیگر (طول مفید لوله‌ها) 250mm در نظر گرفته شد. طی فرایند برخورد با استفاده از شتاب سنج مدل 3200B5 مقدار شتاب اندازه‌گیری شد.

3- شبیه‌سازی عددی

نرم‌افزار آباکوس یکی از نرم‌افزارهای قدرتمند و پیشرفته در زمینه مهندسی است. این نرم‌افزار، کد رایانه‌ای المان محدود قوی برای تغییر شکل‌های بزرگ دینامیکی با سرعت بالا ارائه می‌دهد.

لوله‌های مربعی و دایروی با استفاده از المان پوسته‌ای¹ به طول $L=350\text{mm}$ ، ضخامت $t=1/6\text{mm}$ ، طول ضلع مربع $A=25\text{mm}$ و قطر دایره $D=25\text{mm}$ شبیه‌سازی شده‌اند (شکل 4).

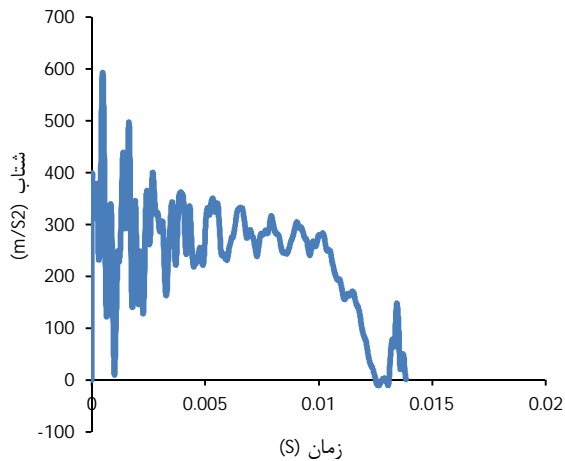
تکیه‌گاه‌ها و سنبه با استفاده از نیم‌استوانه‌هایی به قطر 30mm و طول 50mm و بکارگیری المان پوسته به صورت صلب مدل‌سازی شدند. برای اتصال تکیه‌گاه‌ها و لوله از قید تماسی صفحه به صفحه² با ضریب



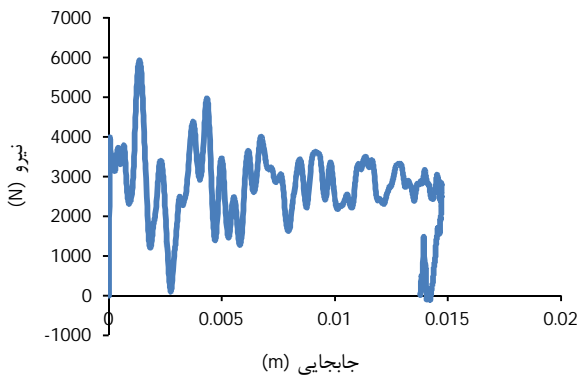
شکل 4 مدل هندسی لوله آلومینیومی توخالی با سطح مقطع مربعی

3- Node

1- Shell Element
2- Surface to Surface Contact

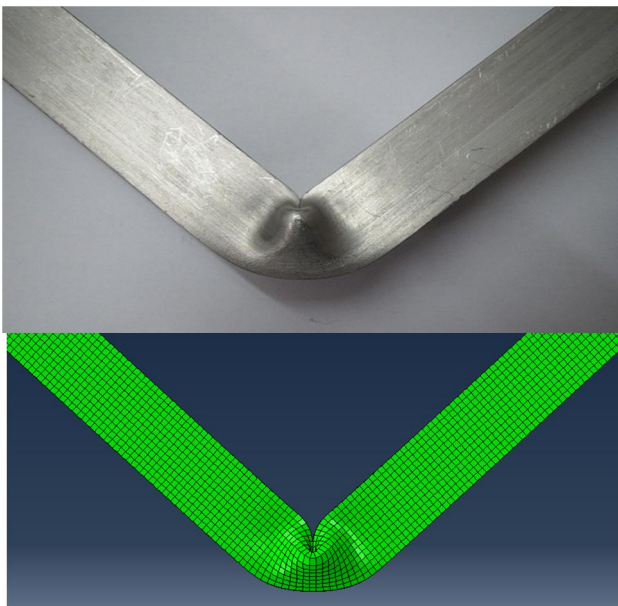


الف- نمودار شتاب لحظه‌ای بر حسب زمان



ب- نمودار نیرو بر حسب جابه‌جایی

شکل 7 نمودارهای شتاب-زمان و نیرو-جابه‌جایی مربوط به لوله مربعی توپر تحت ضربه وزنه‌ای به جرم 10 کیلوگرم و سرعت اولیه 2/9 متر بر ثانیه



شکل 8 نحوه تغییر شکل لوله مربعی آلومینیومی توخالی

جدول 1 ورودی‌های نرم‌افزار جهت مدل‌سازی

ابعاد		المان‌بندی		
طول	مقطع	تعداد	نوع	
350mm	به ضلع 25mm	3744	S4R	لوله مربعی
350mm	به قطر 25mm	3042	S4R	لوله دایروی
350mm	به ضلع 25mm	5733	C3D8R	فوم پرکننده لوله مربعی
350mm	به قطر 25mm	7020	C3D8R	فوم پرکننده لوله دایروی
50mm	نیم استوانه به قطر 25mm	255	R3D4	سنجه‌وتکیه‌گاهها

4- نتایج و بحث

4-1- نتایج آزمایش‌های کشش لوله‌های آلومینیومی

با انجام تست کشش بر روی لوله‌های آلومینیومی دایروی و مربعی خواص مکانیکی آن‌ها برای استفاده در مدل‌سازی ماده به صورت جدول 2 به دست آمد.

همچنین با انجام تست فشار بر روی فوم پلی‌اورتان خواص مکانیکی مورد نیاز برای شبیه‌سازی عددی به صورت: مدول الاستیسیته $E=0.12 \text{ Gpa}$ و تنش تسلیم فشاری $\sigma = 4.7 \text{ Mpa}$ به دست آمد.

4-2- نتایج آزمایش‌های انجام شده توسط دستگاه سقوط وزنه

شکل‌های 7، به ترتیب نمودارهای شتاب لحظه‌ای بر حسب زمان، نیرو بر حسب جابه‌جایی برای لوله مربعی را از لحظه برخورد وزنه با ستون تا انتهای پروسه فرورفتگی نشان می‌دهند.

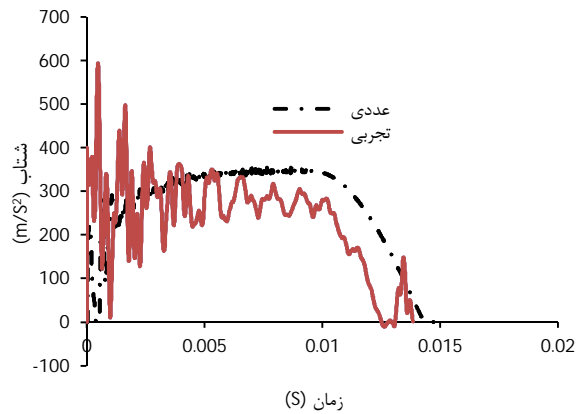
همان‌گونه که مشاهده می‌شود، به دلیل اینکه فرکانس طبیعی در حالت تجربی فعال می‌باشد منحنی دارای حالت نوسانی است که ناشی از ضربه وارده بر لوله است و دامنه نوسان با گذشت زمان به دلیل استهلاک انرژی کاهش می‌یابد و پس از گذشت مدت زمانی شتاب سیر نزولی پیدا کرده و در لحظه‌ای خاص برابر صفر می‌شود.

4-3- مقایسه بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی

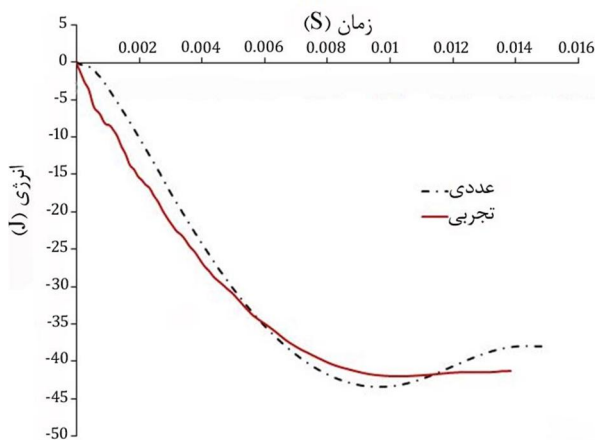
مقایسه بین نتایج تجربی و عددی با توجه به شکل ظاهری در شکل‌های 8 تا 11 و هم از طریق تحلیل داده‌ها انجام گرفت. شکل 8 نحوه تغییر شکل لوله مربعی توخالی ناشی از بارگذاری تجربی و عددی را نشان می‌دهد. در شکل 9 تغییر شکل لوله مربعی توخالی در اثر سقوط وزنه نشان داده شده و شکل‌های 10 و 11 به ترتیب تغییر شکل لوله دایروی توپر در اثر سقوط وزنه و بارگذاری ثابت را نشان می‌دهد. شکل‌های 12 و 13 به ترتیب نمودارهای شتاب لحظه‌ای بر حسب زمان و انرژی بر حسب زمان را برای لوله مربعی توپر که تحت ضربه وزنه‌ای به جرم 10 کیلوگرم و سرعت $2/9 \text{ m/s}$ می‌باشد، برای مقایسه نتایج تجربی و عددی ارائه می‌دهند.

جدول 2 خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم

مقطع	E	σ_y	σ_u	ν
مربعی	29GPa	96MPa	157MPa	0/3
دایروی	24GPa	72MPa	109MPa	0/3



شکل 12 نمودار مقایسه نتایج تجربی و عددی شتاب لحظه‌ای بر حسب زمان لوله مربعی توپر

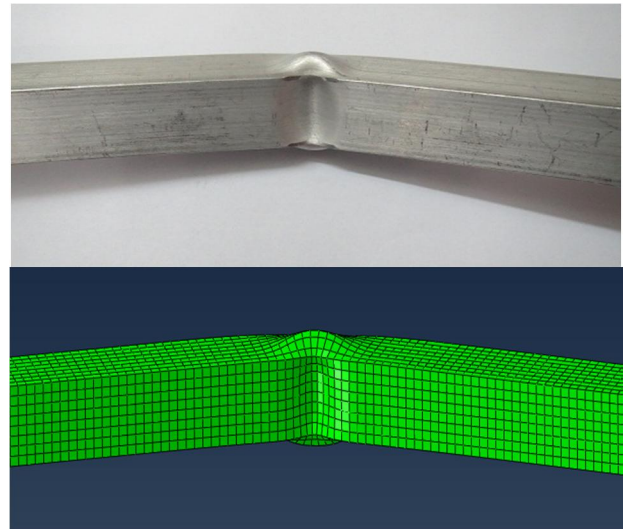


شکل 13 نمودار مقایسه نتایج تجربی و عددی انرژی بر حسب زمان لوله مربعی توپر

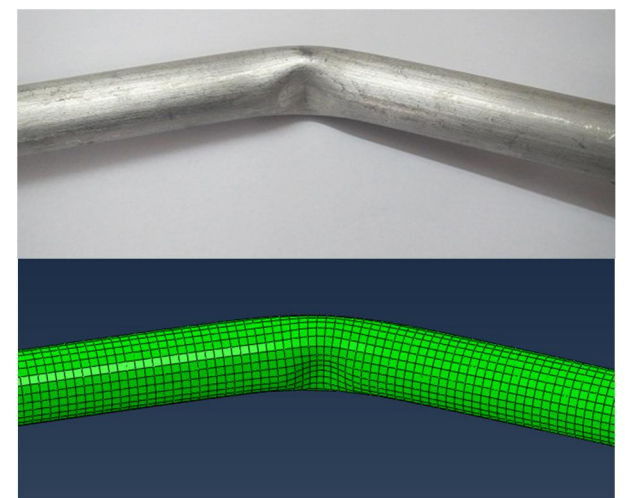
همان‌طور که در بخش قبل بیان شد، به دلیل این‌که فرکانس طبیعی در حالت تجربی فعال می‌باشد نمودار شتاب- زمان حاصل از تست تجربی دارای حالت نوسانی همراه با استهلاک می‌باشد، ولی در نمودار تحلیل عددی به دلیل این‌که در نرم‌افزار به صورت پیش‌فرض ترم ارتعاشی غیرفعال است و تنها چند مود اول فعال است، این نوسانات فقط در زمان‌های بسیار کوچکتر نمود پیدا می‌کنند. با توجه به این‌که هدف بررسی میزان جذب انرژی است که از سطح زیر نمودار نیرو- جابه‌جایی حاصل می‌شود و این نوسانات تأثیری بر سطح زیر نمودار ندارد، بنابراین میزان جذب انرژی در هر دو نمودار با هم مطابقت دارد.

بررسی حداکثر تغییر شکل در هر دو نمودار تجربی و عددی نسبتاً یکسان است.

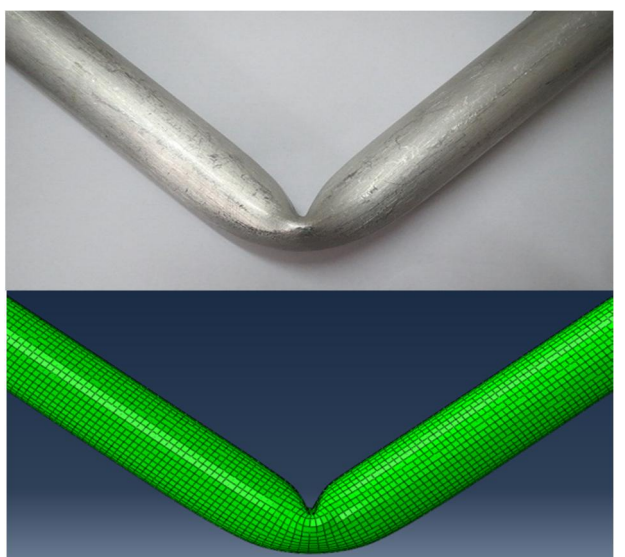
در نرم‌افزار آباکوس به صورت پیش‌فرض فقط یک مود انبساطی¹ و یا انبساطی فعال است. در لوله مربعی چون سطح مقطع دارای لبه می‌باشد در تغییر شکل‌های زیاد در نرم‌افزار تغییر مود به حالت انبساطی رخ می‌دهد که 15-17 درصد جذب انرژی بیشتری دارد، همین امر باعث افزایش مقدار نیرو در جابه‌جایی‌های بالا می‌باشد، در صورتی که در اکثر سازه‌ها، هر دو مود با هم فعال هستند، مود انبساطی درصد وزنی کمی دارد و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد [22].



شکل 9 شکل هندسی لوله مربعی تو خالی پس از سقوط وزنه



شکل 10 شکل هندسی نمونه دایروی پر شده با فوم پس از تست سقوط وزنه



شکل 11 نحوه تغییر شکل لوله دایروی آلومینیومی پر شده از فوم پلی‌اورتان

با مقایسه هر جفت نمودار روی این چهار شکل مشخص می‌شود که پرکردن لوله‌ها از فوم پلی‌اورتان باعث افزایش مقدار متوسط نیرو در دیاگرام مربوطه می‌شود و به این ترتیب سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی با تزریق فوم درون لوله افزایش می‌یابد و در نتیجه انرژی جذب شده توسط سازه در مقایسه با نمونه مشابه توخالی آن افزایش می‌یابد. علت این افزایش را می‌توان به دلیل مقاومت فوم پلی‌اورتان درون لوله در مقابل تغییر شکل عرضی لوله دانست. به عبارتی دیگر وجود فوم باعث می‌شود که یک نیروی مقاوم عرضی از داخل، در دیواره‌های لوله اعمال شود. بنابراین مقدار نیروی عرضی لوله‌های پر شده از فوم بیشتر از لوله‌های توخالی است. از طرفی، تزریق فوم درون لوله باعث کاهش یافتن میزان تغییر مکان عرضی به ازای جذب انرژی یکسان در لوله می‌شود که دلیل آن نیز سفتی ناشی از مقاومت فوم به فشردگی است.

در اثر برخورد وزنه به جرم 5 کیلوگرم بر لوله‌های دایروی (شکل 14)، جابه‌جایی عرضی لوله توخالی 19/4 mm و جابه‌جایی لوله توپر 16/3 mm است. مقایسه این مقادیر نشان می‌دهد که با پر کردن سازه از فوم پلی‌اورتان، جرم سازه 44% افزایش یافته و میزان تغییر شکل عرضی آن در ازای میزان جذب انرژی یکسان، 19% کاهش یافته است و به ازای جابه‌جایی یکسان 16/3 mm، انرژی جذب شده در لوله توخالی 18/3 J و در لوله توپر 22/5 می‌باشد. بنابراین انرژی جذب شده در لوله توپر 23% افزایش یافته است و همچنین مقدار حداکثر نیرو در لوله توپر 1/28 برابر لوله توخالی است. بدین ترتیب، نسبت جذب انرژی ویژه (نسبت جذب انرژی به وزن سازه) در دو لوله دایروی توپر به توخالی 0/85 می‌باشد.

در اثر برخورد وزنه به جرم 10 کیلوگرم بر لوله‌های مربعی (شکل 15)، جابه‌جایی عرضی لوله توخالی 16/75mm و جابه‌جایی لوله توپر 15/4mm می‌باشد. بنابراین به ازای جذب انرژی یکسان میزان تغییر شکل عرضی لوله پر شده با فوم 8% کاهش یافته و به ازای جابه‌جایی یکسان 15/4mm، انرژی جذب شده در لوله توخالی 38/6 J و در لوله توپر 43/8 می‌باشد. بنابراین انرژی جذب شده در لوله توپر 13% افزایش یافته است و همچنین مقدار حداکثر نیرو در لوله توپر تقریباً برابر لوله توخالی است. بدین ترتیب، نسبت جذب انرژی ویژه در دو لوله مربعی توپر به توخالی 0/79 است.

همان‌طور که از نتایج به دست آمده است، پیداست پرکردن لوله‌ها همواره باعث جذب انرژی بیشتر می‌شود ولی نسبت جذب انرژی در انرژی‌های مختلف متفاوت است. به طوری‌که با افزایش میزان انرژی نسبت جذب انرژی در مقاطع توپر بیشتر می‌شود.

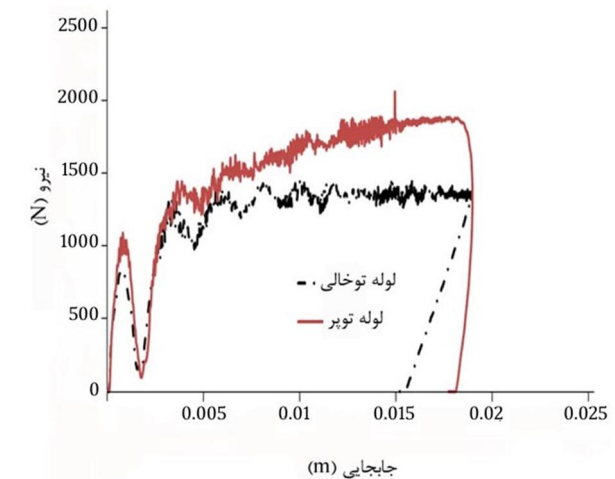
در انرژی‌های پایین‌تر جذب انرژی ویژه که نسبت جذب انرژی به وزن سازه است، کوچک بوده و با افزایش میزان انرژی وارده به سازه این نسبت افزایش می‌یابد. میزان حداکثر نیروی وارده به سازه که یکی از پارامترهای طراحی می‌باشد با پرکردن لوله افزایش می‌یابد. بزرگ بودن این نیرو نشان دهنده وارد شدن نیروی بیشتر به تکیه‌گاه‌ها و سازه‌ای می‌باشد که ضربه‌گیر روی آن نصب است. مشخص است که با افزایش میزان انرژی وارده، حداکثر نیروی وارده به سازه نیز افزایش می‌یابد.

جذب انرژی ویژه در لوله‌های توپر نسبت به توخالی همواره کوچکتر می‌باشد که این مقدار در لوله‌های مربعی کوچکتر از دایروی است. نسبت جذب انرژی ویژه در حالت توخالی و توپر کوچکتر از یک می‌باشد، یعنی پرکردن لوله از نظر محدودیت وزنی به صرفه نیست ولی با توجه به این که در جابه‌جایی یکسان، لوله توپر انرژی بیشتری جذب می‌کند، در انرژی‌های بالا کاربردی‌تر است.

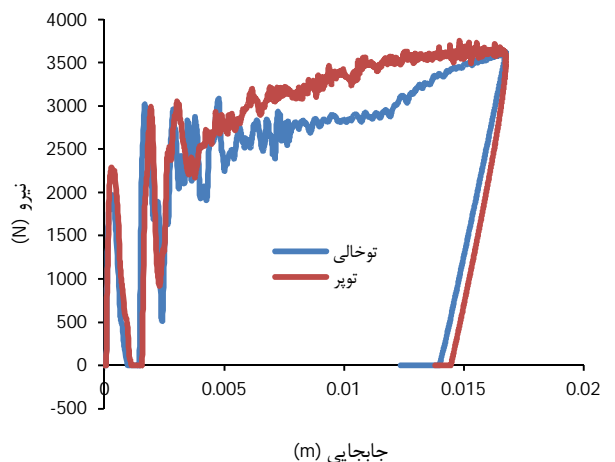
در نمودار انرژی، شکل 13، مشاهده می‌شود که در حالت عددی پس از این که انرژی جذب شده توسط سازه به حداکثر مقدار خود می‌رسد، مقداری برگشت رخ می‌دهد که دلیل آن تغییر شکل الاستیک لوله است، در صورتی که در نمودار تجربی این برگشت مشاهده نمی‌شود که دلیل آن جدا شدن سمبه از لوله در هنگام برگشت می‌باشد و چون داده‌برداری از سمبه انجام می‌شود، این برگشت ثبت نمی‌شود، اما در مجموع مقدار حداکثر انرژی با هم، هم‌خوانی خوبی دارند.

4-4- مقایسه سازه‌های توخالی و پر شده از فوم

شکل 14 نمودار نیروی لحظه‌ای بر حسب تغییر مکان عرضی برای لوله دایروی در دو حالت توخالی و پر شده از فوم پلی‌اورتان را در حالت بارگذاری دینامیکی نشان می‌دهد. سرعت ضربه 2/9m/s و جرم ضربه‌زننده 5 کیلوگرم است. شکل 15 نیز نمودار نیروی لحظه‌ای بر حسب تغییر مکان عرضی لوله مربعی در دو حالت توخالی و پر شده از فوم پلی‌اورتان با سرعت ضربه 2/9m/s و جرم ضربه‌زننده 10 کیلوگرم نشان می‌دهند.



شکل 14 نمودار نیروی لحظه‌ای بر حسب جابه‌جایی لوله دایروی توپر و توخالی با جرم ضربه زننده 5 کیلوگرم



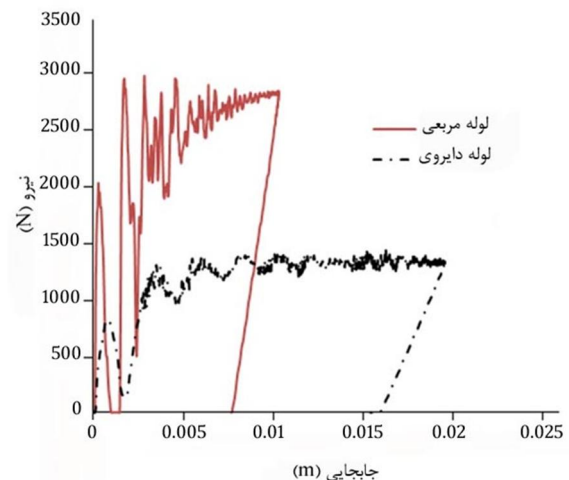
شکل 15 نمودار نیروی لحظه‌ای بر حسب جابه‌جایی لوله مربعی توپر و توخالی با جرم ضربه زننده 10 کیلوگرم

4-5- مقایسه سطح مقطع دایروی و مربعی

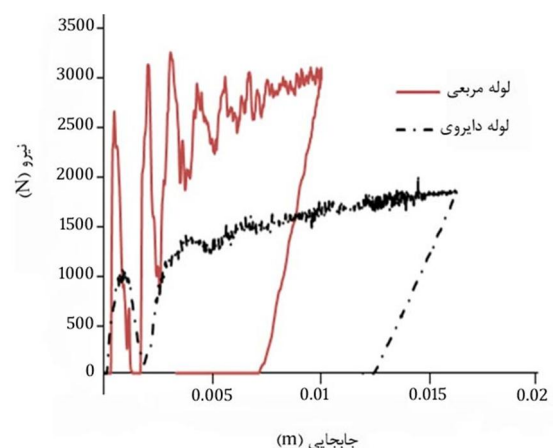
شکل‌های 16 و 17 نمودار نیروی لحظه‌ای بر حسب تغییر مکان عرضی رابرای لوله‌های دایروی و مربعی به ترتیب برای حالت‌های توخالی و پر شده از فوم پلی‌اورتان، تحت برخورد وزنه 5 کیلوگرمی با سرعت 2/9 m/s نشان می‌دهد.

با توجه به این نمودارها به ازای جذب انرژی یکسان، لوله مربعی تغییر شکل کمتری دارد، ولی میزان نیروی وارده به سازه در آن بالاتر است. بنابراین در لوله دایروی تغییر شکل عامل مؤثرتر در جذب انرژی بوده و با تغییر شکل زیاد، نیروی جذب شده در سطح پایین‌تری باقی می‌ماند. ولی در لوله مربعی تغییر شکل کمتری رخ می‌دهد و برای جذب انرژی بالاتر نیروی بیشتری توسط سازه تحمل می‌شود.

در حالت توپر و توخالی، لوله مربعی حدوداً 100 درصد انرژی بیشتری نسبت به لوله دایروی جذب می‌کند. جذب انرژی ویژه در لوله‌های مربعی نسبت به لوله‌های دایروی در جابه‌جایی یکسان همواره بیشتر می‌باشد که ناشی از وجود خطوط شکست ناشی از شکل مقطع مربعی در طول لوله است و باعث استحکام بالاتر لوله مربعی و در نتیجه جذب انرژی بیشتر می‌شود.



شکل 16 نمودار نیروی لحظه‌ای بر حسب جابه‌جایی لوله مربعی و دایروی توخالی با جرم ضربه زننده 5 کیلوگرم



شکل 17 نمودار نیروی لحظه‌ای بر حسب جابه‌جایی لوله مربعی و دایروی توپر با جرم ضربه زننده 5 کیلوگرم

همین نیز عامل کاهش خیز در لوله دایروی نسبت به لوله مربعی می‌شود. بنابراین با توجه به این پارامتر، لوله مربعی کارایی بهتری در جذب انرژی نسبت به دایروی دارد.

در حالت توخالی و توپر حداکثر نیرو در لوله مربعی تقریباً 2 برابر لوله دایروی است و همچنین میزان جذب انرژی نیز دو برابر می‌باشد. جابه‌جایی لوله دایروی همواره تقریباً 2 برابر لوله مربعی است.

5- نتیجه‌گیری

با توجه به مباحث مطرح شده می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که: در انرژی‌های کوچک (حدود 23 J)، نسبت جذب انرژی ویژه لوله توخالی به لوله توپر حدود 15 تا 20 درصد بالاتر است و در جایی که وزن سازه اهمیت دارد، می‌توان این پارامتر را مدنظر قرار داد. در انرژی‌های بالاتر (حدود 60 J) و یا در مکان‌هایی که محدودیت جابه‌جایی ضربه‌گیر وجود دارد، لوله‌های توپر به دلیل جابه‌جایی کمتر و قابلیت جذب انرژی بیشتر و با توجه به اینکه جذب انرژی ویژه در این حالت در لوله توپر تقریباً 20 درصد بالاتر از لوله توخالی است لوله‌های توپر کاربرد بهتری دارند. لوله دایروی نسبت به مربعی در انرژی‌های پایین‌تر کارایی بهتری دارد ولی جابه‌جایی آن بیشتر است. در انرژی‌های بالا جذب انرژی ویژه لوله مربعی حدود 50 درصد بالاتر از لوله دایروی است؛ بنابراین در صورتی که انرژی وارده بر سازه در اثر تصادف کم باشد، استفاده از لوله‌های دایروی بهتر است، زیرا نیروی کمتری به سازه منتقل می‌کند، و در انرژی‌های بالاتر برخورد، لوله‌های مربعی کاربردی‌تر بوده و جذب انرژی بهتری دارند و اثر وجود فوم نیز باعث افزایش میزان جذب انرژی می‌شود.

6- مراجع

- [1] L. Mirfendereski, M. Salimi, S. Ziaei-Rad, Parametric study and numerical analysis of empty and foam-filled thin-walled tubes under static and dynamic loadings, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 50, No. 6, pp. 1042-1057, 2008.
- [2] Z. Ahmad, D.P. Thambiratnam, A.C.C. Tan, Dynamic energy absorption characteristics of foam-filled conical tubes under oblique impact loading, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, No. 5, pp. 475-488, 2010.
- [3] W. Abramowicz, Thin-walled structures as impact energy Absorbers, *Thin-Walled Structures*, Vol. 41, No. 2, pp. 91-107, 2003.
- [4] R. Wang, L.Hai Han, Chuan-Chuan Hou, Behavior of concrete filled steel tubular (CFST) members under lateral impact: Experiment and FEA model, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 80, pp. 188-201, 2013.
- [5] P. Hernalsteen, L.C. Leblois, The use of enegy absorbers to protect structures against impact loading, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 37, No. 3, pp. 373-406, 1976.
- [6] C.G. Karroum, S.R. Reid, S. Li, Indentation of ring-stiffened cylinders by wedge-shaped indenters—Part 1: An experimental and finite element investigation, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 49, No. 1, pp. 13-38, 2007.
- [7] A. Alavi Nia, H. Badnava, Kh. Fallah Nejad, An experimental investigation on crack effect on the mechanical behavior and energy absorption of thin-walled tubes, *Materials and Design*, Vol. 32, No. 6, pp. 3594-3607, 2011.
- [8] S. V. Hosseini, J. Zamani, A. Darvize, M. Soleimani, An experimental and numerical analysis of mechanical and geometrical characteristics effect on crush loading of square energy absorbers under axial loading, *Mechanic and Aero Space*, Vol. 2, No. 2, 1385. (In Persian)
- [9] D. Kecman, 1983. Bending collapse of rectangular and square section tubes, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 25, No. 9 10, 0020-7403, pp. 23 636, 1983.
- [10] S. G. Thomas, S. R. Reid and W. Johnson, Large deformations of thin-walled circular tubes under transverse loading-I, *Int. L Mechanical Science*, Vol. 18, No. 6, pp. 325-333, 1976.
- [11] N. K. Gupta, Collapse of a laterally compressed square tube resting on a flate base, *Int. J. Solid Srrucurrs*, Vol. 26., No. 5'6, pp. 601-615, 1989.
- [12] S.Santosa, J. Banhart, T. Wierzbicki, *Bending crush behavior of foam-filled sections*, 1999.
- [13] N.K.Gupta,P.Ray, Simply supported empty and filled thin-square-tubular beams under central wedge loading, *Thin-walled Structures*, Vol. 34, No. 4, pp. 261-278, 1999.

- [18] Z. Zhang, Sh. Liu, Zh. Tang, Design optimization of cross-sectional configuration of rib-reinforced thin-walled beam, *Thin-walled structures*, Vol. 47, No. 8, pp. 868-878, 2009.
- [19] H. Arabzadeh, M. Zeinoddini, Dynamic Response of Pressurized Submarine Pipelines Subjected To Transverse Impact Loads, *Procedia Engineering*, Vol. 14, pp. 648-655, 2011.
- [20] ASTM E8/E8M-09, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*.
- [21] ASTM D1621-10, *Standard Test Methods for Compressive properties of Rigid cellular plastics*.
- [22] T. Wierzbicki, W. Abramowicz, T. Gholami, and L. Recke. Stress profiles in thin-walled prismatic columns subjected to crush loading-H. *Bending. Comp'UJ.ter-s flj Struct'ures*, Vol. 51, No. 6, pp. 624-640, 1994.
- [14] S.A.Karamanos, Ch.Eleftheriadis, Collapse of pressurized elastoplastic tubular members under lateral loads, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 46, No. 1, pp. 35-56, 2004.
- [15] S. A. Karamanos, Kyros P. Andreadakis, Denting of internally pressurized tubes under lateral loads, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 48, No. 10, pp. 1080-1094, 2006.
- [16] Y. Liu, M. L. Day, Bending collapse of thin-walled circular tubes and computational application, *Thin-Walled Structures*, Vol. 46, No. 4, pp. 442-450, 2008.
- [17] H.R. Zarei, M. Kroger, Bending behavior of empty and foam-filled beams: Structural optimization, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, No. 6, pp. 521-529, 2008.