

طراحی ضربه‌گیر به کمک بررسی رفتار فروریزش محوری لوله‌های متقارن محوری

سجاد آذرخش^۱، علی‌رضا نظام‌آبادی^{۲*}

۱- باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

چکیده

طراحی و بررسی رفتار جاذب‌های انرژی یکی از موضوع‌های مهم در صنایع می‌باشد. سازه‌های لوله‌ای جدارنازک فلزی یکی از انواع پرکاربرد جاذب‌های انرژی است که همواره پیش‌بینی نحوه فروریزش و تعیین میزان جذب انرژی در آن‌ها مورد توجه پژوهشگران بوده است. در این مقاله طراحی ضربه‌گیر به کمک بررسی رفتار فروریزش محوری لوله‌های متقارن محوری به صورت عددی ارائه شده است. در ابتدا مدل اجزاء محدودی برای خواص مکانیکی مواد ساخته می‌شود و با داده‌های تجربی صحت‌گذاری می‌شود. سپس مدلی برای لوله جدارنازک تحت بارگذاری محوری اتخاذ می‌شود. مقایسه نشان می‌دهد نتایج اجزاء محدود تطابق قابل قبولی با نتایج تجربی دارد. سپس از مدل صحت‌گذاری شده برای بررسی لوله‌های متقارن محوری با مقاطع مختلف و مطالعه پارامتری بهترین هندسه تحت بارگذاری محوری استفاده می‌شود. در مجموع ۷ مدل عددی با هندسه متفاوت تهیه و رفتار فروریزشی این هندسه‌ها به صورت متقارن محوری شبیه‌سازی شده است. مقایسه نتایج میزان انرژی جذب شده و نیروی بیشینه فروریزش هندسه‌های مختلف نشان می‌دهد که لوله مخروطی با درپوش کروی دارای عملکرد بهتری نسبت به دیگر هندسه‌ها است. بنابراین مطالعه پارامتری برای تعیین اثر پارامترهای مختلف مانند شعاع بخش کروی، زاویه نیم‌رأس، ضخامت و دانسیته فوم بر روی این هندسه انجام شده است. نتایج این مطالعه، اطلاعات پژوهشی جدیدی است که طراحی لوله‌های جدارنازک متقارن محوری را به عنوان جاذب انرژی در کاربرد برخورد تسهیل می‌کند.

کلمات کلیدی: لوله‌های متقارن محوری، جذب انرژی، روش اجزاء محدود، فروریزش محوری، برخورد

شناسه دیجیتال:	سابقه مقاله:				
	دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ
10.22065/jsce.2018.120483.1479					
doi:					
https://10.22065/jsce.2018.120483.1479	۱۳۹۶/۱۲/۰۵	۱۳۹۷/۰۴/۰۲	۱۳۹۷/۰۵/۱۶	۱۳۹۹/۰۱/۱۵	۱۳۹۹/۰۱/۱۵
*نویسنده مسئول: علی‌رضا نظام‌آبادی					
پست الکترونیکی: A-Nezamabadi@iau-arak.ac.ir					

Crashworthiness Design Using to Investigation of Axial Crushing Behaviour of Axisymmetric Tubes

Sajad Azarakhsh¹, Alireza Nezamabadi^{2*}

1- Young Researchers and Elite Club, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.

2- Assistant Prof, Department of Mechanical engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran

ABSTRACT

Designing and studying the energy absorption behaviour is one of the important subjects in the industries. The thin-walled metal tube structures are one of the most widely used types of energy absorbers that have always been considered by researchers for predicting how to crushing behaviour and determine the amount of energy absorbed by them. A numerical study of crashworthiness design using to investigation of axial crushing behaviour of axisymmetric tubes is presented in this paper. First, a Finite Element (FE) model for material properties was constructed and validated by experimental data. Next, a model for the thin-walled tube under axial loading was adopted. The comparison between the FE results as well as the experimental results showed good agreements. The validated FE model was then used to investigate axisymmetric thin-walled tubes with different cross-section and parametric studies of best geometry under axial loading. Making a totally 7 different geometries and the collapse behaviour of the absorbent geometries then has been simulated. A comparison of energy absorption results and maximum crushing load between the different geometries show that conical tubes with shallow spherical caps are better than others. So, the parametric studies were carried out to determine the effect of different parameters such as the spherical region radius, semi-apical angle, thickness and foam density on crushing behaviour of this geometry. The outcomes of the study are new research information which will facilitate the design of axisymmetric thin-walled tubes as energy absorbers in crushing applications.

ARTICLE INFO

Receive Date: 24 February 2018

Revise Date: 23 June 2018

Accept Date: 07 August 2018

Keywords:

Axisymmetric Tubes

FEM

Axial loading

Energy absorption

Crushing

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.120483.1479

*Corresponding author: Alireza Nezamabadi.

Email address: A-Nezamabadi@iau-arak.ac.ir

۱- مقدمه

یکی از مباحث مهم در علم مکانیک (مکانیک ضربه)، طراحی و تحلیل جاذب‌های انرژی است. یکی از انواع جاذب‌های انرژی، لوله‌های جدارنازک فلزی می‌باشد. هنگام تحلیل این جاذب‌های فلزی تعیین میزان جذب انرژی و نحوه فروریزش آن‌ها ضروری است. با توجه به اینکه رفتار فروریزش این نوع جاذب‌های فلزی قابل پیش‌بینی نیست در دهه‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای بر روی تحلیل این سازه‌ها تحت بارگذاری محوری صورت گرفته است.

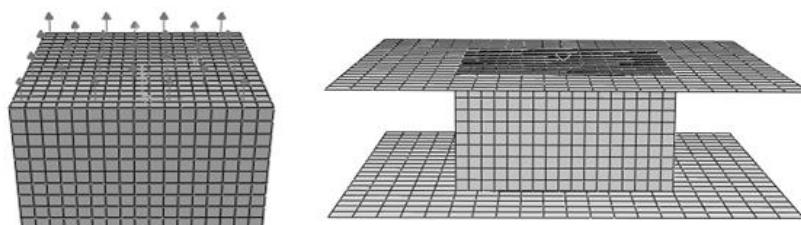
قمریان و ابدی [۱] به صورت عددی و تجربی نحوه فروریزش و میزان جذب انرژی ضربه‌گیرهای استوانه‌ای دهانه بسته را تحت بارگذاری محوری بررسی نمودند. نتایج این مطالعه نشان داد که نیروی اولیه ضربه‌گیرهای دهانه بسته توخالی و تقویت شده با فوم ۲۰ تا ۳۰ درصد کمتر از ضربه‌گیرهای دهانه باز است. در همان سال قمریان و همکارانش [۲] اثر چگالی فوم را بر جذب انرژی لوله‌های مخروطی دهانه بسته تحت بارگذاری محوری بررسی نمودند. نتایج نشان داد که انرژی جذب شده لوله‌های پر شده با فوم بیشتر از مجموع انرژی‌های لوله توخالی و فوم پر شده در آن است. قمریان و زارعی [۳] فروریزش محوری لوله‌های استوانه‌ای و مخروطی دهانه بسته را به منظور یافتن هندسه‌ای با بیشینه انرژی ویژه جذب شده بررسی کردند. قمریان و همکاران [۴] به بررسی عددی و آزمایشگاهی فروریزش محوری لوله‌های مخروطی با درپوش کرومی تقویت شده با فوم پلی‌یورتان پرداختند که در آن اثر پارامترهای ابعادی مؤثر بر فرآیند فروریزش (زاویه نیم‌راس، ضخامت و غیره) مورد بررسی قرار گرفت. زارعی و قمریان [۵] به روش تجربی و عددی فروریزش محوری لوله‌های مخروطی و استوانه‌ای با درپوش کرومی توخالی و تقویت شده با فوم را مقایسه کردند. تطابق قابل ملاحظه‌ای بین شیوه‌ی فروریزش، نمودار نیرو-جابجایی و انرژی ویژه جذب شده نتایج عددی و آزمایشگاهی مشاهده گردید. آذرخش و همکاران [۶] به بررسی تجربی و عددی رفتار فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای دوجداره توخالی و پر شده با فوم تحت بارگذاری محوری پرداختند. در این تحقیق اثر عوامل هندسی نظیر ضخامت، زاویه نیم‌راس و همچنین سرعت و جرم برخورد کننده بر نسبت انرژی جذب شده دینامیکی به استاتیکی مورد بررسی قرار گرفت. آذرخش و همکاران [۷] به بررسی تجربی و عددی جذب انرژی لوله‌های جدارنازک مخروطی تک‌داره تحت بارگذاری محوری و میل پرداختند. در این تحقیق اثر پارامترهای مختلف از جمله زاویه‌ی نیم‌راس، زاویه‌ی بارگذاری و وجود فوم درون لوله بر میزان جذب انرژی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین اثر سرعت برخورد کننده بر میزان جذب انرژی لوله‌های توخالی و پر شده با فوم نیز از دیگر نتایج این تحقیق بود. براساس پژوهش‌های انجام شده [۸-۱۰]، نحوه فروریزش و میزان جذب انرژی در ضربه‌گیرهای فلزی جدارنازک وابستگی زیادی به پارامترهای هندسی (ضخامت، قطر و ...)، مشخصات ماده (جنس، استحکام تسلیم و ...) و مشخصات تحریک (سرعت و زاویه‌ی بارگذاری) دارد.

در مطالعه حاضر، به منظور طراحی یک ضربه‌گیر فروریزشی، رفتار سازه‌های جدارنازک متقارن محوری توسط نرم‌افزار اجزای محدود بررسی می‌شود. در ابتدا رفتار مکانیکی مواد استفاده شده با مقایسه نتایج عددی و تجربی صحت‌گذاری شده و سپس مدلی برای شبیه‌سازی فرآیند فروریزش یک سازه جدارنازک تحت بارگذاری محوری ارائه می‌شود و رفتار لهدیگی آن با حالت تجربی پیشین مقایسه می‌شود. تطابق قابل ملاحظه‌ی نمودار نیرو-جابجایی فروریزش این سازه در حالت شبیه‌سازی و تجربی بیانگر صحت مدل ارائه شده است. با توجه به صحت‌گذاری شبیه‌سازی، هندسه‌های مختلف متقارن محوری تحت بارگذاری محوری بررسی می‌شود که پس از مقایسه میزان جذب انرژی و نیروی بیشینه‌ی آن‌ها طرح نهایی انتخاب می‌شود. در نهایت نیز اثر پارامترهای ابعادی و همچنین فوم تقویت کننده با دانسیته‌های مختلف بر رفتار فروریزش طرح منتخب مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- روش تعریف رفتار غیرخطی مواد در فرآیند فروریزش

شکل ۱ مدل مورد استفاده برای شبیه‌سازی رفتار مکانیکی ورق تخت آلومینیوم و فوم پلی‌یورتان را در دستگاه کشش و فشار نشان می‌دهد. در این مطالعه به منظور مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس بهره گرفته شده است. در این نرم‌افزار، رفتار الاستیک خطی ماده آلومینیوم و فوم پلی‌یورتان با استفاده از مدول الاستیسیته و ضریب پواسون تعریف می‌شوند. مدول الاستیسیته برای آلومینیوم و فوم پلی‌یورتان با دانسیته ۱۴۵ کیلوگرم بر مترمکعب براساس نتایج تجربی به ترتیب برابر ۵۵/۷ گیگاپاسکال و ۲۸/۳۲

مگاپاسکال گزارش شده است [۲]. همچنین در تحقیق حاضر، ضریب پواسون در ناحیه‌ی خطی برای آلومینیوم و فوم پلی‌یورتان به ترتیب 0.3 و 0 در نظر گرفته شده است. از طرفی دیگر، برای معرفی ناحیه‌ی پلاستیک آلومینیوم و فوم پلی‌یورتان به ترتیب منحنی تنش حقیقی- کرنش پلاستیک نمونه‌های کشش و فشار استفاده می‌شود.

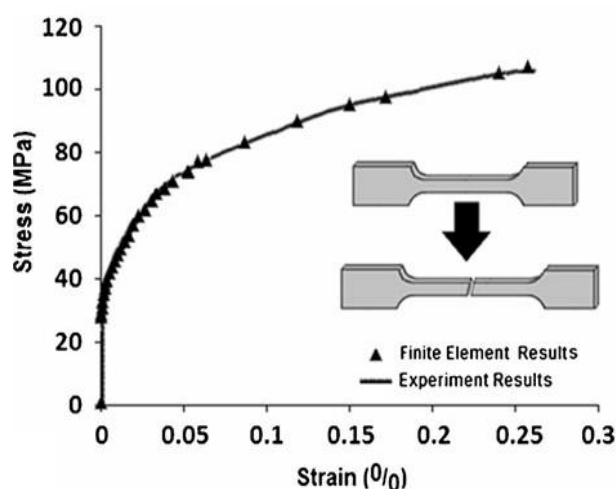


شکل ۱: مدل مورد استفاده برای شبیه‌سازی رفتار مکانیکی الف- فوم پلی‌یورتان و ب- ورق تخت آلومینیوم

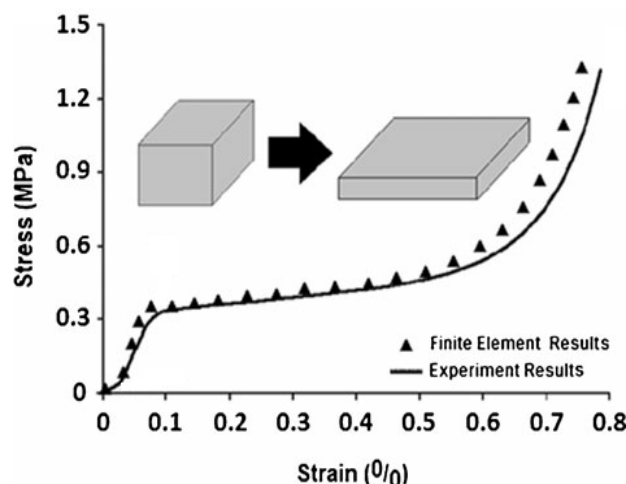
به طور کلی، در نرم‌افزار اجزاء محدود مدل‌های پلاستیسیته و فوم تغییر شکل یافته به ترتیب برای نمونه‌های آلومینیوم و فوم پلی‌یورتان استفاده می‌شود. در تحقیق حاضر برای مدل فوم تغییر شکل یافته با توجه به دانسیته‌ی کم فوم پلی‌یورتان، نسبت تنش تسلیم و نسبت ضریب پواسون پلاستیک صفر در نظر گرفته شده است [۲]. همان‌طور که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود، برای تحلیل رفتار فوم پلی‌یورتان تحت بارگذاری فشاری، سطح صلب تحتانی به فک ثابت دستگاه متصل است. پس کلیه‌ی درجات آزادی آن مقید می‌شود. از طرف دیگر، سطح صلب فوقانی به فک متحرک متصل است که کلیه‌ی درجات آزادی آن غیر از جابه‌جایی در راستای محور فوم مقید شده است. برای شبیه‌سازی این رفتار از المان مکعبی C3D8 استفاده شده است. این المان سه‌بعدی با توزیع خطی است که ۸ گره دارد. شکل ۲ و ۳ نتایج شبیه‌سازی رفتار مکانیکی آلومینیوم و فوم پلی‌یورتان با دانسیته‌ی ۱۴۵ کیلوگرم بر مترمکعب را با نتایج تجربی مقایسه می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود که بین نتایج عددی و تجربی کشش و فشار نمونه‌های آلومینیوم و فوم پلی‌یورتان خطای کمی وجود دارد که علل وجود اختلاف نتایج تجربی و تحلیل عددی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد.

الف) خطا در ساخت فوم: وجود خطا در نسبت یک به یک فوم‌های دو جزیی فوم پلی‌یورتان باعث ایجاد خطا در دانسیته‌ی نسبی فوم پلی‌یورتان و تعیین خواص مکانیکی این فوم‌ها می‌شود. در نرم‌افزار ساختار همگن برای ماده‌ی پلی‌یورتان تعریف شده است.

ب) فرض خواص همسانگرد در کل فرآیند تغییر شکل فوم پلی‌یورتان: در شبیه‌سازی حاضر برخلاف واقعیت خواص فوم پلی‌یورتان در تمامی جهت یکسان در نظر گرفته شده است.



شکل ۲: مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی و تجربی [۲] رفتار مکانیکی آلومینیوم



شکل ۳: مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی [۲] رفتار مکانیکی فوم پلی‌یورتان با دانسیته ۱۴۵ کیلوگرم بر مترمکعب

۳- مقایسه نتایج شبیه‌سازی حاضر با نتایج تجربی پیشین

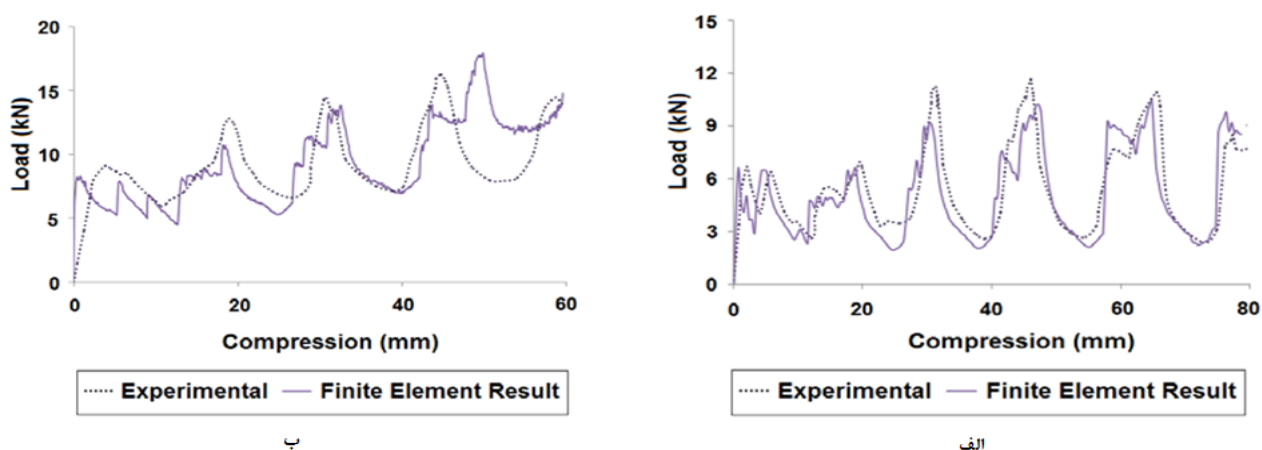
مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی فروریزش پوسته‌های متقارن محوری با نتایج نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس یکی از راه‌های مناسب و مفید برای حصول اطمینان از صحت انجام تحلیل‌های تحقیق حاضر به کمک این نرم‌افزار است. در مطالعه حاضر، نمونه‌ها از جنس آلومینیوم سری ۱۰۵۰ و فوم پلیمری از نوع پلی‌یورتان مطابق مرجع [۲] انتخاب شد که خواص مکانیکی آن‌ها به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ آورده شده است. با توجه به نتایج تجربی [۲] برای تحلیل تغییرشکل سازه‌ی جدارنازک مخروطی و به‌منظور کاهش زمان تحلیل عددی فرآیند فروریزش پوسته مخروطی، هندسه‌ی پوسته‌ی مخروطی و فوم پلی‌یورتان نسبت به محور آن متقارن در نظر گرفته می‌شود. مشخصات هندسی این پوسته‌ی مخروطی شامل ضخامت ۱ میلی‌متر، قطر بزرگ نمونه‌های مخروطی $65/5 \pm 0/4$ میلی‌متر، قطر کوچک $31/6 \pm 0/5$ و ارتفاع $97/4 \pm 0/5$ است.

همچنین شرط مرزی تماسی برای جلوگیری از نفوذ نقاط مختلف پوسته‌ی مخروطی به داخل قطعات صلب، فوم تقویت‌کننده به داخل پوسته‌ی مخروطی و امکان لغزش پوسته‌ی مخروطی بر روی سطوح صلب تعریف شده است. در این مطالعه بین سطح خارجی پوسته‌ی مخروطی با سطح صلب فوقانی و سطح داخلی پوسته‌ی مخروطی و فوم تقویت‌کننده شرط تماس تعریف شده است و مقدار ضریب اصطکاک $0/15$ در نظر گرفته شده است. همچنین در این شبیه‌سازی شرط تماس سطوح خارجی و داخلی پوسته‌ی مخروطی و فوم پلی‌یورتان با خودش پیش‌بینی شده است تا از نفوذ گره‌های ورق لوله‌ی مخروطی و همچنین فوم پرکننده در حین چروک‌خوردگی آنها جلوگیری شود.

از طرفی دیگر، هر صفحه صلب ممکن است شش درجه آزادی شامل سه مولفه‌ی جابجایی و سه مولفه‌ی دوران داشته باشند. در تحلیل فروریزش پوسته‌ی مخروطی سطح صلب تحتانی به فک ثابت دستگاه متصل است. پس کلیه‌ی درجات آزادی آن مقید می‌شود. سطح صلب فوقانی نیز به فک متحرک متصل است که کلیه‌ی درجات آزادی آن غیر از جابجایی در راستای محور پوسته مقید شده است. همچنین برای شبیه‌سازی پوسته‌ی مخروطی و صفحات صلب به ترتیب از المان‌های خطی متقارن محوری چهارگوش و المان صلب خطی استفاده شده است به طوری که المان‌های چهارگوش دارای چهار گره و المان‌های خطی دارای دو گره می‌باشند. شکل ۴ فروریزش پوسته‌ی مخروطی توخالی و تقویت‌شده را تحت بارگذاری محوری نشان می‌دهد، همان‌طور که ملاحظه می‌شود، فروریزش از یک انتها به صورت تاخوردن موضعی متقارن محوری آغاز شده و پشت سرهم ادامه می‌یابد. در شکل ۵ نیز نمودار نیرو - جابجایی پوسته مخروطی توخالی و تقویت‌شده با فوم تحت اثر بارگذاری شبه‌استاتیکی در حالت شبیه‌سازی حاضر و تجربی مقایسه شده است.



شکل ۴: فروریزش پوسته مخروطی توخالی و تقویت شده با فوم پلی یورتان تحت بارگذاری محوری



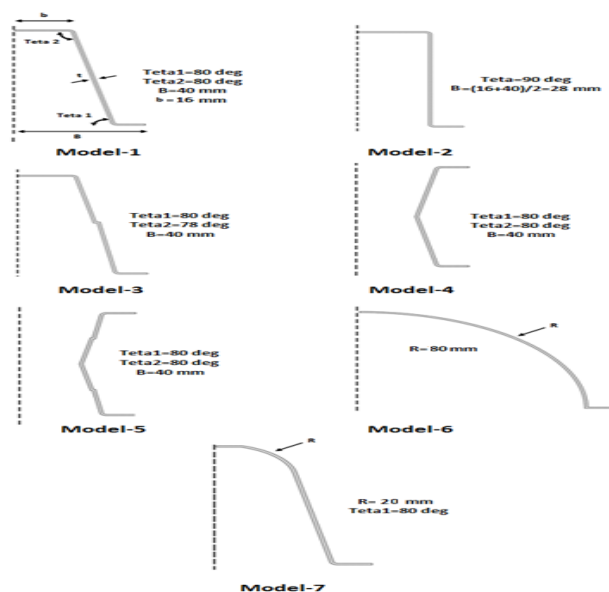
شکل ۵: نمودار نیروی محوری - جابجایی پوسته مخروطی الف- توخالی و ب- تقویت شده با فوم در حالت شبیه سازی حاضر و تجربی

بر این اساس میزان درصد خطای متوسط نیروی فروریزش مدل سازی حاضر نسبت به نتایج تجربی در حدود ۲ درصد است. حال با تأیید صحت مدل ارائه شده می توان رفتار فروریزش هندسه های مختلف متقارن محوری توخالی و تقویت شده با فوم را بررسی نمود.

۴- معرفی طرح های متقارن محوری

طرح های پیشنهادی جاذب های انرژی مطابق شکل ۶ شامل پوسته های استوانه ای، مخروطی، کروی و یا ترکیبی از آن هاست. در تمامی طرح ها شرایط مرزی دوسرگیردار در نظر گرفته شده است، بنابراین لازم است بخش از ابتدا و انتهای هر طرح دارای بخش مسطحی باشد تا توسط اتصال پیچ و مهره به سازه اصلی متصل شوند. رفتار فروریزشی طرح های پیشنهادی با استفاده از روش عددی اجزای محدود مورد بررسی و مقایسه قرار داده می شود تا طرح های با کارایی پایین تر از الویت خارج شود. لازم به توضیح است که برای مقایسه صحیح پارامترهای فروریزش جاذب های انرژی تحت بارگذاری محوری، ابعاد هندسی شامل ارتفاع (۸۰ میلی متر) و ضخامت (۱ میلی متر) برای تمامی طرح ها یکسان فرض شده است، به طوری که برای طرح دوم اندازه ی قطر استوانه برابر میانگین قطرهای فوقانی و تحتانی طرح اول و شعاع کروی طرح ششم برابر ارتفاع دیگر طرح ها در نظر گرفته شده است. از طرفی دیگر، شعاع بخش کروی طرح هفتم نیز ۲۰ درجه لحاظ شده است به طوری که بخش کروی مماس بر بخش مخروطی و مرکز آن بر روی محور اصلی بخش مخروطی قرار گرفته است. از آنجا که افزایش نیروی محوری سبب ایجاد شوک در جسم متصل به ضربه گیر می شود، بنابراین لازم است در طراحی ضربه گیر کمینه این نیرو با توجه به بیشترین میزان انرژی جذب شده مد نظر قرار گیرد. از جمله روش های کاهش این نیرو، ایجاد عیوب هندسی نظیر شیار، تغییر زاویه بخش مخروطی، ایجاد بخش کروی در هندسه [۵] و غیره است. در این مطالعه، اثر تغییر زاویه بخش مخروطی (مدل های سوم تا

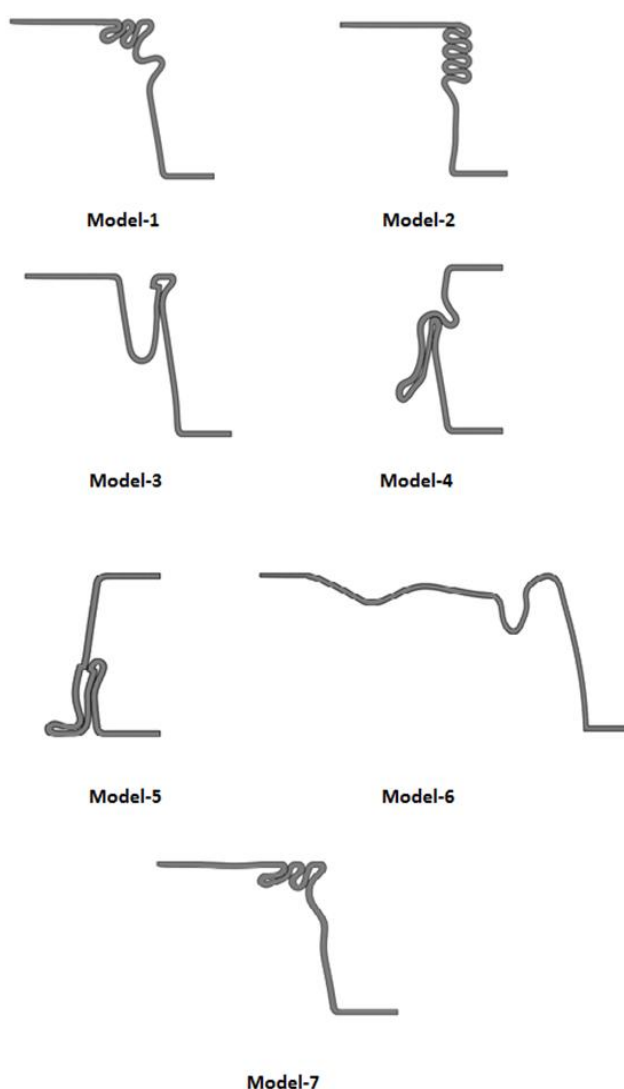
پنجم) و ایجاد بخش کروی در هندسه (مدل ششم و هفتم) در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که زاویه‌ی بخش مخروطی با سطح افق برای تمامی طرح‌های مخروطی یکسان است و تغییر زاویه مخروط در طرح‌های سوم تا پنجم برابر یک درجه لحاظ شده است.



شکل ۶: طرح‌های پیشنهادی جاذب‌های انرژی متقارن محوری

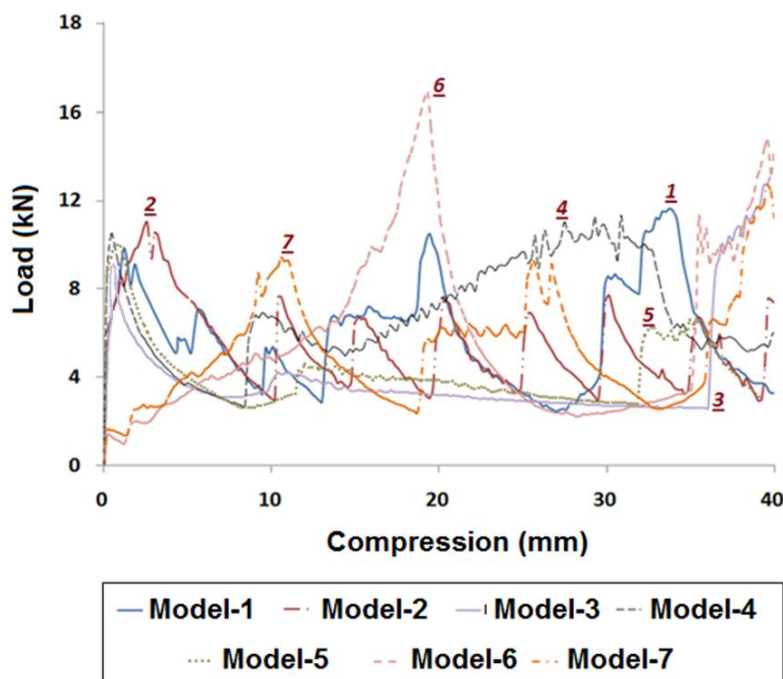
۵- نتایج شبیه‌سازی طرح‌های متقارن محوری

در این بخش، نتایج شبیه‌سازی فروریزش طرح‌های پیشنهادی جاذب انرژی تحت بارگذاری شبه‌استاتیک محوری بیان می‌شود. تمامی جاذب‌های پیشنهادی از جنس آلومینیوم با رفتار مکانیکی بیان شده در شکل ۲ است. شکل ۷ فروریزش طرح‌های پیشنهادی جاذب‌های انرژی آلومینیومی را تحت این بارگذاری برای طول لهیدگی ۵۷ درصد طول اولیه نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، در مدل‌های یک و دو از ناحیه‌ی فوقانی به‌صورت تاخوردگی متقارن محوری شروع می‌شود و پشت سرهم ادامه می‌یابد. در مدل‌های سه تا پنج خمیدگی در ناحیه‌ی تغییر زاویه‌ی بخش مخروطی آنها ایجاد شده و سپس این خمیدگی تا مقدار مشخصی برای هر یک از مدل‌ها گسترش یافته سپس اولین چین خارجی آنها تشکیل می‌شود. فروریزش مدل‌های شش و هفت نیز با خمش بخش کروی شروع می‌شود که با افزایش جایابی صفحه‌ی صلب فوقانی در مدل شش خمیدگی گسترش می‌یابد اما در مدل هفت بعد از خمش کامل بخش کروی، اولین چین در بخش مخروطی تشکیل شده و پشت سرهم ادامه می‌یابد.



شکل ۷: فروریزش نهایی طرح‌های پیشنهادی جاذب‌های انرژی آلومینیومی

شکل ۸ نیز نمودار نیرو-جابجایی فروریزش طرح‌های پیشنهادی جاذب‌های انرژی را تحت بارگذاری محوری نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در شروع بارگذاری برای تمامی جاذب‌های انرژی، نیرو به‌طور تقریباً خطی تا یک مقدار بیشینه افزایش می‌یابد. این روند تغییر نیرو ناشی از رفتار الاستیک جاذب‌های انرژی تحت اثر بار فشاری، قبل از آغاز کمانش است. در پدیده‌ی فروریزش پوسته‌های متقارن محوری مدل‌های یک، دو و هفت اولین چین به سمت درون پوسته تشکیل می‌شود. بنابراین فروریزش جاذب‌های انرژی با شرایط تکیه‌گاهی دوسرگیردار به‌صورت متقارن محوری از سطح جانبی و در نزدیک به قاعده‌ی کوچک آغاز می‌شود که با تشکیل چین داخلی و تماس پوسته با خودش نیرو افزایش می‌یابد. در ادامه با آغاز یک نیمه‌ی دیگر چین نیرو کاهش می‌یابد و نحوه‌ی تغییرات نیرو مجدداً تکرار می‌شود. این نکته قابل ذکر است که وجود بخش کروی در مدل‌های شش و هفت سبب کاهش قابل توجه شیب بخش خطی نمودار نیرو-جابجایی این نمونه‌ها شده است. از طرف دیگر، بیشینه نیروی فروریزش با افزایش سطح مقطع نمونه‌های مخروطی و کروی افزایش می‌یابد. این درحالی است که در جاذب انرژی استوانه‌ای (مدل دوم) نیروی اولیه به‌عنوان نیروی بیشینه‌ی نمودار نیرو-جابجایی تعریف می‌شود.



شکل ۸: نمودار نیرو-جابجایی فروریزش طرح‌های پیشنهادی جاذب‌های انرژی تحت بارگذاری محوری

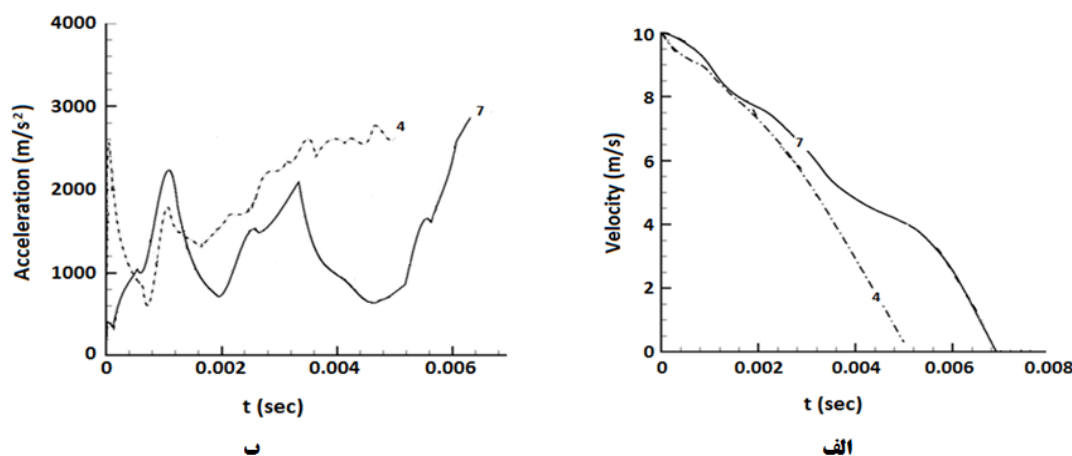
نتایج شبیه‌سازی فروریزش طرح‌های پیشنهادی جاذب انرژی در جدول ۱ آورده شده است. در این جدول، اولین بیشینه نیرو، بیشینه نیروی فروریزش و میزان انرژی جذب شده در اثر کاهش ۵۷ درصد ارتفاع اولیه جاذب‌های انرژی بیان شده است. ملاحظه می‌شود که مقدار نیروی اولیه بیشتر طرح‌ها به یکدیگر نزدیک است با این حال نسبت نیروی اولیه به نیروی بیشینه برای مدل دو و پنج مقدار واحد است و کمترین مقدار آن برای مدل شش (در حدود ۱۱ درصد) است. از طرف دیگر بیشینه انرژی جذب شده مربوط به مدل چهارم و کمترین آن مربوط به مدل سوم است.

جدول ۱: نتایج شبیه‌سازی فروریزش طرح‌های پیشنهادی جاذب انرژی تحت بارگذاری محوری

پارامترهای خروجی	نیروی اولیه (کیلو نیوتن)	نیروی بیشینه (کیلو نیوتن)	نسبت نیروی فروریزش	انرژی جذب‌شده (ژول)
مدل یک	۹/۸	۱۱/۵	۰/۸۵	۲۸۰
مدل دو	۱۱/۰	۱۱/۰	۱	۲۸۳
مدل سه	۹/۴	۱۳/۲	۰/۵۲	۲۱۹
مدل چهار	۱۰/۵	۱۱/۴	۰/۹۲	۳۴۰
مدل پنج	۹/۹	۹/۹	۱	۲۴۳
مدل شش	۹/۵	۱۶/۹	۰/۱۱	۳۱۹
مدل هفت	۹/۲	۱۲/۲	۰/۷۵	۲۴۹

از آنجا که با کاهش شیب بخش خطی نمودار نیرو-جابجایی، شوک برخورد با شدت کمتری به جسم متصل به ضربه‌گیر منتقل می‌شود، براساس نتایج شبیه‌سازی‌های طرح‌های پیشنهادی جاذب انرژی می‌توان گفت که مدل چهارم و هفتم به ترتیب به دلیل بیشینه مقدار جذب انرژی و برخورداری از کمترین شیب بخش خطی نمودار نیرو-جابجایی می‌توانند به عنوان مدل‌های منتخب جاذب‌های انرژی معرفی شوند.

بررسی نمودار سرعت- زمان و شتاب- زمان جاذب‌های انرژی با سرعت تقریبی ۱۰ متر بر ثانیه در برخورد با جسم صلب نشان می‌دهد (شکل ۹)، سرعت برخورد برای جاذب انرژی طرح چهار در زمان کمتری نسبت به طرح هفت به صفر رسیده است. به عبارت دیگر، در صورتی که جاذب تنها از طریق خمیدگی پوسته‌ی خود انرژی جنبشی اولیه را جذب نماید، در مدت زمان کمتری نسبت به جاذب انرژی چین‌خورده متوقف می‌شود. بدیهی است که این امر برای کاهش‌دهنده‌های شوک ناشی از برخورد مناسب نیست. این در حالی است که براساس نمودار شتاب- زمان می‌توان نتیجه گرفت که مدل هفت با شتاب اولیه‌ی کمتری نسبت به مدل چهار به سطح صلب برخورد می‌کند. بنابراین، طرح شماره هفت به‌عنوان منتخب طرح‌های پیشنهادی معرفی می‌شود. البته لازم به توضیح است که مدل هفت ترکیبی از بخش مخروطی (با زاویه‌ی مشخص) و بخش کروی (با شعاع مشخص) است، بنابراین در بررسی پارامترهای ابعادی این مدل، طبیعتاً مدل‌های دو و شش نیز در نظر گرفته می‌شوند.



شکل ۹: نمودار الف (سرعت- زمان و ب) شتاب- زمان طرح‌های پیشنهادی منتخب در بارگذاری دینامیکی (با سرعت ۱۰ متر بر ثانیه)

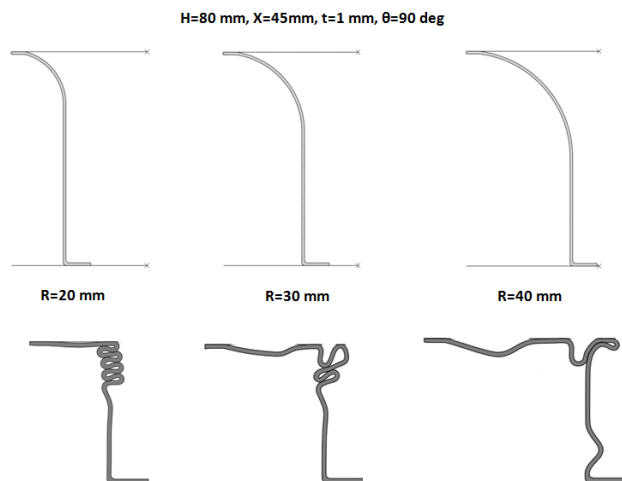
۶- بررسی پارامتری طرح منتخب جاذب انرژی

به دلیل تنوع عوامل تأثیرگذار بر پدیده فروریزش جاذب‌های انرژی جدارنازک، مانند ابعاد هندسی، جنس، شرایط تکیه‌گاهی و نحوه بارگذاری، هنوز دسته‌بندی مناسبی برای پیش‌بینی رفتار فروریزش این پوسته‌ها در شرایط مختلف ارائه نشده است. در این بخش ابتدا تأثیر ابعاد هندسی جاذب انرژی طرح شماره هفت شامل شعاع بخش کروی، زاویه‌ی نیم‌رأس بخش مخروطی و ضخامت بر نسبت نیروی فروریزش، میزان انرژی جذب‌شده و شکل فروریزش آن بررسی می‌شود و سپس ابعاد هندسی طرح نهایی جاذب انرژی بیان می‌شود. همچنین به منظور افزایش جذب انرژی برخورد و تقویت طرح منتخب جاذب، اثر فوم پلی‌یورتان بر رفتار فروریزشی آن بررسی می‌شود.

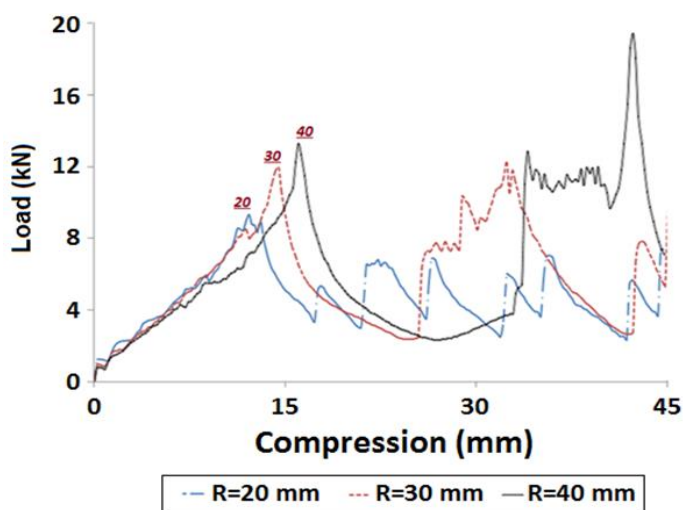
۶-۱- تأثیر شعاع بخش کروی

با ثابت در نظر گرفتن مختصات طرح منتخب جاذب انرژی با زاویه‌ی نیم‌رأس صفر درجه، مطابق شکل ۱۰ عامل شعاع بخش کروی در محدوده انتخابی ۲۰ تا ۴۰ میلی‌متر تغییر داده شده است. به دلیل تعریف شرایط مماسی در محل اتصال بخش کروی و استوانه‌ای، تغییر شعاع بخش کروی موجب تغییر شعاع بخش استوانه‌ای خواهد بود. نحوه‌ی فروریزش طرح منتخب جاذب انرژی با تغییر شعاع بخش کروی در شکل ۱۰ آورده شده است. آنچه به وضوح مشخص است، افزایش چین‌های تشکیل شده با کاهش شعاع بخش کروی است. شکل ۱۱ اثر شعاع بخش کروی این جاذب انرژی را بر نمودار نیرو-جابجایی نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با افزایش شعاع بخش کروی نیروی اولیه و انرژی جذب شده (مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی) به نسبت قابل توجهی افزایش یافته است. افزایش شعاع بخش کروی نیز باعث افزایش بیشینه نیروهای فروریزش شده است. بنابراین اولین چین متقارن محوری در ناحیه‌ی پایین‌تری نسبت به قاعده تحتانی پوسته استوانه‌ای تشکیل شده که این امر باعث کاهش چین‌خوردگی پوسته‌های استوانه‌ای شده است. براساس این نتایج انتظار می‌رود، شعاع بخش کروی مورد استفاده در ضربه‌گیرها حداقل باشد، چرا که پیش‌بینی می‌شود این مقدار از یک طرف موجب کاهش قابل توجه

شتاب اولیه برخورد می‌شود و از طرف دیگر شیب بخش خطی نمودار نیرو-جابجایی را به مقدار قابل توجه کاهش می‌دهد. جدول ۲ نتایج کمی تحلیل نمونه را در اثر تغییر شعاع بخش کروی ارائه کرده است و روابط تقریبی براساس برازش جبری درجه دوم برای آن پیشنهاد کرده است.



شکل ۱۰: اثر تغییر شعاع بخش کروی بر نحوه ی فروریزش طرح منتخب جاذب انرژی با زاویه ی نیم رأس صفر درجه



شکل ۱۱: اثر تغییر شعاع بخش کروی بر نمودار نیرو-جابجایی طرح منتخب جاذب انرژی با زاویه ی نیم رأس صفر

جدول ۲: اثر تغییر شعاع کره بالایی بر پارامترهای جذب انرژی (نیم رأس صفر درجه، ضخامت ۲ م.م.)

شعاع بالایی	نیروی اولیه (کیلو نیوتن)	نیروی بیشینه (کیلو نیوتن)	نسبت فروریزش	جذب انرژی (ژول)
۲۰	۹/۳	۹/۳	۱/۰	۲۱۱
۳۰	۱۲/۲	۱۲/۹	۰/۹۴	۲۹۵
۴۰	۱۳/۳	۱۹/۸	۰/۶۷	۴۵۵

$$F_i = 0.9R + 4/5$$

$$F_{max} = 0.106R^2 - 2/35R + 33/4$$

$$E = 0.08R^3 + 4/8R + 532$$

رابطه حدودی

۲-۶- تأثیر زاویه نیم‌رأس

زاویه نیم‌رأس یکی از عوامل مؤثر بر فروریزش پوسته‌های متقارن محوری است. در این بخش زاویه نیم‌رأس برابر زاویه دیواره پوسته با محور افقی تعریف شده است. شکل ۱۲ اثر زاویه نیم‌رأس بر نمودار نیرو-جابجایی و نحوه فروریزش طرح منتخب را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، در این بررسی زاویه نیم‌رأس در محدوده ۵ تا ۱۵ درجه تغییر داده شده است. در این شبیه‌سازی طول شعاع بخش کروی و ضخامت طرح منتخب ثابت و به ترتیب برابر ۸۰، ۲۰ و ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. جدول ۳ نتایج کمی تحلیل نمونه را به ازای زاویه نیم‌راس مختلف ارائه کرده است و روابط تقریبی بر اساس برازش جبری درجه دوم برای آن پیشنهاد کرده است.

جدول ۳: اثر تغییر زاویه نیم‌راس بر پارامترهای جذب انرژی

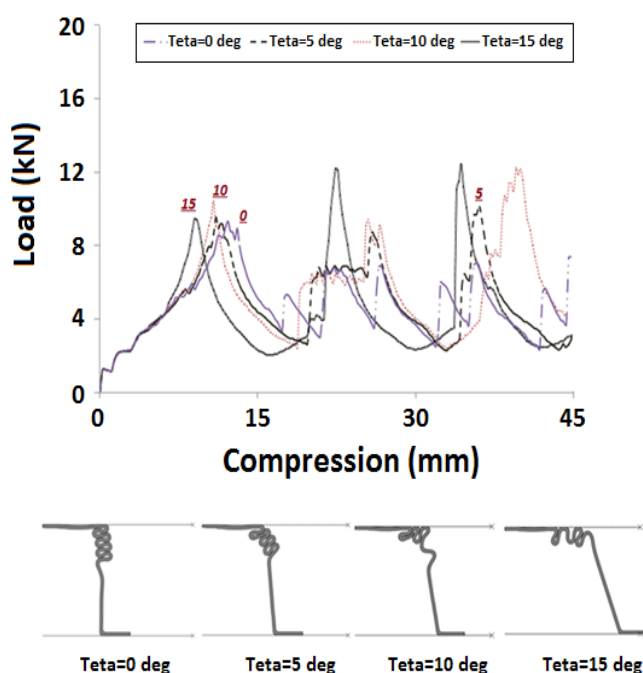
زاویه نیم‌راس	نیروی اولیه (کیلو نیوتن)	نیروی بیشینه (کیلو نیوتن)	نسبت فروریزش	جذب انرژی (ژول)
۰	۹/۳	۹/۳	۱/۰	۲۱۱
۵	۹/۲	۱۰/۱	۰/۹۱	۲۱۹
۱۰	۹/۲	۱۲/۲	۰/۷۵	۲۴۹
۱۵	۹/۴	۱۲/۴	۰/۷۶	۱۹۳

$$F_i = -0.009 a^2 + 0.165 a + 9.125$$

$$F_{max} = -0.007 a^2 + 0.335 a + 9.125$$

$$E = -0.5 a^2 + 6.75 a + 207$$

رابطه حدودی



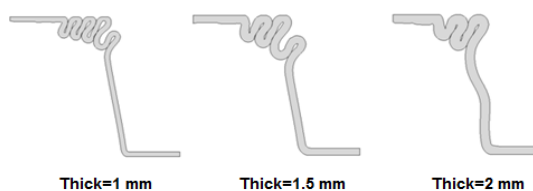
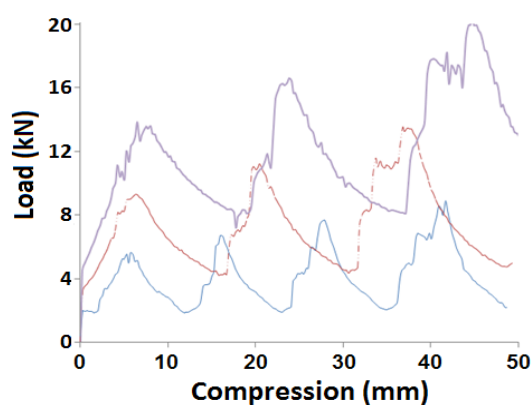
شکل ۱۲: اثر زاویه نیم‌رأس بخش مخروطی بر نمودار نیرو-جابجایی و نحوه فروریزش طرح منتخب جذب انرژی

نتایج شبیه‌سازی مطابق جدول ۳ نشان‌دهنده عدم تغییر قابل توجه نیروی اولیه پوسته‌های مخروطی با بخش کروی نسبت به پوسته استوانه‌ای (زاویه نیم‌رأس صفر درجه) است. از طرف دیگر، انرژی جذب‌شده برای طرح منتخب با زاویه نیم‌رأس ۱۰ درجه بیشینه است. علت آن امر را می‌توان در نحوه فروریزش این طرح یافت زیرا در این طرح چین‌های فروریزش در طی افزایش جابجایی با صفحه صلب فوقانی تماس داشته و این تماس موجب افزایش طول چین‌ها می‌شود. بنابراین در کاربرد ضربه‌گیرهای فروریزی می‌توان از پوسته مخروطی با زاویه نیم‌رأس ۱۰ درجه برای کاهش شوک اولیه و جذب بیشتر انرژی ناشی از برخورد اجسام با یکدیگر استفاده نمود.

۳-۶- تأثیر ضخامت

در این بخش اثر پارامتر ضخامت طرح منتخب جاذب انرژی بر نیروی اولیه، بیشینه نیرو و میزان انرژی جذب شده بررسی می‌شود. سایر ابعاد هندسی و شرایط مرزی ثابت در نظر گرفته می‌شود. به طوری که شعاع بخش کروی برابر ۲۰ میلی‌متر، طول آن برابر ۸۰ میلی‌متر و زاویه نیم‌رأس بخش مخروطی برابر ۱۰ درجه در نظر گرفته می‌شود. ضخامت نیز برای این طرح جاذب ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر انتخاب شده است. شکل ۱۳ اثر ضخامت بر نمودار نیرو-جابجایی و شیوهی فروریزش طرح منتخب جاذب انرژی را تحت اثر بارگذاری محوری برای جابجایی ۵۰ میلی‌متر نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش ضخامت، طول چین‌های تشکیل شده کاهش می‌یابد. به طوری که طرح منتخب با ضخامت ۱ و ۲ میلی‌متر به ترتیب از بیشترین و کمترین تعداد چین برخوردارند.

از طرف دیگر، افزایش ضخامت طرح منتخب باعث افزایش بیشینه نیروهای فروریزش می‌شود، بنابراین اولین چین متقارن محوری می‌بایست در ناحیه‌ای پایین‌تر نسبت به قاعده‌ی تحتانی پوسته‌های متقارن محوری تشکیل شود. همچنین افزایش ضخامت موجب افزایش متوسط نیروی فروریزش و در نتیجه انرژی جذب شده می‌شود. به طوری که با افزایش ضخامت از ۱ به ۲ میلی‌متر انرژی جذب شده ۶۲ درصد افزایش می‌یابد. جدول ۴ نتایج کمی تحلیل نمونه را در ضخامت مختلف ارائه کرده است و روابط تقریبی براساس برازش جبری درجه دوم برای آن پیشنهاد کرده است.



شکل ۱۳: اثر اختلاف ضخامت طرح منتخب بر نمودار نیرو-جابجایی و شیوهی فروریزش متقارن محوری

جدول ۴: اثر تغییر ضخامت بر پارامترهای جذب انرژی (شعاع بالایی ۲۰ م.م.، زاویه ۱۰ درجه)

ضخامت نمونه	نیروی اولیه (کیلو نیوتن)	نیروی بیشینه (کیلو نیوتن)	نسبت فروریزش	جذب انرژی (ژول)
۱	۹/۲	۱۲/۲	۰/۷۵	۲۴۹
۱/۵	۱۶/۵	۲۳	۰/۷۲	۴۷۸
۲	۲۳	۲۸	۰/۸۲	۶۶۰

$$F_i = 1/5t^2 + 9/6t - 2$$

$$E = 13t^2 + 354t - 94$$

$$F_{max} = -t^2 + 18.5t - 4/2$$

رابطه حدودی

با توجه به جدول ۴ ضخامت ضربه‌گیر مورد طراحی جهت جذب انرژی بیشتر، برابر ۲ میلی‌متر خواهد بود. آنچه مشخص است با محاسبه قابلیت جذب انرژی جاذب‌ها و انرژی کل مجموعه در حین برخورد با جسم دیگر، می‌توان از چند ضربه‌گیر موازی استفاده کرد. علاوه بر این، استفاده از ضربه‌گیرها با ضخامت کمتر سبب افزایش تعداد آن‌ها می‌شود بنابراین بدیهی است که شوک اولیه‌ی جاذب انرژی با ضخامت ۲ میلی‌متر کمتر از جاذب انرژی با ضخامت ۱ میلی‌متر و تعداد بیشتر است.

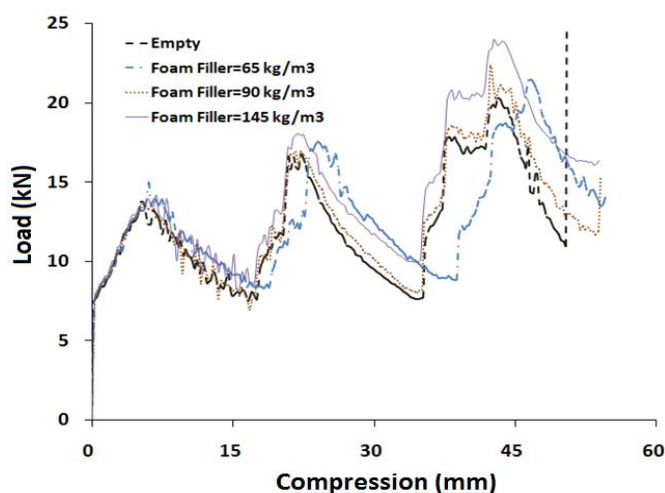
۴-۶- اثر فوم بر رفتار فروریزی طرح منتخب

با توجه به آنچه بیان شد، مدل هفت به‌عنوان طرح منتخب جاذب انرژی پیشنهاد شد که پس از مطالعه‌ی پارامتری و بهینه‌سازی ابعادی آن، ابعاد نهایی مطابق جدول ۵ است.

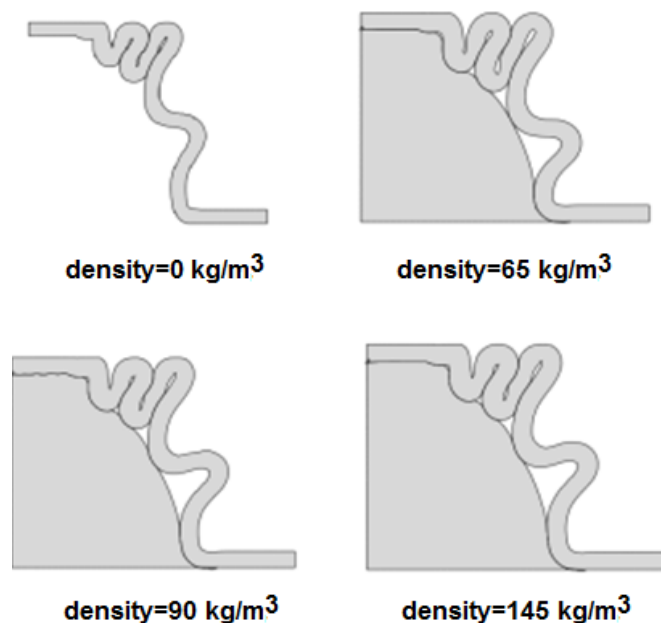
جدول ۵: مشخصات ابعاد هندسی طرح نهایی جاذب انرژی

طرح نهایی	ضخامت (میلی‌متر)	ارتفاع (میلی‌متر)	شعاع بخش کروی (میلی‌متر)	زاویه‌ی نیم‌رأس (درجه)
مدل هفت	۲	۸۰	۲۰	۱۰

در تحلیل عددی اثر فوم پلی‌یورتان با دانسیته‌های ۶۵، ۹۰ و ۱۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب بر فروریزش طرح منتخب جاذب انرژی انجام شده است. لازم به ذکر است که خواص مکانیکی هر یک از فوم‌ها در مرجع [۲] آورده شده است. مطالعات نشان می‌دهند شیوه‌ی فروریزش و تعداد چین‌های طرح منتخب تقویت‌شده با فوم پلی‌یورتان با دانسیته‌های متفاوت مشابه‌اند. آنچه این منحنی‌ها را از یکدیگر متفاوت می‌کند، کمینه نیروهای هر چین است به‌طوری که با افزایش دانسیته‌ی فوم، کمینه نیروهای منحنی نیرو-جابجایی افزایش می‌یابد. این امر به معنای افزایش سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی و یا به عبارت دیگر افزایش قابلیت جذب انرژی در نمونه‌های مخروطی با درپوش کروی است. شکل ۱۴ و ۱۵ به ترتیب نمودار نیرو-جابجایی و نحوه‌ی فروریزش طرح منتخب جاذب انرژی را تحت اثر دانسیته‌ی فوم نشان می‌دهد. نتایج بیانگر این است که انرژی جذب شده طرح منتخب تقویت شده با فوم با چگالی ۱۴۵ کیلوگرم بر مترمکعب در حدود ۲۲ درصد بیشتر از طرح منتخب توخالی است. به عبارت دیگر برای اطمینان از عملکرد جاذب‌ها در برخورد با جسم دیگر می‌توان از طرح منتخب تقویت شده با فوم با چگالی ۱۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب استفاده نمود.



شکل ۱۴: نمودار نیرو-جابجایی طرح منتخب توخالی و تقویت شده با فوم با دانسیته‌های متفاوت



شکل ۱۵: نحوه‌ی فروریزش طرح منتخب طرح منتخب توخالی و تقویت شده با فوم با دانسیته‌های متفاوت

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله با هدف طراحی یک ضربه‌گیر، رفتار جاذب‌های انرژی متقارن محوری برای انتقال حداقل شتاب کاهنده سرعت به سازه و سرنشین بررسی شده است. به این منظور مدلی اتخاذ شده است و با نتایج تجربی پیشین صحت‌گذاری شده است. مدل‌های پیشنهادی شامل لوله‌های متقارن محوری استوانه‌ای، مخروطی، کروی و ترکیب آن‌هاست که در برخی از آن‌ها به منظور کاهش نیروی اولیه فروریزش، زاویه‌ی بخش مخروطی تغییر داده شده و یا بخش کروی با آن ترکیب شده است. نتایج نشان می‌دهد وجود بخش کروی در نمونه‌های مخروطی ضمن برخورداری از میزان انرژی جذب شده مناسب و کاهش قابل توجه نیروی بیشینه سبب کاهش شیب بخش خطی نمودار نیرو-جابجایی می‌شود. بنابراین در این مطالعه، نمونه‌های مخروطی با درپوش کروی به عنوان هندسه منتخب در نظر گرفته شده است. بررسی پارامتری بر این هندسه نشان می‌دهد که کاهش شعاع بخش کروی، تغییر زاویه نیم‌رأس، افزایش ضخامت و دانسیته فوم می‌تواند نقش قابل توجهی در رفتار فروریزشی این هندسه داشته باشد. نتایج این بررسی‌ها شامل موارد زیر است:

- با افزایش شعاع بخش کروی نیروی اولیه و انرژی جذب شده به نسبت قابل توجهی افزایش می‌یابد. افزایش شعاع بخش کروی نیز باعث افزایش بیشینه نیروهای فروریزش شده است. براساس این نتایج انتظار می‌رود، شعاع بخش کروی مورد استفاده در ضربه‌گیرها حداقل باشد، زیرا پیش‌بینی می‌شود این مقدار از یک طرف موجب کاهش قابل توجه شتاب اولیه‌ی برخورد می‌شود و از طرف دیگر شیب بخش خطی نمودار نیرو-جابجایی را به مقدار قابل توجه کاهش می‌دهد.
- انرژی جذب شده برای طرح منتخب با زاویه‌ی نیم‌رأس ۱۰ درجه بیشینه است. علت این امر را می‌توان در نحوه‌ی فروریزش این طرح یافت زیرا در این طرح چین‌های فروریزش در طی افزایش جابجایی با صفحه‌ی صلب فوقانی تماس داشته و این تماس موجب افزایش طول چین‌ها می‌شود. بنابراین در کاربرد ضربه‌گیرهای فروریزشی می‌توان از پوسته مخروطی با زاویه‌ی نیم‌رأس ۱۰ درجه برای کاهش شوک اولیه و جذب بیشتر انرژی ناشی از برخورد اجسام به یکدیگر استفاده نمود.
- افزایش ضخامت طرح منتخب باعث افزایش بیشینه نیروهای فروریزش می‌شود، بنابراین اولین چین متقارن محوری می‌بایست در ناحیه‌ای پایین‌تر نسبت به قاعده‌ی تحتانی پوسته‌های متقارن محوری تشکیل شود. همچنین افزایش ضخامت موجب افزایش

متوسط نیروی فروریزش و در نتیجه انرژی جذب شده می‌شود. به طوری که با افزایش ضخامت از ۱ به ۲ میلی‌متر انرژی جذب شده ۶۲ درصد افزایش می‌یابد.

- نتایج بیانگر این است که انرژی جذب شده طرح منتخب تقویت شده با فوم با چگالی ۱۴۵ کیلوگرم بر مترمکعب در حدود ۲۲ درصد بیشتر از طرح منتخب توخالی است. به عبارت دیگر برای اطمینان از عملکرد جاذب‌ها در برخورد با جسم دیگر می‌توان از طرح منتخب تقویت شده با فوم با چگالی ۱۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب استفاده نمود.

مراجع

- [1] Ghamarian, A., and Abadi, M.T. (2011). Axial crushing analysis of end-capped circular tubes. *Thin-Walled Structures*, Vol.49, pp. 743-752.
- [2] Ghamarian, A., Zarei, H.R., and Abadi, M.T. (2011). Experimental and numerical crashworthiness investigation of empty and foam-filled end-capped conical tubes. *Thin-Walled Structures*, Vol.9, pp.1312–1319.
- [3] Ghamarian, A., and Zarei, H.R. (2012). Crashworthiness investigation of conical and cylindrical end-capped tubes under quasi-static crash loading. *International Journal of Crashworthiness*. 17, 19-28.
- [4] Ghamarian, A., Zarei, H.R., Farsi, M.A., and Ariaeifar, N. (2013). Crashworthiness investigation of the empty and foam-filled conical tube with shallow spherical caps. *Strain*, Vol. 49, pp.199–211.
- [5] Zarei, H.R., and Ghamarian, A. (2014). Experimental and numerical crashworthiness investigation of empty and foam-filled thin-walled circular tubes with shallow spherical caps. *Experimental Mechanics*, DOI 10.1007/s11340-13-9789-3.
- [6] Azarakhsh, S., Rahi, A., Ghamarian, A., and Motamedi, H. (2015). Axial crushing analysis of empty and foam-filled brass bitubular cylinder tubes. *Thin-Walled Structures*. 95, 60-72.
- [7] Azarakhsh, S., and Ghamarian, A. (2017). Collapse behavior of thin-walled conical tube clamped at both ends subjected to axial and oblique loads. *Thin-Walled Structures*. 112, 1-11.
- [8] Ahmad, Z., and Thambiratnam, D.P. (2009). Crushing Response of Foam-Filled Conical Tubes under Quasi-Static Axial Loading. *Materials and Design*, Vol. 30, pp. 2393-403.
- [9] Acar, E., Guler, M.A., Gerceker, B., Cerit, M.E., and Bayram, B. (2011). Multi-objective Crashworthiness Optimization of Tapered Thin-Walled Tubes with Axisymmetric Indentations. *Thin-Walled Structures*. Vol.49, pp. 94-105.
- [10] Abbasi, M., Reddy, S., Ghaffari-Nazari, A., and Fard, M. (2015). Multiobjective Crashworthiness Optimization of Multi-Cornered Thin-Walled Sheet Metal Members. *Thin-Walled Structures*. Vol.89, pp. 31-41.