دریافت: ۱۷ فروردین ۹۵ پذیرش: ۲۵ خرداد ۹۵

بررسی ضربه پذیری لوله های استوانه‌ای شیاردار تحت بارگذاری دینامیکی به عنوان جاذب انرژی

مجتبی کرمعلی [۱]، محمدجواد رضوانی*[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، **دانشگاه آزاد اسلامی**، سمنان، ایران
۲-استادیار ،گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان ، **دانشگاه آزاد اسلامی**، سمنان، ایران
*سمنان، ۳۵۱۳۱۳۷۱۱۱، rezvani57@gmail.com

چکیده

در این مقاله، ضربه پذیری لوله‌های استوانه‌ای جدارنازک شیاردار با استفاده از شبیه سازی عددی در نرم افزار ال. اس. داینا [1] تحت بارگذاری دینامیکی بررسی می شود. برای این منظور، شیارهای داخلی و خارجی با فاصله یکسان بر روی لوله استوانه‌ای ایجاد شده تا تغییر شکل پلاستیک از محل شیار شکل گرفته و چین‌هایی به صورت متقارن بوجود آید. هدف از این مطالعه، بررسی تاثیر شیار بر جذب انرژی، نیروی بیشینه لهیدگی و راندمان نیروی لهیدگی می‌باشد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که با افزایش تعداد شیار تغییر محسوسی در نحوه چین خوردگی نمونه ها مشاهده نمی‌شود. همچنین، با افزایش تعداد شیار جذب انرژی و نیروی ماکزیمم لهیدگی کاهش یافته و نوسانات منحنی نیرو-جابجایی به صورت یکنواخت تر ایجاد می‌شود. نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند در صنایع مختلف از جمله خودروسازی، صنایع ریلی، هوافضا و آسانسور جهت جذب انرژی ضربه مورد استفاده قرار گیرد.

کلید واژگان

استوانه شیاردار، بارگذاری دینامیکی، جذب انرژی، نیروی ماکزیمم لهیدگی

Numerical investigation of energy absorption of cylindrical grooved tubes under dynamic axial load

M.Karamali[1], M.J.Rezvani*[2]

1- Department of Mechanical Engineering, **Islamic Azad University**, Semnan, Iran.
2- Research Manager, Semnan Branch, **Islamic Azad University**, Semnan, Iran.
* P.O.B 13513137111 Semnan, rezvani57@gmail.com

Abstract

In this study, numerical investigation of energy absorption of cylindrical grooved tubes under dynamic axial load by LS DYNA was considered. In order to achieve axisymmetric collapse mode inner and outer grooves were created around the surface of cylindrical tubes. The purpose of this study was consideration of the effects of number of grooves on energy absorption and crush force efficiency. The results indicate that with the increase in number of grooves the collapse modes would not change. In addition to this, with the increase in number of grooves maximum crush load and collapse modes decrease but the force-displacement curves would be smoother. The results of this study can be used in automobile, railway and aerospace industries.

Keywords

Cylindrical grooved tube, Crush Force Efficiency, Dynamic loading, Energy absorption

۱- مقدمه

سیستم‌های جذب انرژی ضربه به دلیل حداقل کردن اثر ضربه وارده به سرنشینان و بالا بردن ایمنی در سوانح رانندگی و برخورد خودروها با موانع، در صنایع مختلف مانند کشتی‌سازی، راه‌آهن، هواپیمایی و به ویژه در صنایع خودروسازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. به این منظور سیستم‌های گوناگون جذب انرژی به کار گرفته شده‌اند که از این میان لوله‌های جدار نازک به خاطر سبکی، ظرفیت جذب انرژی بالا و نسبت جذب انرژی به وزن بالا و در نتیجه هزینه ساخت پایین به عنوان یکی از کارآمدترین سیستمهای جذب انرژی کاربرد روز افزونی پیدا کرده‌اند. اندروز و همکارانش [۱] در سال ۱۹۸۳ نتایج یک بررسی آزمایشگاهی از مودهای لهیدگی محوری و خواص جذب انرژی در حالت شبه استاتیکی برای لوله‌های آلومینیومی را بیان کرده‌اند.در سال ۱۹۸۶ مملیس و همکاران [۲] به بررسی آزمایشگاهی لهیدگی محوری لوله‌های فولادی جدار نازک رینگ‌دار پرداخته‌اند. مملیس و همکاران [۳] در سال ۱۹۸۹ به بررسی جذب انرژی و تغییر شکل لوله‌های جدار نازک با دو روش تئوری و آزمایشگاهی پرداخته‌اند. در سال ۱۹۹۱ مملیس و همکاران [۴] لهیدگی محوری لوله‌های جدار نازک به عنوان سیستم‌های جذب انرژی را از طریق تئوری و آزمایشگاهی با در نظر گرفتن دو جنس ماده‌ی مختلف برای آن‌ها در نظر گرفتند. گوپتا [۵] در ۱۹۹۳ با در نظر گرفتن دو جنس مختلف برای لوله‌های استوانه‌ای و نسبت‌های متغیر طول به قطر و قطر به ضخامت و فرآیند آنیل کردن، به بررسی آزمایشگاهی تاثیر این پارامترها در رفتار لهیدگی لوله‌ها پرداخته‌اند. مملیس و همکاران [۶] به مدلسازی لهیدگی محوری لوله‌های جدار نازک فولادی شیاردار، با متغیر در نظر گرفتن تعداد شیار خارجی، پرداخته‌اند. حسینی‌پور و دانشی [۷، ۸، ۹] در سال ۲۰۰۳ به بررسی‌های آزمایشگاهی جذب انرژی و نیروی متوسط لهیدگی در لوله‌های شیاردار جدار نازک تحت فشار محوری پرداخته‌اند و هدف را بهبود یکنواختی رفتار نیرو – جابجایی و پیش‌بینی قابلیت جذب انرژی بیان کرده‌اند. صالح غفاری و همکاران [۱۰] در ۲۰۱۱ به

[1] LS DYNA

تحلیل جاذب های رینگ‌دار پرداختند. در سال ۲۰۱۲ رضوانی و همکارانش [۱۱] به بررسی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی رفتار لهیدگی و جذب انرژی لوله‌های شیاردار آلومینیومی با شکل شیار متفاوت پرداختند.

۲- بیان موضوع

تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی جذب انرژی ضربه نشان می‌دهد که نحوه لهیدگی در اثر ضربه و میزان انرژی جذب شده در لوله‌های جدار نازک می‌تواند با ایجاد الگوهای مختلف بر روی لوله کنترل شود و سبب بالا بردن میزان کارآیی این نوع از جاذب‌ها گردد. به دلیل اثرات متقابل این پارامترها بر روی هم با انتخاب تعداد پارامترهای بیشتر نتایج بهتری حاصل می‌شود که این مسئله باید در نظر گرفته شود. در این مطالعه با استفاده از شبیه سازی عددی، به بررسی رفتار دینامیکی جاذب استوانه‌ای شیاردار با تغییر تعداد شیار آن پرداخته می‌شود..

۳- شاخص های طراحی جاذب انرژی

شاخص‌های مهمی در مورد جاذب‌های انرژی وجود دارند که مهمترین آنها جذب انرژی، ماکزیمم نیروی لهیدگی و راندمان نیروی لهیدگی هستند. هدف کلی از این تحقیق، یافتن بهترین نمونه از نمونه های مورد بررسی قرار گرفته شده بر اساس جذب انرژی و ماکزیمم نیروی لهیدگی می‌باشد.

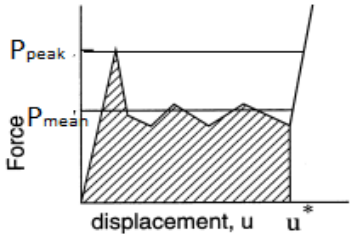
۳-۱-جذب انرژی

جذب انرژی، $E_{absorbed}$ به عنوان انتگرال منحنی نیرو-جابجایی به شرح زیر تعریف می شود:

$$E_{absorbed} = \int P d\delta \qquad (۱)$$

۳-۲- ماکزیمم نیروی لهیدگی

مطابق شکل۱ نیروی ماکزیمم لهیدگی در تشکیل اولین چین نقش دارد. حداکثر نیرو در جاذب‌های جدار نازک مربوط به تغییر شکل الاستیک است که بعد از آغاز تغییر شکل پلاستیک به سرعت کاهش می‌یابد. تمهیدات زیادی برای کاهش این نیرو ارائه گردیده است.



شکل ۱ نیروی ماکزیمم لهیدگی

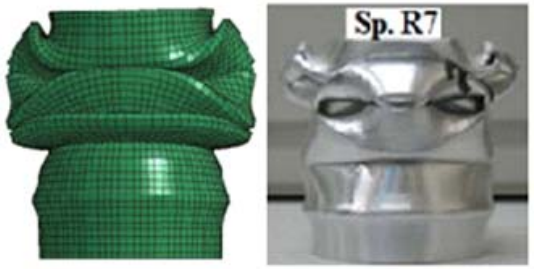
۳-۳- راندمان نیروی لهیدگی

راندمان نیروی لهیدگی، به صورت نسبت نیروی متوسط لهیدگی تقسیم بر ماکزیمم نیروی لهیدگی تعریف می گردد.

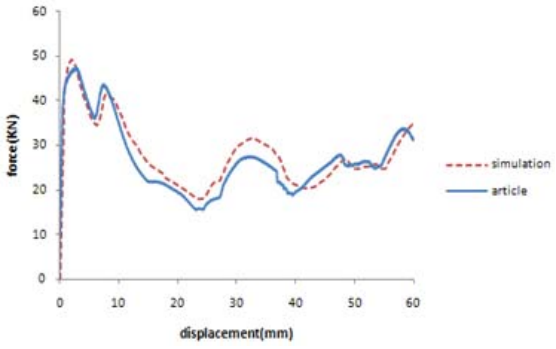
$$CFE = \frac{P_m}{P_{\max}} \qquad (۲)$$

۴- اعتبارسنجی

به منظور اطمینان از روش مدلسازی، مدل ۷ شیاره مرجع [۱۲] به روش شبه استاتیکی با نرم افزار ال.اس.داینا مدلسازی شد که همانطور که در شکل۲ مشخص است شکل لهیدگی با نمونه عملی مشابه است و نمودار نیرو – جابجایی حدود ۴٪ خطا دارد که قابل چشم پوشی است.



الف



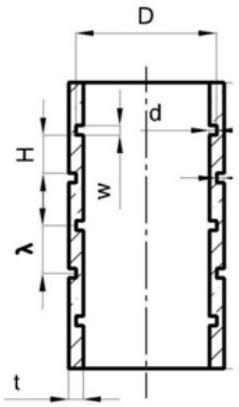
ب

شکل۲ اعتبارسنجی شبیه سازی عددی با نمونه تجربی: الف) شکل لهیدگی، ب)نمودار نیرو-جابجایی

۵- شبیه سازی عددی

۵-۱-پارامترهای هندسی

در شکل ۳ پارامترهای هندسی لوله استوانه‌ای شیاردار نشان داده شده است. در این تحقیق تعداد شیارها متغیر طراحی می باشند. تعداد شیارها ۷، ۱۱، ۱۳، ۱۷ در نظر گرفته شده‌اند. همچنین، ثوابت طراحی در جدول۱ نشان داده شده است.



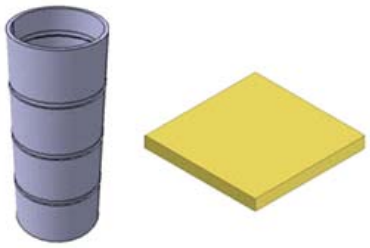
شکل۳ جاذب استوانه‌ای شیاردار

جدول ۱ مقادیر ثوابت طراحی

پارامتر	واحد	مقدار
طول	mm	۱۱۷
عرض شیار	mm	۳
ضخامت دیواره	mm	۲
قطرداخلی	mm	۴۵/۵
عمق شیار	mm	۱

۵-۲- مراحل شبیه‌سازی توسط LS DYNA /Implicit

در این مقاله، مدل مورد نظر شامل دو دیواره صلب مشابه و لوله جدار نازک می‌باشد که در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴ مدل‌سازی قطعات

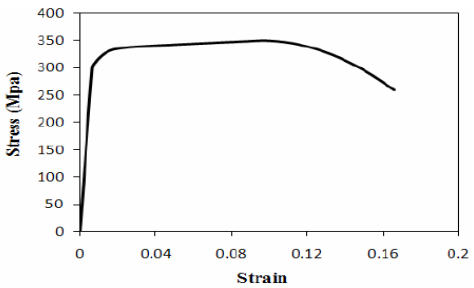
۵-۳- خواص مواد لوله‌ی استوانه‌ای

پذیرش مواد سبک وزن با حفظ جذب انرژی برای کاهش وزن انگیزه‌ی قابل توجهی است. آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم و کامپوزیت‌ها همه به عنوان جایگزینی برای فولاد نرم در سازه هواپیما یا بالگرد و یا خودرو پیشنهاد شده‌اند. بنابراین نمونه‌های این تحقیق از آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 می‌باشد. خواص این ماده در جدول ۲ داده شده است [۱۲].

جدول۲ خصوصیات فیزیکی و مکانیکی برای لوله آلومینیومی

آلومینیوم 6061-T6		
ضریب پواسون	-	۰/۳۳
چگالی	Kg/m^3	۲۷۰۰
مدول یانگ	GPa	۷۰
تنش تسلیم	MPa	۳۱۱
استحکام نهایی	MPa	۳۴۹

برای بدست آوردن اطلاعات دقیق مواد، از منحنی تنش – کرنش آلومینیوم 6061-T6 مطابق شکل ۵ استفاده شده است [۱۲].



شکل ۵ نمودار تنش – کرنش برای آلومینیوم 6061-T6

۵-۴- تعیین اتصالات و تشخیص برخوردها

برای تعریف تماس بین صفحات صلب با لوله ها با یکدیگر از تـماس"اتوماتیک نود به سطح[1]" استفاده می‌شود. از آنجا که در زمان فروریزش نمونه‌ها، المان‌های دیواره لوله با یکدیگر تماس پیدا می‌کنند از تماس "اتوماتیک سطح منفرد[2]" استفاده شده است تا از نفوذ المان‌ها به داخل یکدیگر جلوگیری شود. اصطکاک یکی از مهمترین مشخصه‌هایی است که در فرآیند شبیه‌سازی باید مشخص گردد. در شبیه‌سازی برای اعمال اصطکاک بین اجزا مدل از اصطکاک استاتیکی با ضریب ۰/۲ و اصطکاک دینامیکی با ضریب ۰/۳ استفاده شده است.

۵-۵- بارگذاری و ایجاد شرایط مرزی

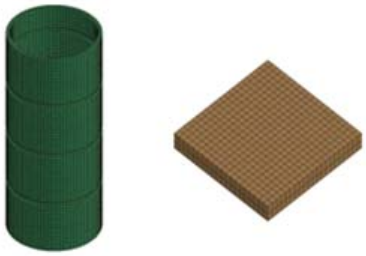
شرایط مرزی شبیه‌سازی به صورت زیر می‌باشد :۱- سطح زیر سازه در تمام جهات محدود شده است. ۲- صفحه برخورد کننده در بالای سازه در تمام جهات به جز در جهت عمودی محدود شده است.

۵-۶- مش‌بندی

شکل ۶ مش‌بندی قطعات نشان داده شده است. جهت همگرایی مش و رسیدن به اندازه‌ی مش مناسب که برای تمامی نمونه‌ها بکار برده شود، سایزهای مختلف مش برای یک نمونه در نظر گرفته شده و نیروی ماکزیمم لهیدگی هر سایز مش برای لوله‌ی استوانه‌ای بررسی گردید. مقادیر ماکزیمم نیروی لهیدگی در جدول۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، اندازه مش ۱/۸ mm می‌تواند نتایج دقیقی را ایجاد کند.

جدول۳ نیروی بیشینه لهیدگی برای سایزهای مختلف مش

لوله استوانه‌ای	
نیروی بیشینه لهیدگی (KN)	سایز مش(mm)
۹۲/۶۸۳۲	۲/۵
۹۱/۲۹۷۵	۲/۲۵
۹۰/۲۷۵۱	۲
۸۹/۶۸۱۲	۱/۹۰
۸۹/۳۶۳۳	۱/۸۰
۸۹/۱۹۹۴	۱/۷۰
۸۸/۵۸۳۱	۱/۶۰



شکل ۶ مش‌بندی قطعات

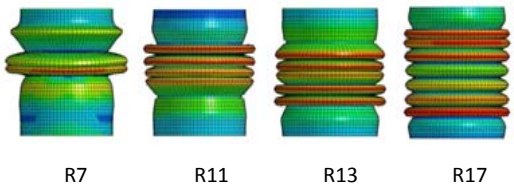
۵-۷- شرایط مسئله

در مدلسازی نمونه‌ها، سرعت و جرم برخورد به ترتیب ۱۰/۲ متر بر ثانیه و ۲۵۰ کیلوگرم هستند همچنین زمان برخورد ۱۰ میلی ثانیه می‌باشد.

[1] AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE
[2] AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE

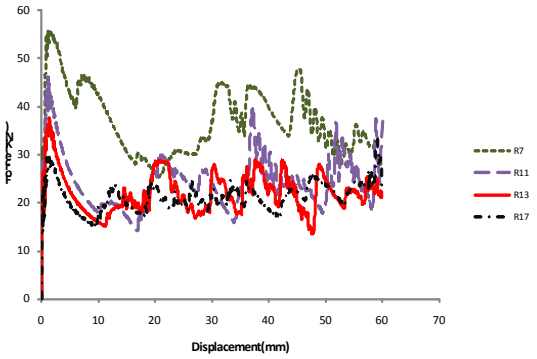
۶- بحث و بررسی

شکل ۷ فروریزش نمونه های شبیه سازی شده تحت بارگذاری دینامیکی برای مدل‌های مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل مشخص است همه نمونه‌ها دارای فروریزشی متقارن بوده و تعداد شیارها تأثیری در فروریزش نمونه های استوانه‌ای ندارند. بعد از یک تغییرشکل الاستیک اولیه، اولین لولای پلاستیک در شیار که معمولا نزدیک به یک انتهای لوله است شکل می‌گیرد. سپس لولاهای پلاستیک در شیارهای داخلی به سمت خارج لوله حرکت می‌کنند و لولاهای پلاستیک مربوط به شیارهای خارجی به سمت داخل سوق داده می‌شوند. این امر منجر به تشکیل چین‌ها به صورت متقارن می‌شود.



شکل ۷ فروریزش نمونه‌های استوانه‌ای شیاردار

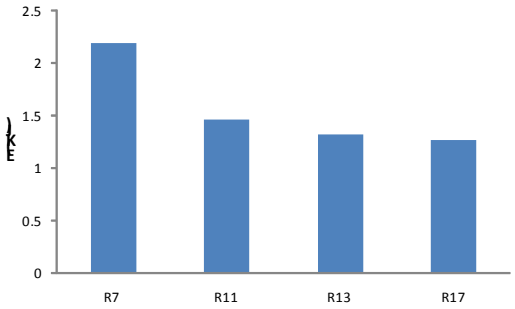
با توجه به شکل ۸، در ماکزیمم نیروی لهیدگی، ماده در انتهای باریک لوله تسلیم شده و با ایجاد اولین لولا پلاستیک نیرو به شدت کاهش می‌یابد. کاهش نیرو تا زمانی که یک چین به صورت کامل شکل بگیرد ادامه پیدا می‌کند. سپس لولای بعدی شکل گرفته و مجددا کاهش و افزایش نیرو در منحنی دیده می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که هر یک از قله‌های ایجاد شده در منحنی نیرو-جابجایی معرف تشکیل یک چین است. البته در تعداد شیارهای کم یک سری ناپایداریهایی در منحنی دیده می‌شود که برای نمونه‌های با تعداد شیار بالا (۱۷ شیار) به صورت پایدار و یکنواخت می باشد. اگر چه با وجود شیار میزان جذب انرژی کاهش یافته، ولی باعث ایجاد لولاهای پلاستیک یکنواخت در طول فرآیند لهیدگی لوله می‌شود.



شکل ۸ نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌ها

۶-۱- بررسی اثر تعداد شیار بر جذب انرژی

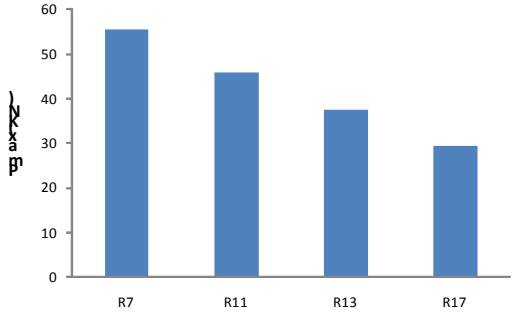
شکل ۹، نمودار جذب انرژی نمونه های شبیه سازی شده را نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می شود با افزایش تعداد شیار میزان جذب انرژی کاهش یافته است. لذا می توان با انتخاب تعداد شیار مناسب بیشترین جذب انرژی را در لوله های استوانه‌ای شیاردار تحت بار دینامیکی ایجاد کرد. نمونه با تعداد ۷ شیار دارای بیشترین میزان جذب انرژی و نمونه با ۱۷ شیار کمترین جذب انرژی را دارند.



شکل ۹ انرژی جذب شده نمونه‌ها

۶-۲- بررسی اثر تعداد شیار روی نیروی ماکزیمم لهیدگی

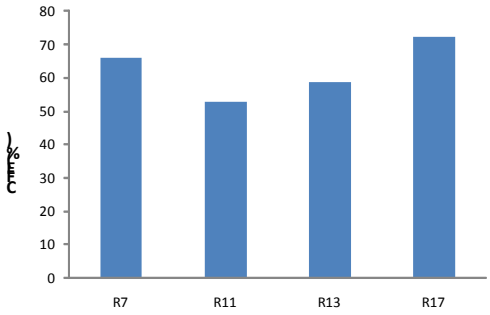
شکل ۱۰ نمودار نیروی ماکزیمم لهیدگی نمونه های شبیه سازی شده را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش تعداد شیارها مقدار نیروی ماکزیمم لهیدگی کاهش می‌یابد. نمونه با تعداد ۷ شیار دارای بیشترین مقدار نیروی ماکزیمم لهیدگی می‌باشد.



شکل ۱۰ ماکزیمم نیروی لهیدگی نمونه‌ها

۶-۳- بررسی اثر تعداد شیار روی راندمان نیروی لهیدگی

شکل ۱۱ نمودار راندمان نیروی لهیدگی نمونه‌های شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، نمونه با تعداد ۱۷ شیار دارای بیشترین مقدار راندمان نیروی لهیدگی می‌باشد.



شکل ۱۱ راندمان نیروی لهیدگی نمونه‌ها

۷- نتیجه گیری

هدف از این تحقیق، بررسی ضربه پذیری جاذب استوانه‌ای جدار نازک شیاردار تحت بارگذاری دینامیکی بوده است. لذا با استفاده از شبیه سازی عددی توسط نرم افزار ال.اس.داینا، میزان جذب انرژی، نیروی ماکزیمم لهیدگی و شاخص راندمان نیروی لهیدگی به عنوان اهداف طراحی بدست آمدند. نتایج حاصل از شبیه سازی عددی نشان داد که تعداد شیار تأثیری بر نحوه فروریزش لوله استوانه‌ای شیاردار ندارد. بنابراین با انتخاب صحیح تعداد شیار می‌توان باعث بهبود معیارهای ضربه پذیری لوله‌های استوانه‌ای شیاردار گردید.

۸- مراجع

[1] Andrews, K.R.F., G.L. England, and E. Ghani, *Classification of the axial collapse of cylindrical tubes under quasi-static loading.* International Journal of Mechanical Sciences. 25(9): p. 687-696, 1983.

[2] Mamalis, A.G., G.L. Viegelahn, D.E. Manolakos, and W. Johnson, *Experimental investigation into the axial plastic collapse of steel thin-walled grooved tubes.* International journal of impact engineering. 4(2): p. 117-126, 1986.

[3] Mamalis, A.G., D.E. Manolakos, G.L. Viegelahn, and W. Johnson, *Energy absorption and deformation modes of thin PVC tubes internally grooved when subjected to axial plastic collapse.* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 203(1): p. 1-8, 1989.

[4] Mamalis, A.G., D.E. Manolakos, G.A. Demosthenous, and W. Johnson, *Axial plastic collapse of thin bi-material tubes as energy dissipating systems.*

[5] Mamalis, A.G., G.L. Viegelahn, D.E. Manolakos, and W. Johnson, *Experimental investigation into the axial plastic collapse of steel thin-walled grooved tubes.* International journal of impact engineering. 4(2): p. 117-126, 1986

[6] Mamalis, A.G., D.E. Manolakos, M.B. Ioannidis, P.K. Kostazos, and S.N. Kastanias, *Numerical modelling of the axial plastic collapse of externally grooved steel thinwalled tubes.* International Journal of Crashworthiness. 8(6): p. 583-590, 2003.

[7] Daneshi, G.H. and S.J. Hosseinipour, *Grooves effect on crashworthiness characteristics of thin-walled tubes under axial compression.* Materials & design. 23(7): p. 611-617, 2002.

[8] Hosseinipour, S.J. and G.H. Daneshi, *Energy absorbtion and mean crushing load of thin-walled grooved tubes under axial compression.* Thin-Walled Structures. 41(1): p. 31-46, 2003.

[9] Hosseinipour, S.J. and G.H. Daneshi, *Experimental studies on thin-walled grooved tubes under axial compression.* Experimental mechanics. 44(1): p. 101-108, 2004

[10] Salehghaffari, S., M. Rais-Rohani, and A. Najafi, *Analysis and optimization of externally stiffened crush tubes.* Thin-walled structures. 49(3): p. 397-408, 2011

[11] Rezvani, M.J., M.D. Nouri, and H. Rahmani, *Experimental and numerical investigation of grooves shape on the energy absorption of 6061-T6 aluminium tubes under axial compression.* International Journal of Materials and Structural Integrity. 6(2): p. 151-168, 2012.

[12] Rezvani, M.J., M.D. Nouri, Axial Crumpling of Aluminum Frusta Tubes with Induced Axisymmetric Folding Patterns, International Journal of Materials and Structural Integrity. 6(2): p. 151-168, 2012