

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

نیما اسدی ده میراحمدی^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 لوله های مخروطی جدارنازک شیاردار با استفاده از شبیه سازی عددی در نرم افزار ال. اس. داینا^۱ تحت بارگذاری دینامیکی بررسی می شود. برای این منظور، شیارهای داخلی و خارجی با فاصله یکسان بر روی لوله مخروطی ایجاد شده تا تغییر شکل پلاستیک از محل شیار شکل گرفته و چین هایی به صورت متقارن بوجود آید. هدف از این مطالعه، بررسی تعداد شیار و عمق شیار در جذب انرژی، نیروی بیشینه لهیدگی و راندمان نیروی لهیدگی می باشد. نتایج حاصل از شبیه سازی عددی نشان می دهد که با افزایش تعداد شیار تغییر محسوسی در نحوه چین خوردگی نمونه ها مشاهده نمی شود. همچنین، با افزایش تعداد شیار جذب انرژی و نیروی ماکزیمم لهیدگی کاهش یافته و نوسانات منحنی نیرو-جابجایی به صورت یکنواخت تر ایجاد می شود. علاوه بر این، کاهش عمق شیار منجر به بهبود مشخصات ضربه پذیری لوله مخروط شیاردار می شود. نتایج حاصل از این تحقیق می تواند در صنایع مختلف از جمله خودروسازی، صنایع ریلی، هوافضا و آسانسور جهت جذب انرژی ضربه مورد استفاده قرار گیرد.

کلید واژگان

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

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

N. Asadi Dehmirahmadi¹, 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 conical 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 conical tubes. The purpose of this study was consideration of the effects of number of grooves and grooves depths 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 consequence of decreasing the deep of grooves is increasing energy absorption. The results of this study can be used in automobile, railway and aerospace industries.

Keywords

Specific Energy Absorption, Crush Force Efficiency, energy absorbing bumpers, Total energy absorbed, average energy absorbed.

جدار نازک با دو روش تئوری و آزمایشگاهی پرداخته اند. در سال ۱۹۹۱ میلیمس و همکاران [۴] لهیدگی محوری لوله های جدار نازک به عنوان سیستم های جذب انرژی را از طریق تئوری و آزمایشگاهی با در نظر گرفتن دو جنس ماده ی مختلف برای آن ها در نظر گرفتند. گوپتا [۵] در ۱۹۹۳ با در نظر گرفتن دو جنس مختلف برای لوله های استوانه ای و نسبت های متغیر طول به قطر و قطر به ضخامت و فرآیند آنیل کردن، به بررسی آزمایشگاهی تاثیر این پارامترها در رفتار لهیدگی لوله ها پرداخته اند. میلیمس و همکاران [۶] به مدلسازی لهیدگی محوری لوله های جدار نازک فولادی شیاردار، با متغیر در نظر گرفتن تعداد شیار خارجی، پرداخته اند. حسینی پور و دانشی [۷، ۸، ۹] در سال ۲۰۰۳ به بررسی های آزمایشگاهی جذب انرژی و نیروی متوسط لهیدگی در لوله های شیاردار جدار نازک تحت فشار محوری پرداخته اند و هدف را بهبود یکنواختی رفتار نیرو - جابجایی و پیش بینی

۱- مقدمه

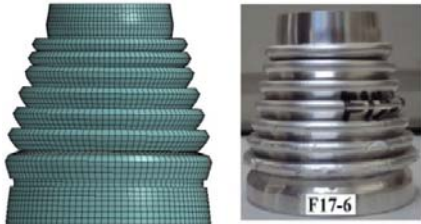
سیستم های جذب انرژی ضربه به دلیل حداقل کردن اثر ضربه وارده به سرنشینان و بالا بردن ایمنی در سوانح رانندگی و برخورد خودروها با موانع، در صنایع مختلف مانند کشتی سازی، راه آهن، هواپیمایی و به ویژه در صنایع خودروسازی از اهمیت ویژه ای برخوردار هستند. به این منظور سیستم های گوناگون جذب انرژی به کار گرفته شده اند که از این میان لوله های 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 سیستم های جذب انرژی کاربرد روز افزونی پیدا کرده اند. اندروز و همکارانش [۱] در سال ۱۹۸۳ نتایج یک بررسی آزمایشگاهی از مودهای لهیدگی محوری و خواص جذب انرژی در حالت شبه استاتیکی برای لوله های آلومینیومی را بیان کرده اند. در سال ۱۹۸۶ میلیمس و همکاران [۲] به بررسی آزمایشگاهی لهیدگی محوری لوله های فولادی جدار نازک رینگ دار پرداخته اند. میلیمس و همکاران [۳] در سال ۱۹۸۹ به بررسی جذب انرژی و تغییر شکل لوله های

¹ LS DYNA

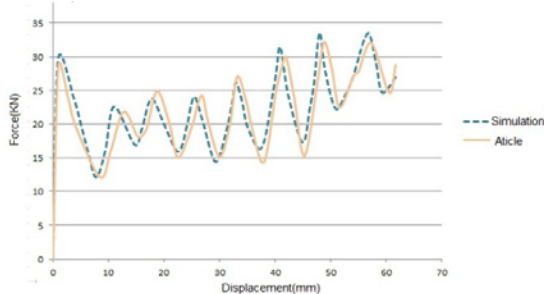
$$CFE = \frac{P_m}{P_{max}} \quad (2)$$

۴- اعتبارسنجی

به منظور اطمینان از روش مدلسازی، مدل ۱۷ شماره مرجع [۱۲] به روش شبه استاتیکی با نرم افزار ال.اس.داینما مدلسازی شد که همانطور که در شکل ۲ مشخص است شکل لهیدگی با نمونه عملی مشابه است و نمودار نیرو - جابجایی حدود ۳٪ خطا دارد که قابل چشم پوشی است.



الف



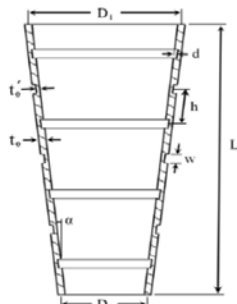
ب

شکل ۲ اعتبارسنجی شبیه سازی عددی با نمونه تجربی: الف) شکل لهیدگی، ب) نمودار نیرو-جابجایی

۵- شبیه سازی عددی

۱-۵- پارامترهای هندسی

در شکل ۳ پارامترهای هندسی لوله مخروط شیاردار نشان داده شده است. در این تحقیق متغیرهای طراحی شامل تعداد و عمق شیارها می باشند. تعداد شیارها ۹، ۱۱، ۱۳، ۱۵، ۱۷ و عمق شیارها در مدل های شبیه سازی شده سری اول ۱ میلیمتر و در مدل های شبیه سازی شده سری دوم ۰/۵ میلیمتر در نظر گرفته شده اند. همچنین، ثوابت طراحی در جدول ۱ نشان داده شده است.



قابلیت جذب انرژی بیان کرده اند. صالح غفاری و همکاران [۱۰] در ۲۰۱۱ به تحلیل جاذب های رینگدار پرداختند. در سال ۲۰۱۲ رضوانی و همکارانش [۱۱] به بررسی آزمایشگاهی و شبیه سازی رفتار لهیدگی و جذب انرژی لوله های شیاردار آلومینیومی با شکل شیار متفاوت پرداختند.

۲- بیان موضوع

تحقیقات انجام شده در زمینه جذب انرژی ضربه نشان می دهد که نحوه لهیدگی در اثر ضربه و میزان انرژی جذب شده در لوله های جدار نازک می تواند با ایجاد الگوهای مختلف بر روی لوله کنترل شود و سبب بالا بردن میزان کارایی این نوع از جاذب ها گردد. به دلیل اثرات متقابل این پارامترها بر روی هم با انتخاب تعداد ارامترهای بیشتر نتایج بهتری حاصل می شود که این مسئله باید در نظر گرفته شود. بنابراین، در این مطالعه با استفاده از شبیه سازی عددی، رفتار دینامیکی جاذب مخروط شیاردار با تغییر برخی پارامترها از قبیل تعداد شیار و عمق شیار به بررسی ضربه پذیری آنها پرداخته می شوند.

۳- شاخص های طراحی جاذب انرژی

شاخص های مهمی در مورد جاذب های 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 می باشد.

۱-۳- جذب انرژی

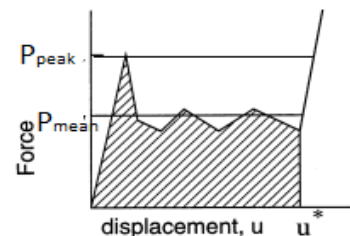
جذب انرژی، $E_{absorbed}$ به عنوان انتگرال منحنی نیرو-جابجایی به

شرح زیر تعریف می شود:

$$E_{absorbed} = \int Pd\delta \quad (1)$$

۲-۳- ماکزیمم نیروی لهیدگی

مطابق شکل ۱ نیروی ماکزیمم لهیدگی در تشکیل اولین چین نقش دارد. حداکثر نیرو در جاذب های جدار نازک مربوط به تغییر شکل الاستیک است که بعد از آغاز تغییر شکل پلاستیک به سرعت کاهش می یابد. 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.

شکل ۳ جاذب مخروطی شیاردار

جدول ۱ مقادیر ثوابت طراحی		
مقدار	واحد	پارامتر
۱۱۷	mm	طول
۳	mm	عرض شیار
۲	mm	ضخامت دیواره
۵۸	mm	قطر بزرگ
۶	Degree	زاویه نیم راس مخروط

شکل ۵ نمودار تنش - کرنش برای آلومینیوم 6061-T6

۴-۵- تعیین اتصالات و تشخیص برخورد ها

برای تعریف تماس بین صفحات صلب با لوله ها با یکدیگر از تماس "اتوماتیک نود به سطح"^۱ استفاده می شود. از آنجا که در زمان فروریزش نمونه ها، المان های دیواره لوله با یکدیگر تماس پیدا می کنند از تماس "اتوماتیک سطح منفرد"^۲ استفاده شده است تا از نفوذ المان ها به داخل یکدیگر جلوگیری شود. اصطکاک یکی از مهمترین مشخصه هایی است که در فرآیند شبیه سازی باید مشخص گردد. در شبیه سازی 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

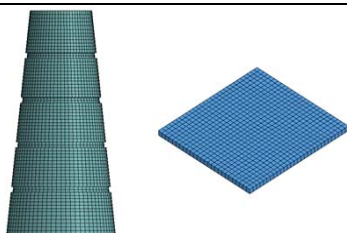
شرایط مرزی شبیه سازی به صورت زیر می باشد: ۱- سطح زیر سازه در تمام جهات محدود شده است. ۲- صفحه برخورد کننده در بالای سازه در تمام جهات به جز در جهت عمودی محدود شده است.

۶-۵- مش بندی

شکل ۶ مش بندی قطعات نشان داده شده است. جهت همگرایی مش و رسیدن به اندازه ی مش مناسب که برای تمامی نمونه ها بکار برده شود، سایزهای مختلف مش برای یک نمونه در نظر گرفته شده و نیروی ماکزیمم لهیدگی هر سایز مش برای لوله ی مخروطی بررسی گردید. مقادیر ماکزیمم نیروی لهیدگی در جدول ۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، اندازه مش ۲ mm می تواند نتایج دقیقی را ایجاد کند.

جدول ۳ نیروی بیشینه لهیدگی برای سایزهای مختلف مش

لوله مخروطی	
نیروی بیشینه لهیدگی (KN)	سایز مش (mm)
۱۱۰/۸۵۵	۳/۰
۱۰۳/۸۲۷	۲/۷۵
۹۸/۳۱۳	۲/۵۰
۹۷/۶۲۰	۲/۲۵
۹۶/۸۳۰	۲/۰
۹۶/۵۴۶	۱/۸۰
۹۶/۱۸۷	۱/۶۰

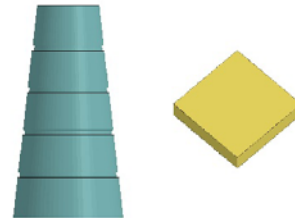


شکل ۶ مش بندی قطعات

۷-۵- شرایط مسئله

۲-۵- مراحل شبیه سازی توسط LS DYNA /Implicit

در این مقاله، مدل مورد نظر، شامل دو سری می باشد. سری اول تشکیل شده یک لوله جدار نازک مخروطی با عمق شیار ۱ میلی متر و سری دوم نیز شامل یک لوله جدار نازک مخروطی با عمق شیار ۰/۵ میلی متر می باشد.



شکل ۴ مدل سازی قطعات

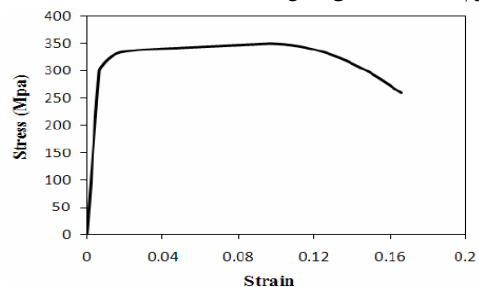
۳-۵- خواص مواد لوله ی مخروطی

پذیرش مواد سبک وزن با حفظ جذب انرژی برای کاهش وزن انگیزه ی قابل توجهی است. آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم و کامپوزیت ها همه به عنوان جایگزینی برای فولاد نرم در سازه هواپیما یا بالگرد و یا خودرو پیشنهاد شده اند. بنابراین نمونه های این تحقیق از آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 می باشد. خواص این ماده در جدول ۲ داده شده است [۱۲].

جدول ۲ خصوصیات فیزیکی و مکانیکی برای لوله آلومینیومی

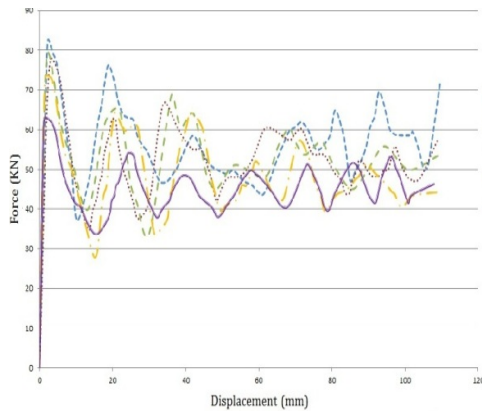
آلومینیوم 6061-T6		
ضریب پواسون	-	۰/۳۳
چگالی	Kg/m ³	۲۷۰۰
مدول یانگ	GPa	۷۰
تنش تسلیم	MPa	۳۱۱
استحکام نهایی	MPa	۳۴۹

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

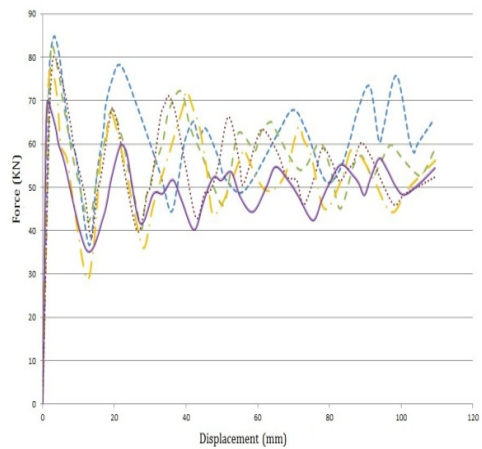


¹ AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE
² AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE

به صورت پایدار و یکنواخت می باشد. اگر چه با وجود شیار میزان جذب انرژی کاهش یافته، ولی باعث ایجاد ولی باعث ایجاد لولاهای پلاستیک یکنواخت در طول فرآیند لهیدگی لوله می شود.



الف



ب

شکل ۷ نمودار نیرو-جابجایی: الف) نمونه های با عمق شیار ۱mm، ب) نمونه های با عمق شیار ۰/۵mm

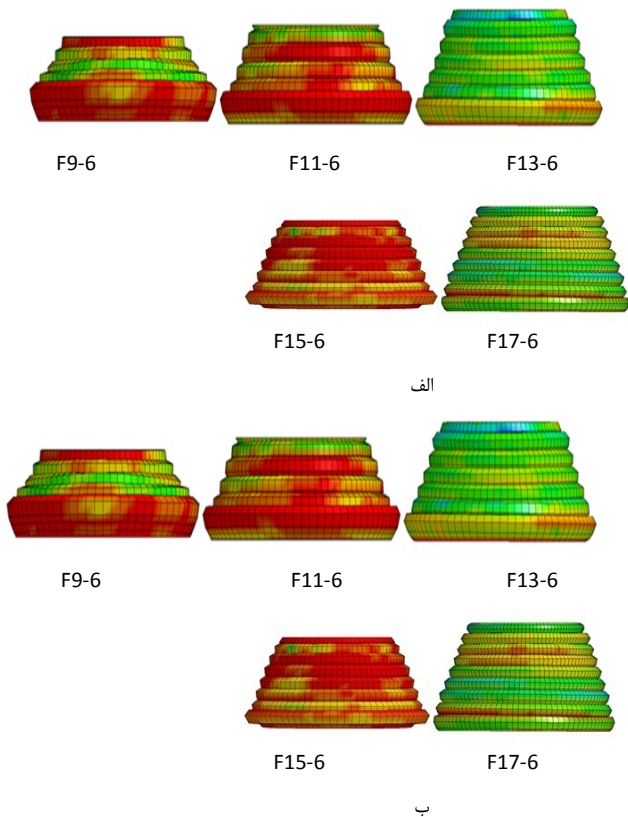
۱-۶- بررسی تعداد و اثر شیار روی جذب انرژی

شکل ۸ نمودار جذب انرژی نمونه های شبیه سازی شده برای نمونه های با عمق شیار ۱mm و ۰/۵mm را نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می شود با افزایش تعداد شیار میزان جذب انرژی کاهش یافته و این میزان کاهش جذب انرژی برای نمونه های با عمق شیار ۱mm بیشتر است. لذا می توان با انتخاب تعداد شیار و عمق شیار مناسب بیشترین جذب انرژی را در لوله های مخروطی شیاردار تحت بار دینامیکی ایجاد کرد. نمونه های با تعداد شیار ۹ دارای بیشترین جذب انرژی و نمونه های با شیار ۱۷ کمترین جذب انرژی را دارند.

در مدلسازی نمونه ها، سرعت و جرم برخورد به ترتیب ۲۰ متر بر ثانیه و ۶۰ کیلوگرم هستند همچنین زمان برخورد ۵ میلی ثانیه می باشد.

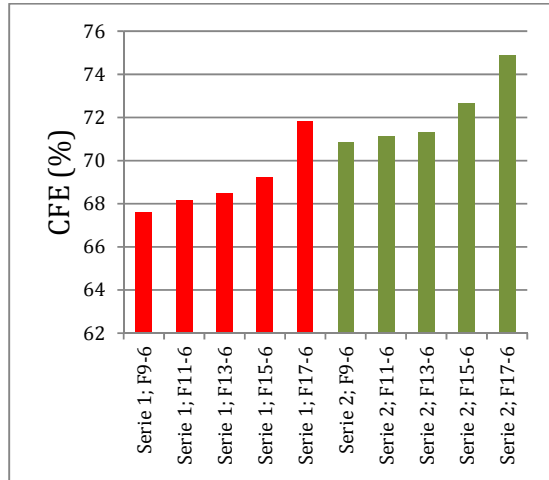
۶- بحث و بررسی

شکل ۶ فروریزش نمونه های شبیه سازی شده تحت بارگذاری دینامیکی برای مدل های مختلف را نشان می دهد. همانطور که از شکل مشخص است همه نمونه ها دارای فروریزشی متقارن بوده و تعداد و عمق شیارها تأثیری در فروریزش نمونه های مخروطی ندارند. بعد از یک تغییر شکل الاستیک اولیه، اولین لولای پلاستیک در شیار که معمولاً نزدیک به یک انتهای لوله است شکل می گیرد. سپس لولاهای پلاستیک در شیارهای داخلی به سمت خارج لوله حرکت می کنند و لولاهای پلاستیک مربوط به شیارهای خارجی به سمت داخل سوق داده می شوند. این امر منجر به تشکیل چین ها به صورت متقارن می شود.

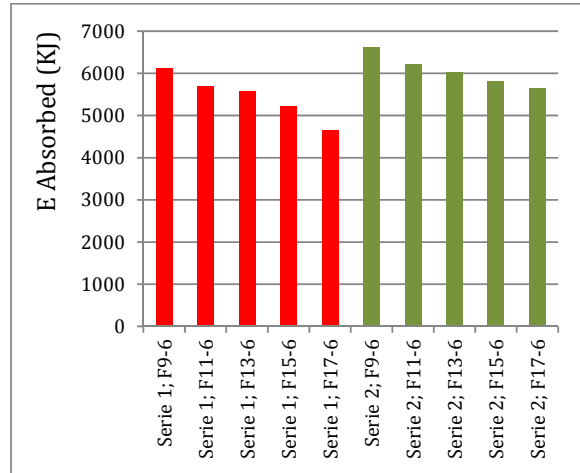


شکل ۶ فروریزش نمونه های مخروطی شیاردار: الف) با عمق شیار ۱mm، ب) با عمق شیار ۰/۵mm

با توجه به شکل ۷، در ماکزیمم نیروی لهیدگی، ماده در انتهای باریک لوله تسلیم شده و با ایجاد اولین لولا پلاستیک نیرو به شدت کاهش می یابد. کاهش نیرو تا زمانی که یک چین به صورت کامل شکل بگیرد ادامه پیدا می کند. سپس لولای بعدی شکل گرفته و مجدداً کاهش و افزایش نیرو در منحنی دیده می شود. بنابراین می توان گفت که هر یک از قله های ایجاد شده در منحنی نیرو-جابجایی معرف تشکیل یک چین است. البته در تعداد شیارهای کم یک سری ناپایداریهایی در منحنی دیده می شود که برای نمونه های با تعداد شیار بالا (۱۷ شیار)



شکل ۱۰ راندمان نیروی لهیدگی



شکل ۸ انرژی جذب شده برای نمونه های با عمق شیار ۱mm و عمق شیار ۰.۵mm

۷- نتیجه گیری

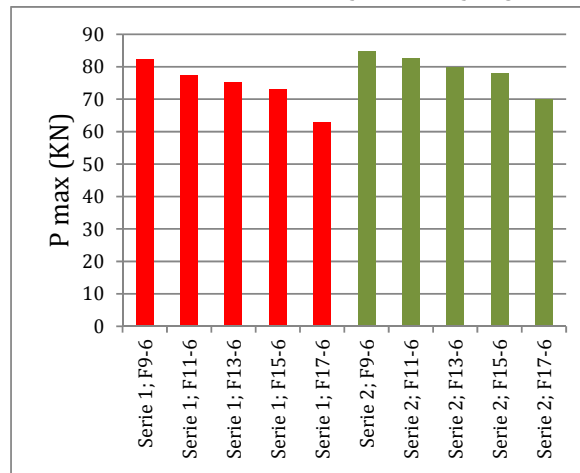
هدف از این تحقیق، بررسی ضربه پذیری جاذب مخروطی جدار نازک شیاردار تحت بارگذاری دینامیکی بوده است. لذا با استفاده از شبیه سازی عددی توسط نرم افزار ال.اس.داینما میزان جذب انرژی، نیروی ماکزیمم لهیدگی و راندمان نیروی لهیدگی شاخص راندمان نیروی لهیدگی به عنوان اهداف طراحی بدست آمدند. نتایج حاصل از شبیه سازی عددی نشان داد که تعداد شیار تأثیری در نحوه فروریزش لوله مخروط شیاردار ندارد. بنابراین با انتخاب صحیح تعداد و عمق شیار می توان باعث بهبود معیارهای ضربه پذیری لوله های مخروط 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. Viegelah, D.E. Manolakas, 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. Manolakas, G.L. Viegelah, 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. Manolakas, G.A. Demosthenous, and W. Johnson, *Axial plastic collapse of thin bi-material tubes as energy dissipating systems*.
- [5] Mamalis, A.G., G.L. Viegelah, D.E. Manolakas, 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. Manolakas, 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. Hosseini, *Grooves effect on crashworthiness characteristics of thin-walled tubes under axial compression*. Materials & design. 23(7): p. 611-617, 2002.
- [8] Hosseini, S.J. and G.H. Daneshi, *Energy absorption and mean crushing load of thin-walled grooved tubes under axial compression*. Thin-Walled Structures. 41(1): p. 31-46, 2003.
- [9] Hosseini, 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*.

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

شکل ۹ نمودار نیروی ماکزیمم لهیدگی نمونه های شبیه سازی شده برای لوله های مخروط با عمق شیار ۱mm و ۰.۵mm را نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می شود با افزایش تعداد شیار مقدار نیروی ماکزیمم لهیدگی کاهش یافته و این میزان کاهش نیروی ماکزیمم لهیدگی برای نمونه های با عمق شیار ۰.۵mm بیشتر است.



شکل ۹ ماکزیمم نیروی لهیدگی برای نمونه های با عمق شیار ۱mm و عمق شیار ۰.۵mm

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

شکل ۱۰ نمودار راندمان نیروی لهیدگی نمونه های شبیه سازی شده برای لوله های مخروط با عمق شیار ۱mm و ۰.۵mm را نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می شود با افزایش تعداد شیار مقدار راندمان نیروی لهیدگی افزایش یافته که این میزان افزایش برای نمونه های با عمق شیار ۰.۵mm بیشتر است.

- [12] International Journal of Materials and Structural Integrity. 6(2): p. 151-168, 2012.
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.