

شبیه سازی عددی جذب انرژی ضربه گیرهای دولوله ای استوانه ای

محمدرضا رضائی آباده^۱، محمدجواد رضوانی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۲- استادیار گروه مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

*Semenan, 3513137111, rezvani57@gmail.com

چکیده

هدف از این مقاله، به منظور مشخص شدن ضربه پذیری این نوع جاذب های جدارنازک دولوله ای به عنوان سیستم جذب انرژی می باشد. این مدل های دولوله ای بعد از اعمال نیرو در داخل همدیگر فرو می روند. بنابراین، جهت دستیابی به این هدف تأثیر قطرهای مختلف لوله رینگ دار و لوله ساده، ضخامت لوله رینگ دار و لوله ساده همگی با اعمال اثر فوم بر روی معیارهای ضربه پذیری لوله های دوتایی بررسی می شوند. لذا، با استفاده از شبیه سازی عددی توسط نرم افزار آباکوس به بررسی پارامترهای ضربه پذیری شامل جذب انرژی ویژه و راندمان نیروی لهیدگی بعنوان اهداف آزمایش می پردازیم. این نوع سیستم جاذب انرژی می تواند در صنایع هوایی، کشتی سازی، خودروسازی، صنایع ریلی و آسانسورها جهت جذب انرژی ضربه استفاده شود. در انتها پارامترهای هندسی مناسب و بهترین نمونه ها از لحاظ معیارهای در نظر گرفته شده با توجه به اهداف طراحی، معرفی می شوند.

کلید واژگان

جاذب دولوله ای ساده، جاذب دولوله ای رینگ دار و ساده، جذب انرژی ویژه، راندمان نیروی لهیدگی، انرژی جذب شده کل، نیروی متوسط لهیدگی

Numerical simulation of energy absorbing bumpers two cylindrical tube filled with polyurethane foam

M.RezaeiAbadeh¹, 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

The purpose of this article, in order to determine the impact of this type of attraction is thin-walled tubes as energy absorbing system. The twin-tube models after applying a force inside each sink. So, in order to achieve this goal and pipes of different diameters of pipe rings and simple tube, The thickness of the ring pipes and tubes, all with the impact of foam on bumpers are considered on cylindrical tube. Therefore, using numerical simulations by Abaqus software to evaluate the impact parameters, including Specific Energy Absorption (SEA) and Crush Force Efficiency (CFE) as discussed testing purposes. The energy absorbing system can be used in the aerospace industry, shipbuilding, automotive, railway industry and elevators used to absorb impact energy. Finally, appropriate geometric parameters and the best examples of criteria considered with respect to the objectives, are introduced.

Keywords

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

بررسی آزمایشگاهی از مودهای لهیدگی محوری و خواص جذب انرژی در حالت شبه استاتیکی برای لوله های آلومینیومی را بیان کرده اند. در ۱۹۸۶ میلیس و دیگران [۵] به بررسی آزمایشگاهی لهیدگی محوری لوله های فولادی جدار نازک رینگ دار پرداخته اند. میلیس و دیگران [۶] در ۱۹۸۹ به بررسی جذب انرژی و تغییر شکل لوله های جدار نازک با دو روش تئوری و آزمایشگاهی پرداخته اند. در ۱۹۹۱ میلیس و دیگران [۷] 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 ای مختلف برای آن ها در نظر گرفتند. گوپتا [۸] 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 تأثیر این پارامترها در رفتار لهیدگی لوله ها پرداخته اند. میلیس، مانولاکوس و دیگران [۹] به مدلسازی لهیدگی محوری لوله های جدار نازک فولادی شیاردار، با متغیر در نظر گرفتن تعداد شیار خارجی، پرداخته اند. حسینی پور و دانشی [۱۰، ۱۱] در ۲۰۰۳ به بررسی های آزمایشگاهی جذب انرژی و نیروی متوسط لهیدگی در لوله های شیاردار جدار

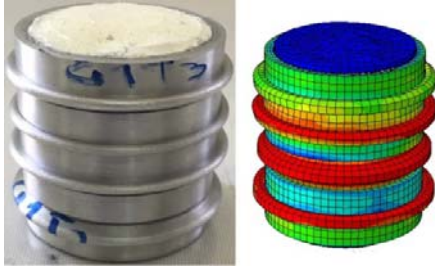
۱- مقدمه

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. صالح غفاری، روحانی و نجفی [۱] در ۲۰۱۱ به تحلیل این نوع جاذب های رینگ دار پرداخته بودند. در ۲۰۱۲ رضوانی، دامغانی نوری و رحمانی [۲] به بررسی آزمایشگاهی و شبیه سازی رفتار لهیدگی و جذب انرژی لوله های شیاردار آلومینیومی با شکل شیار متفاوت پرداختند. اندروز، انگلاند و غانی [۴] در ۱۹۸۳ نتایج یک

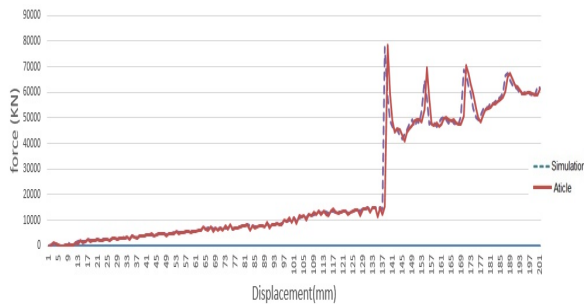
$$CFE = \frac{P_m}{P_{max}} \quad (2)$$

۴- مراحل شبیه سازی

به منظور اطمینان از روش مدل سازی نمودار نیرو - جابجایی یکی از مدل ها را باهم مقایسه می کنیم. و همان طور که مشخص است در این نمودار فقط دو و نیم درصد خطا داریم که قابل چشم پوشی می باشد.



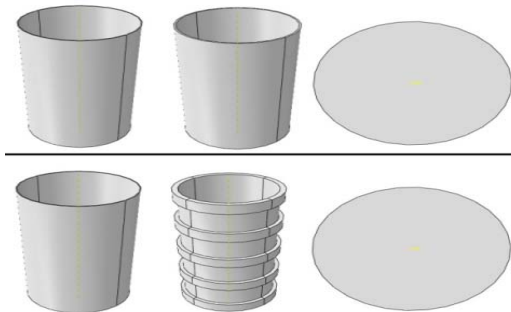
الف



ب

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

مدل مورد نظر در این پژوهش، شامل دو گروه می شود که اولین گروه آن تشکیل شده از صفحه ی صلب، و یک لوله ی جدار نازک ساده و یک لوله جدار نازک رینگ دار که مورد شبیه سازی قرار می گیرد و گروه دوم نیز تشکیل شده از صفحه صلب، و دو لوله جدار نازک ساده است. که در شکل ۳ نشان داده شده اند.



شکل ۳ مدل سازی قطعات در مدل پارت

نازک تحت فشار محوری پرداخته اند و هدف را بهبود یکنواختی رفتار نیرو - جابجایی و پیش بینی قابلیت جذب انرژی بیان کرده اند.

۲- بیان موضوع

تحقیقات انجام شده در زمینه ی 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 پارامترهای بیشتر نتایج بهتری حاصل می شود که این مسئله باید در نظر گرفته شود. بنابراین جهت بهبود طراحی این لوله ها، در این تحقیق به مقایسه پارامترهای ضربه پذیری با بررسی برخی پارامترهای هندسی مربوط به لوله های جدار نازک رینگ دار و ساده، پرداخته شده است. همچنین برای مدل سازی نمونه های مورد نیاز از نرم افزار آباکوس^۱ استفاده شده است.

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.

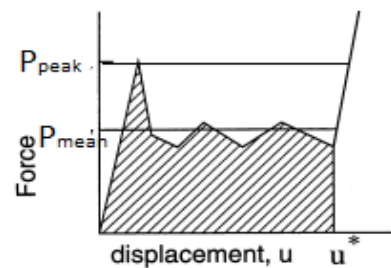
۳-۱- جذب انرژی

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

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

۳-۲- 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.

^۱ ABAQUS

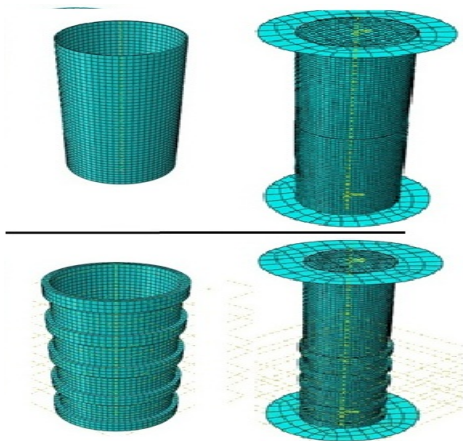
۵- شبیه سازی عددی

۳-۵- بار گذاری و ایجاد شرایط مرزی

شرایط مرزی شبیه سازی ما به صورت زیر می باشد: ۱- نقطه ی مرجع در پایین سازه در تمام جهات محدود شده است. ۲- نقطه ی مرجع در بالای سازه در تمام جهات به جز در جهت عمودی محدود شده است.

۴-۵- مش بندی

در مرحله ی بعد مش بندی انجام شده است. در شکل ۵ مش بندی قطعات و کل نمونه را مشاهده می کنید.



شکل ۵ مش بندی قطعات مدل مورد نظر

۶- تحلیل نتایج

۱-۶- مدل های شبیه سازی شده

مقادیر پارامترهای طراحی در جداول ۲ و ۳ آورده شده اند. نمونه های آزمایش مطابق جدول ۲ با تعدادی حروف مشخص شده اند که حرف (G) نشان دهنده گروه، حرف (T) نشان دهنده نمونه تست، حرف (S) نشان دهنده مدل ساده، حرف (R) نشان دهنده مدل رینگ دار می باشد. حالا به بررسی ۱۸ نمونه ای که کلیه اندازه های آنها را در جدول ۲ ارائه کردیم می پردازیم. شایان ذکر است که مدل ها دو لوله ای می باشند.

جدول ۲ مقادیر متغیرهای طراحی

پارامتر	واحد	مقدار
ضخامت دیواره	mm	۰/۵ ~ ۱/۵
قطر داخلی	mm	۵۰ ~ ۶۱/۹
قطر بیرونی	mm	۵۱ ~ ۶۲

جدول ۳ مقادیر ثوابت طراحی

پارامتر	واحد	مقدار
طول	mm	۱۱۰
فاصله دو استوانه	mm	۲/۴
فاصله دو رینگ	mm	۱۷/۵

۲-۶- نتایج شبیه سازی

تغییر شکل لهیدگی نمونه ها در شکل ۶ نشان داده شده است. در این نمونه های شبیه سازی شده ابتدا لوله داخلی بصورت جازنی در بالای لوله خارجی قرار گرفته و با اعمال نیرو، لوله داخلی با اصطکاک در لوله خارجی

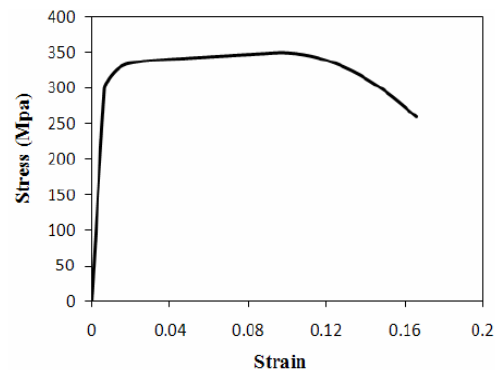
۱-۵- خواص مواد لوله ای استوانه ای

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 ۱ داده شده است [۲].

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 [۲].



شکل ۴ نمودار تنش - کرنش برای آلومینیوم 6061-T6

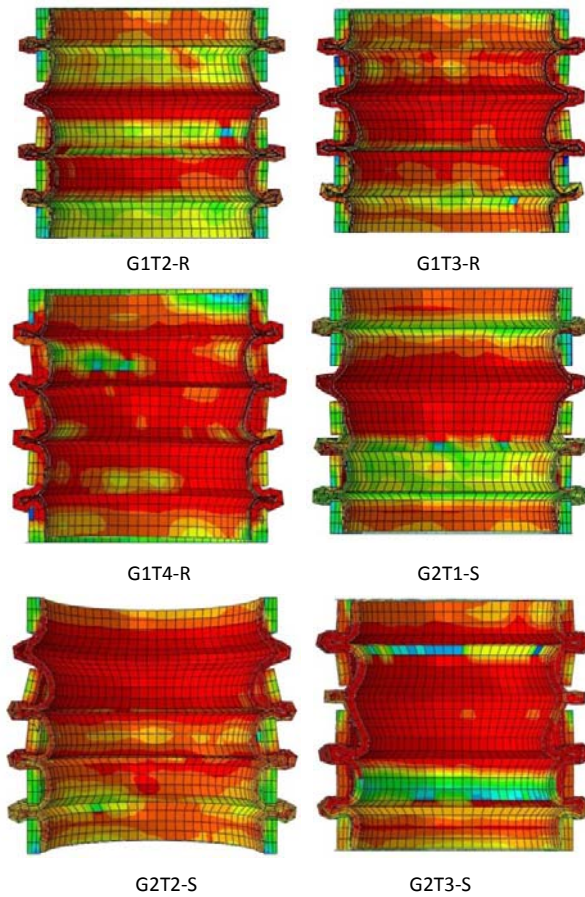
۲-۵- تعیین اتصالات و تشخیص برخوردها

برای تعریف تماس بین صفحات صلب با لوله و فوم و لوله ها با یکدیگر از تماس "سطح به سطح" استفاده می شود و از آنجا که در زمان فروریزش نمونه ها، المان های دیواره لوله با یکدیگر تماس پیدا می کنند از خود تماسی^۱ استفاده شده است تا از نفوذ المان ها به داخل یکدیگر جلوگیری شود. از آنجایی که لوله های پر شده از فوم شامل دو نوع مواد با سختی های مختلف هستند (لوله آلومینیوم و فوم پلی اورتان) و لوله بین دو صفحه صلب قرار دارد، وضعیت تماس به طور کامل شبیه سازی شده است. 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 فرمولاسیون اصطکاک پنالتی^۲ استفاده می شود

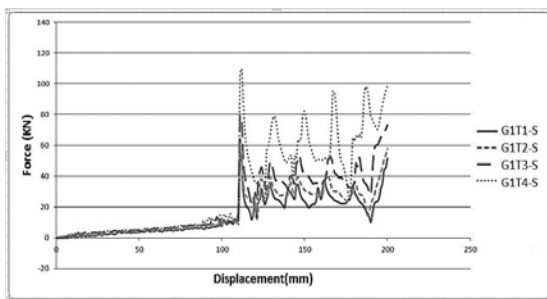
² Self-contact

¹ Penalty

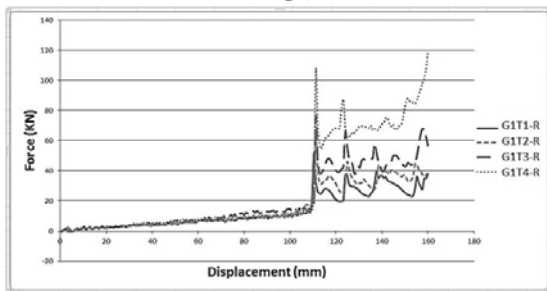
قرار می گیرد، جاذب در ابتدا به صورت الاستیک رفتار می کند و نیرو با یک نرخ ثابت تا یک مقدار ماکزیمم افزایش می یابد، سپس ماده تسلیم می شود و یک چین پلاستیک محیطی ایجاد می کند، بعد از آن نیرو کاهش می یابد و تغییر شکل ناپایدار می شود تا یک لایه ایجاد شود و این حالت تا انتها ادامه می یابد. و همانطور که مشاهده می شود، لوله ها به حالت متقارن فرو می ریزند. فروریزش متقارن به خاطر قابلیت اطمینان و کارایی در جذب انرژی مطلوبترین طراحی به شمار می رود. برای تحلیل و بهتر بررسی کردن نمونه ها به دلیل اینکه دو لوله ای هستند آنها را بصورت برش خورده در شکل ۶ نمایش می دهیم



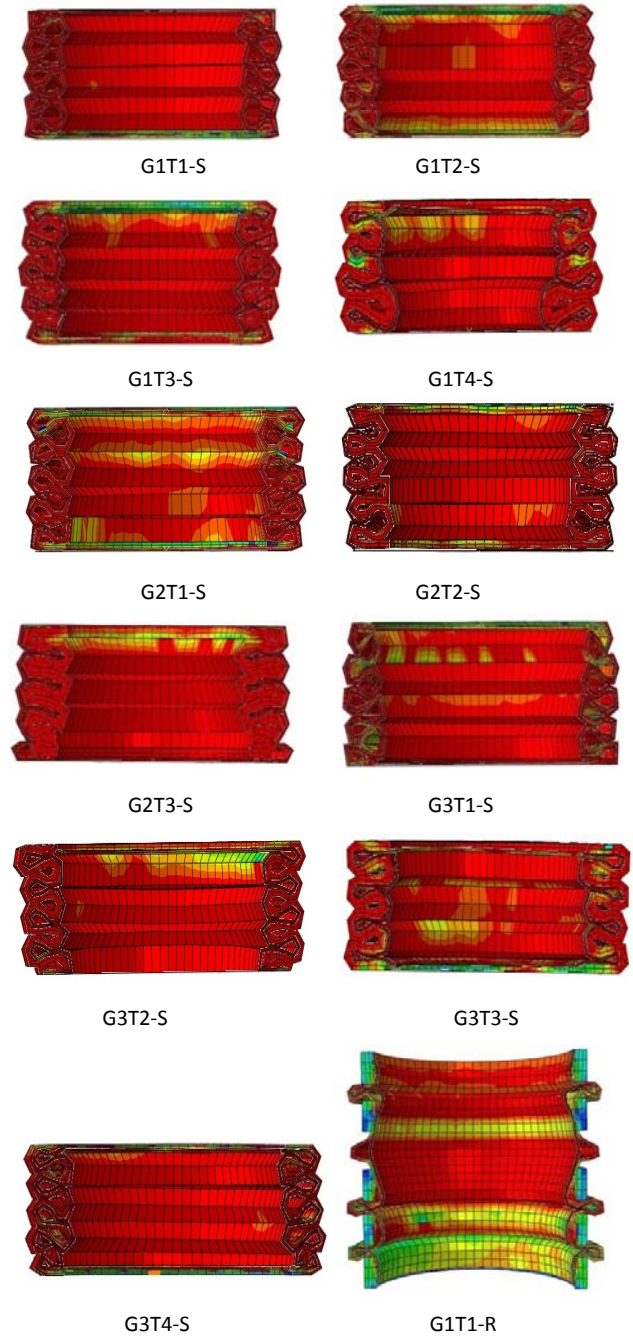
شکل ۶ فروریزش نمونه ها



الف

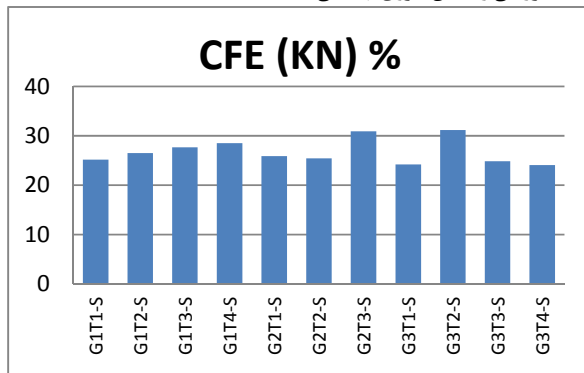


شکل ۷ نمودار نیرو - جابجایی



G3T4-S که بیشترین ضخامت در لوله خارجی را دارا می باشد بیشترین نیروی ماکزیمم را بدست آورده است.

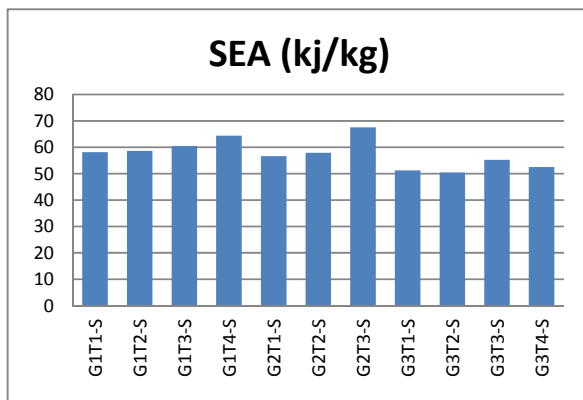
۵-۶- بررسی راندمان نیروی لهیدگی



شکل ۱۰ راندمان نیروی لهیدگی نمونه های شبه سازی شده برای نمونه ها

بیشترین راندمان نیروی لهیدگی نیز در گروه سوم که ضخامت لوله داخلی در آن ثابت مانده و ضخامت لوله خارجی در آن متغیر می باشد بدست آمده است که بهترین گزینه اینجا مدل G3T2-S می باشد که از درصد جذب انرژی بیشتری نسبت به وزن جاذب برخوردار است.

۶-۶- انرژی جذب شده ویژه



شکل ۱۱ جذب شده ویژه نمونه های شبه سازی شده برای نمونه ها

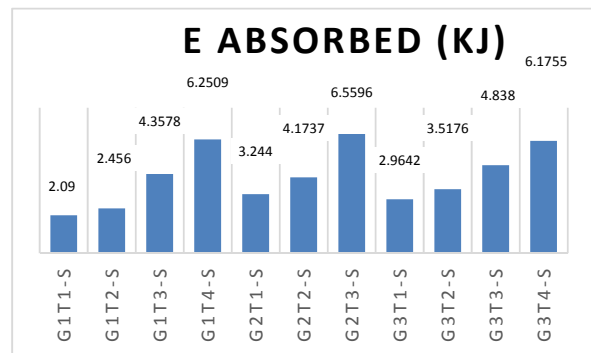
بهترین جذب انرژی ویژه نیز در گروه دوم که در آن ضخامت لوله خارجی ثابت مانده و ضخامت لوله داخلی متغیر است بدست آمده است

۷- نتیجه گیری

هدف از این پایان نامه، ضربه پذیری جاذب های دولوله ای استوانه ای جدار نازک ساده و رینگ دار می باشد. لذا با استفاده از شبه سازی عددی معیارهای ضربه پذیری شامل جذب انرژی ویژه و راندمان نیروی لهیدگی به عنوان اهداف طراحی بدست آمدند. راندمان نیروی لهیدگی در دو مدل (G1T3-R) و (G2T3-R) بیشترین راندمان ها را دارند. در نهایت از مدل های رینگ دار بعنوان بهترین مدل می توان مدل (G2T3-R) را به دلیل انرژی جذب شده بهتر، راندمان نیروی لهیدگی بالاتر و انرژی جذب شده ویژه بیشتر، معرفی نمود و در مدل های دولوله ای ساده، مدل (G2T3-S) را نیز بدلیل

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 ولای بعدی شکل گرفته و مجددا 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 لوله های با ضخامت زیاد یک سری ناپایداری هایی در منحنی دیده می شود که برای نمونه های با ضخامت کم به صورت پایدار و یکنواخت می باشد.

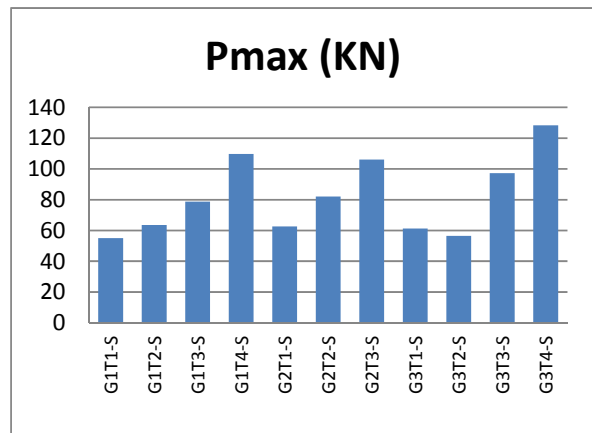
۳-۶- بررسی جذب انرژی



شکل ۸ جذب انرژی نمونه های شبه سازی شده برای نمونه ها

اینجا سه گروه مختلف داریم که جذب انرژی در هر گروه با افزایش ضخامت افزایش می یابد ولی در گروه دوم در مدل G2-T3-S بیشترین جذب انرژی بدست آمده است که نشان می دهد اگر ضخامت لوله خارجی ثابت باشد و ضخامت لوله داخلی افزایش یابد، جذب انرژی بیشتری خواهیم داشت.

۴-۶- بررسی نیروی ماکزیمم لهیدگی



شکل ۹ ماکزیمم نیروی لهیدگی نمونه های شبه سازی شده برای نمونه

بیشترین نیروی جذب شده در گروه سوم و با شرایط ضخامت لوله داخلی ثابت و ضخامت لوله خارجی متغیر باشد بدست آمده است و مدل

- انرژی جذب شده خیلی خوب، راندمان لهیدگی مناسب و بهترین انرژی جذب شده ویژه، بعنوان بهترین جاذب معرفی می کنیم
- ۸- مراجع
- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Jahan, A. and K.L. Edwards, Multi-criteria decision analysis for supporting the selection of engineering materials in product design. 2013: Butterworth-Heinemann.
- [4] 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.
- [5] Mamalis, A.G., G.L. Viegelahm, D.E. Manolacos, 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. Manolacos, G.L. Viegelahm, 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.
- [7] Mamalis, A.G., D.E. Manolacos, G.A. Demosthenous, and W. Johnson, *Axial plastic collapse of thin bi-material tubes as energy dissipating systems*. International Journal of Impact Engineering. 11(2): p. 185-196, 1991.
- [8] Gupta, N.K. and S.K. Gupta, *Effect of annealing, size and cut-outs on axial collapse behaviour of circular tubes*. International journal of mechanical sciences. 35(7): p. 597-613, 1993.
- [9] Mamalis, A.G., D.E. Manolacos, 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.
- [10] Daneshi, G.H. and S.J. Hosseini-pour, Grooves effect on crashworthiness characteristics of thin-walled tubes under axial compression. Materials & design. 23(7): p. 611-617, 2002.
- [11] Hosseini-pour, 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.
- [12] Hosseini-pour, S.J. and G.H. Daneshi, *Experimental studies on thin-walled grooved tubes under axial compression*. Experimental mechanics. 44(1): p. 101-108, 2004.
- [13] Gupta, N.K., A study of the influence of diameter and wall thickness of cylindrical tubes on their axial collapse. Thin-walled structures. 44(3): p. 290-300, 2006.
- [14] Mokhtarnezhad, F., S. Salehghaffari, and M. Tajdari, Improving the crashworthiness characteristics of cylindrical tubes subjected to axial compression by cutting wide grooves from their outer surface. International Journal of Crashworthiness. 14(6): p. 601-611, 2009.
- [15] Salehghaffari, S., M. Panahipoor, and M. Tajdari, *Controlling the axial crushing of circular metal tubes using an expanding rigid ring press fitted on top of the structure*. International Journal of Crashworthiness. 15(3): p. 251-264, 2010.
- [16] Salehghaffari, S., M. Tajdari, M. Panahi, and F. Mokhtarnezhad, *Attempts to improve energy absorption characteristics of circular metal tubes subjected to axial loading*. Thin-Walled Structures. 48(6): p. 379-390, 2010.
- [17] Alavi Nia, A., H. Badnava, and K. Fallah Nejad, An experimental investigation on crack effect on the mechanical behavior and energy absorption of thin-walled tubes. Materials & Design. 32(6): p. 3594-3607, 2011.
- [18] Bahraminasab, M., B.B. Sahari, K.L. Edwards, F. Farahmand, T.S. Hong, M. Arumugam, and A. Jahan, *Multi-objective design optimization of functionally graded material for the femoral component of a total knee replacement*. Materials & Design. 53: p. 159-173, 2014.
- [19] Eyvazian, A., M. K Habibi, A.M. Hamouda, and R. Hedayati, *Axial crushing behavior and energy absorption efficiency of corrugated tubes*. Materials & Design. 54: p. 1028-1038, 2014.
- [20] Zhang, X. and H. Zhang, *Axial crushing of circular multi-cell columns*. International Journal of Impact Engineering. 65: p. 110-125, 2014.
- [21] Ashby, M.F. and R.F.M. Medalist, *The mechanical properties of cellular solids*. Metallurgical Transactions A. 14(9): p. 1755-1769, 1983.
- [22] Guillo, S.R., G. Lu, and R.H. Grzebieta, *Quasi-static axial compression of thin-walled circular aluminium tubes*. International Journal of Mechanical Sciences. 43(9): p. 2103-2123, 2001.
- [23] Niknejad, A., M.M. Abedi, G.H. Liaghat, and M. Zamani Nejad, Prediction of the mean folding force during the axial compression in foam-filled grooved tubes by theoretical analysis. Materials & Design. 37: p. 144-151, 2012.
- [24] Yan, L., N. Chow, and K. Jayaraman, Effect of triggering and polyurethane foam-filler on axial crushing of natural flax/epoxy composite tubes. Materials & Design. 56: p. 528-541, 2014.
- [25] Zarei, H.R. and M. Kroger, *Multiobjective crashworthiness optimization of circular aluminum tubes*. Thin-walled structures. 44(3): p. 301-308, 2006.
- [26] Shakeri, M., R. Mirzaeifar, and S. Salehghaffari, *New insights into the collapsing of cylindrical thin-walled tubes under axial impact load*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 221(8): p. 869-885, 2007.
- [27] Mirzaei, M., M. Shakeri, M. Sadighi, and S.E. Seyedi, *MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF CRASHWORTHINESS OF CYLINDRICAL TUBES AS ENERGY ABSORBERS*. IRANIAN JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING (ENGLISH), 2007.
- [28] Marzbanrad, J. and M.R. Ebrahimi, Multi-Objective Optimization of aluminum hollow tubes for vehicle crash energy absorption using a genetic algorithm and neural networks. Thin-Walled Structures. 49(12): p. 1605-1615, 2011.
- [29] Jahan, A., M.Y. Ismail, and R. Noorossana, *Multi response optimization in design of experiments considering capability index in bounded objectives method*. Journal of Scientific & Industrial Research. 69: p. 11-16, 2010.
- [30] Damghani Nouri, M. and M.J. Rezvani, Experimental Investigation of Polymeric Foam and Grooves Effects on Crashworthiness Characteristics of Thin-Walled Conical Tubes. Experimental Techniques. 38(5): p. 54-63, 2012.