



# Optimum Design and Construction of Cylindrical Energy Absorber under Internal Pressure Using Time Evolutionary Optimization Algorithm

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Behravan A. H.<sup>1</sup>,  
Seyedkashi S. M. H.<sup>1</sup>,  
Sheikhi Azqandi, M.<sup>1\*</sup>

### How to cite this article

Behravan A. H., Seyedkashi S. M. H.,  
Sheikhi Azqandi, M., Optimum Design  
and Construction of Cylindrical  
Energy Absorber under Internal  
Pressure using Time Evolutionary  
Optimization Algorithm. Modares  
Mechanical Engineering, 2023;  
23(01):45-55.

<sup>1</sup> Mechanical Engineering  
Department, University of Birjand,  
Birjand, Iran

### \*Correspondence

Address: Mechanical Engineering  
Department, University of Birjand,  
Birjand, Iran  
mojtabasheikhi@birjand.ac.ir

### Article History

Received: July 25, 2022  
Accepted: August 31, 2022  
ePublished: January 25, 2023

## ABSTRACT

Energy absorbers are used to absorb the kinetic energy of objects and convert it into another form, the most important of which are cylinder thin-walled tubes. In a thin-walled cylindrical absorber, the three parameters of diameter, thickness, and length affect the amount of energy absorption. In this research, to obtain the necessary information for designing an inexpensive energy absorber with high absorption capability, thin-walled cylinders with air pressure inside which the air inside condenses when collapsing have been investigated. In the current study, dynamic and axial loadings were chosen to have a higher match with reality. The simulation and analysis of the problem have been done by the finite element method and by applying Johnson-Cook coefficients to model the material's behavior. In the following, the graph of the total work done with time is extracted as the output of the problem, and its correctness has been proved by experimental tests. Then, different samples were modeled, and based on them, the method of design of the experiment was applied. Using the results of the variance analysis, the absorber's optimal parameters have been designed by using the time evolutionary optimization algorithm. The results show that it is possible to reduce the weight of the absorber by creating internal density without lowering the absorbency. The performance of the optimal design obtained using the time evolutionary optimization algorithm was improved by more than 33% compared to the example without compression.

**Keywords** Energy Absorber, Optimization, Cylindrical Shells, Collapsing Behavior, Time Evolutionary Algorithm

## CITATION LINKS

1-An approximate analysis of collapse of thin-walled cylindrical shells under axial loading. 2-Dynamic axial crushing of square tubes. 3-Theoretical analysis of tapered thin-walled metal invertebucktube. 4-Behaviour of axially crushed corrugated tubes. 5-Heat and thermodynamic. 6-Maximization of crushing energy absorption of cylindrical shells. 7-Collapsible impact energy absorber: an overview. 8-Axial crushing of thin-walled high-strength steel sections. 9- Energy absorption study in strengthened aluminum pipes with glass.... 10-Characterization and simulation of mechanical behavior of 6063 aluminum alloy thin-walled tubes. 11-Failure mechanism of expanded metal tubes under axial crushing. 12-Light-weight thin-walled structures with patterned windows under axial crushing. 13-Axial crushing analysis of sandwich thin-walled tubes ... 14-Emperical study and numerical simulation of energy absorption in non-completed conical pipes. 15-Comparative analysis of energy absorption capacity of simple and multi-cell thin-walled tubes with triangular, square, hexagonal and octagonal sections. 16- Comparative analysis of energy absorption capacity of simple and multi-cell thin-walled tubes with triangular, square, hexagonal and octagonal sections. 17-Experimental and numerical study of circular, stainless thin tube energy absorber under axial impact... 18- Quasi static axial compression of thin-walled aluminum tubes... 19- Empirical and numerical study on the collapse behavior of thin-walled conical structures... 20-Emperical and numerical study on the diamond collapse behavior of thin-walled pipe... 21-Analytical calculation of adiabatic processes in real gases. 22- Study on the collapse behavior of multi-cell conical structures ... 23-Numerical behavior study of expanded metal tube absorbers and effect of cross section size and multi-layer under low axial velocity impact loading. 24-Solve the engineering problems by Time Evolution Algorithm. 25-Investigation and optimization of multi-walled multi-cell energy absorbers considering different cross-sections. 26-Hybrid reinforced thermoset polymer composite in energy absorption tube application: A review. 27-An enhanced time evolutionary optimization for solving engineering design problems. 28- Optimal design of reinforced concrete one-way ribbed slab using improved time evolutionary optimization.

## طراحی و ساخت بهینه جاذب انرژی استوانه‌ای تحت فشار داخلی با استفاده از روش بهینه‌سازی تکامل زمانی

ابوالحسن بهروان<sup>۱</sup>، سیدمحمدحسین سیدکاشی<sup>۱</sup>، مجتبی شیخی ازغندی<sup>۱\*</sup>  
<sup>۱</sup> گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

### چکیده

جاذب‌های انرژی، برای جذب انرژی جنبشی اجسام و تبدیل آن به صورتی دیگر به کار می‌روند که از مهم‌ترین آنها لوله‌های جدار نازک دایره‌ای هستند. در جاذب استوانه‌ای جدار نازک سه پارامتر قطر، ضخامت و طول بر میزان جذب انرژی تأثیرگذارند. در این پژوهش به منظور دستیابی به اطلاعات لازم برای طراحی یک جاذب انرژی ارزان قیمت با قابلیت جذب بالا، استوانه‌های جدار نازک دارای فشار هوا در داخل که هوای داخل آن هنگام فروریزش متراکم می‌شود، مورد بررسی قرار گرفته است. در تحقیق حاضر بارگذاری‌ها دینامیکی و محوری انتخاب شده تا تطابق بالاتری با واقعیت داشته باشند. شبیه‌سازی و تحلیل مسئله توسط نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس و با اعمال ضرایب جانسون-کوک برای مدل کردن رفتار ماده صورت پذیرفته است. در ادامه، نمودار کل کار انجام شده نسبت به زمان به عنوان خروجی مسئله استخراج گردیده و صحت آن با آزمون‌های تجربی اثبات شده است. سپس نمونه‌های مختلف مدل‌سازی شده بر اساس آنها طراحی آزمایش انجام شده است. با استفاده از نتایج به دست آمده از تحلیل واریانس، بهینه‌سازی پارامترهای ضربه‌گیر با استفاده از الگوریتم تکامل زمانی انجام شده است. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده آن است که می‌توان با ایجاد تراکم داخلی بدون کم شدن قابلیت جذب از وزن جاذب کم کرد. عملکرد طرح بهینه‌ی به دست آمده با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی تکامل زمانی، بیش از ۲۳٪ نسبت به نمونه‌ی بدون تراکم بهبود پیدا کرد.

**کلیدواژه‌ها:** جاذب انرژی، بهینه‌سازی، پوسته‌های استوانه‌ای، رفتار فروریزی، الگوریتم تکامل زمانی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۹

\* نویسنده مسئول: mojtabasheikhi@birjand.ac.ir

### ۱- مقدمه

محققین جهت به حداقل رساندن خسارت‌های ناشی از برخورد و تصادف در اجزای متحرک از جاذب‌های انرژی استفاده می‌کنند. بر این اساس یکی از موارد ضروری در طراحی یک وسیله نقلیه، به کارگیری صحیح جاذب انرژی (ضربه‌گیر) در ساختار بدنه است. به طور کلی ضربه‌پذیری به عنوان توانایی یک سازه جهت حفاظت از جان و مال سرنشینان تعریف شده است. سازه‌های جدار نازک از پرکاربردترین و محبوبترین سازه‌هایی هستند که به عنوان جاذب انرژی در اشکال مختلف استفاده می‌شوند. اولین بار الکساندر و همکاران<sup>[۱]</sup> فروریزش لوله‌های جدار نازک استوانه‌ای را برای طراحی مخازن سوخت هسته‌ای مورد بررسی قرار دادند. آبراموویچ و همکاران<sup>[۲]</sup> تئوری‌های جدید فروریزش برای جاذب‌های انرژی جدار نازک استوانه‌ای و چند ضلعی را مطالعه کردند و نیروی میانگین

برخورد در مقاطع مربعی تحت نیروی عمودی را محاسبه کردند. چیروو<sup>[۳]</sup> فروریزش لوله‌های جدار نازک با ضخامت‌های مختلف را به صورت آزمایشگاهی و تئوری بررسی کرده است. سینگاس و همکاران<sup>[۴]</sup> با ایجاد چین‌های کوچکی بر روی سطح یک استوانه توانستند فروریزش متقارن را برای جداره‌های ضخیم‌تر به وجود آورند. در ادامه، ایشان مؤثر بودن این روش در جذب انرژی را با انجام آزمایش‌های تجربی به اثبات رساندند. یامازاکی و همکاران<sup>[۶]</sup> فروریزش متقارن و نامتقارن و اوپلری (فروریزش اوپلری) فروریزشی است که بر اثر کمناش اوپلری به وجود می‌آید) را توانستند به روش اجزای محدود شبیه‌سازی کنند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها تطابق بالایی با آزمون تجربی داشت. سپس با استفاده از روش تقریب سطح پاسخ توانستند ابعاد لوله را طوری تعیین کنند که فروریزش به صورت متقارن ایجاد شود. القمدی<sup>[۷]</sup> فروریزش مخروط ناقص جدار نازک با نرم افزار آباکوس در سه سطح خارجی پهن، حالت مسطح و حالت تاشو داخلی را دست‌بندی و مورد مطالعه قرار داده است. تاریگوپولا و همکاران<sup>[۸]</sup> بررسی جذب انرژی لوله‌های جدار نازک استوانه‌ای تحت بارگذاری شبه استاتیکی و دینامیکی را به صورت تجربی به سرانجام رساندند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که ثابت بودن لبه‌های بالا و پایین می‌تواند میزان جذب انرژی را افزایش دهد. دامغانی نوری و همکاران<sup>[۹]</sup> میزان جذب انرژی در لوله‌های آلومینیومی تقویت شده با الیاف شیشه (هیبریدی) را تحت نیروی محوری فشاری بررسی کردند. برای این منظور، یک لوله آلومینیومی با مقطع دایره‌ای که قسمت خارجی آن با کامپوزیت شیشه/اپوکسی تقویت شده در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که نیروی متوسط لهیدگی و میزان انرژی جذب شده برای این لوله بیشتر از آلومینیوم خالص است. همچنین دریافتند که مکانیزم پیچیده شکست میزان انرژی بالایی را می‌تواند جذب کند. گراسیانو و همکاران<sup>[۱۱]</sup> جاذب‌های مشبک را به صورت شبه استاتیکی جهت محاسبه نیروی فروریزش و میزان ظرفیت جذب انرژی بررسی کرده و دریافتند که مقدار جذب انرژی و نیروی اوج اولیه به تعداد و شکل سطح مقطع سوراخ‌های دیواره بستگی دارد. سونگ و همکاران<sup>[۱۲]</sup> جاذب‌های دارای مقطع مربعی را به منظور کاهش وزن بررسی کردند و مدلی برای کاهش نیروی اوج اولیه و افزایش جذب انرژی ارائه کردند. آذرخش و همکاران<sup>[۱۳]</sup> لهیدگی محوری لوله‌های جدار نازک ساندویچی را به کمک آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که وجود فوم پلی‌اورتان باعث افزایش جذب انرژی در سازه‌ها می‌شود. این افزایش، در میزان جذب انرژی و نیروی متوسط لهیدگی نمایان‌تر است. رضوانی و همکاران<sup>[۱۴]</sup> پوسته‌های جدار نازک مخروطی از آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۳ را به منظور تسهیل در شکل فروریزش به صورت شیاردار مورد مطالعه قرار داد. در این تحقیق، با ایجاد شیارهای داخلی و خارجی محل‌های مشخصی برای شروع فروریزش مشخص شد. با این کار

استفاده از الگوریتم ژنتیک بر روی معادلات به دست آمده بهینه سازی انجام و مقادیر بهینه محاسبه گردید. سوپیان و همکاران<sup>[26]</sup> استوانه‌های پر شده از فوم آلومینیوم را با کمک الیاف کامپوزیتی تقویت کردند و با این کار به فروریزش متقارن دست یافتند.

با بررسی پیشینه تحقیق موضوع مورد بررسی مشخص شد که تاکنون مطالعات زیادی بر روی پارامترهای مؤثر در عملکرد جاذب‌های انرژی انجام پذیرفته است. در عین حال بر اساس بررسی نویسندگان، تاکنون محققین تأثیر ایجاد فشار داخلی بر روی عملکرد جاذب‌های انرژی را مورد بررسی قرار نداده‌اند. به همین منظور در پژوهش حاضر علاوه بر بررسی متغیرهایی نظیر قطر و ضخامت پوسته، تأثیر ایجاد فشار داخلی با تزریق هوا در جاذب‌های استوانه‌ای جدار نازک صورت پذیرفته است. در این صورت علاوه بر جذب انرژی در اثر تغییرشکل ضربه‌گیر در اثر کاهش حجم آن، مقداری از انرژی نیز در یک فرایند آدیاباتیک در اثر تراکم شدن هوای داخل ضربه‌گیر جذب خواهد شد و در نهایت بازده جاذب افزایش پیدا خواهد کرد. برای تحلیل مسئله، بعد از انجام تعداد زیادی شبیه‌سازی ضربه‌گیر تحت فشار داخلی به کمک روش المان محدود و صحت‌سنجی آن‌ها با کمک آزمایش‌های تجربی، مدل ریاضی مسئله و سپس طراحی آزمایش انجام شد. با توجه به پیچیدگی محاسبات و رفتار غیرخطی مسئله مورد بررسی، از یک روش بهینه‌سازی فرا ابتکاری جدید و قدرتمند به نام تکامل زمانی برای طراحی بهینه جاذب انرژی استفاده شد.

## ۲- روش تحقیق

برای بررسی تأثیر تراکم هوا بر قابلیت جذب انرژی جاذب استوانه‌ای، ابتدا باید چند نمونه جاذب استوانه‌ای با فشارهای داخلی مختلف مورد آزمایش قرار بگیرند تا تأثیر فشار داخلی بر افزایش جذب انرژی و نوع فروریزش مشخص گردد. برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی انجام شده در نرم‌افزار آباکوس یک تست تجربی با مشخصات مدل شبیه‌سازی انجام و نتایج مقایسه می‌شوند.

### ۲-۱- آزمایش‌های تجربی

برای ساخت بدنه جاذب از یک لوله آلومینیومی از جنس آلیاژ ۶۰۶۳ با قطر خارجی ۶۰ میلی‌متر، ضخامت جداره ۱ میلی‌متر و طول ۱۵۰ میلی‌متر استفاده شده است. برای ساخت صفحات درپوش بالا و پایین ضربه‌گیر از صفحات فولادی ضخیم استفاده گردید تا در هنگام ضربه به نسبت بدنه دچار تغییر شکل نشوند. این صفحات علاوه بر همگرا کردن ضربه، از لغزش لبه‌ها جلوگیری کرده و دو طرف لوله را جهت ایجاد فشار داخلی هوا بندی می‌کند. در صفحه پایینی سوراخی برای ورود هوا تعبیه شده و یک دریچه در ورودی آن نصب شده است.

برای انجام آزمایش‌ها، دو نمونه جاذب یکی با خروجی باز و دیگری دارای ۶ بار فشار داخلی اولیه قبل از اعمال ضربه در نظر گرفته شده است. در نمونه اول (جاذب بدون فشار داخلی)، مجرای برای

علاوه بر اینکه مقدار اوج اولیه نیروی لهیدگی کاهش پیدا کرد، مدلی پایدار و قابل کنترل برای جذب انرژی سازه مخروطی به دست آمد. علوی‌نیا و همکاران<sup>[15]</sup> جاذب‌های جدار نازک با مقاطع مربعی، دایره‌ای، مستطیلی و شش‌ضلعی را به صورت تجربی و عددی تحلیل نمودند و دریافتند که مقطع دایره‌ای بالاترین مقدار جذب انرژی در بین مقاطع مذکور را دارد. علوی‌نیا و همکاران<sup>[16]</sup> تأثیر شیارهای داخلی و خارجی را روی استوانه‌های جدار نازک جهت بالا بردن راندمان چین‌خوردگی بررسی کردند. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که این‌کار باعث کاهش نیروی اوج اولیه لازم برای شروع چین‌خوردگی خواهد شد و شوک کمتری به سرنشینان منتقل می‌گردد. ژئی‌یانگ<sup>[17]</sup> لوله‌های جدار نازک را جهت بررسی تغییرات نرخ کرنش بر نیروی متوسط لهیدگی تحت نیروی دینامیکی محوری مورد مطالعه قرار داد و به این نتیجه رسید که نرخ کرنش با افزایش سرعت ضربه‌زننده افزایش داشته و این امر سبب افزایش نیروی متوسط لهیدگی می‌گردد. یاب و همکاران<sup>[18]</sup> لوله‌های جدار نازک آلومینیومی با مقطع دایره‌ای و مربعی را تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی بررسی کردند و دریافتند که مقاطع دایره‌ای ۵۷ درصد بهتر از مقاطع مربعی بوده و می‌توانند حدود دو برابر انرژی بیشتری جذب کنند. نداد اسکوبی و همکاران<sup>[19,20]</sup> لوله‌های جدار نازک دارای درپوش و بدون درپوش را همراه با یک انحنا کوچک در دو طرف مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها متوجه شدند که درپوش عملکرد جاذب را بالا می‌برد. همچنین آزمایشی با انرژی جنبشی مساوی و چهار نرخ کرنش متفاوت انجام دادند و دریافتند که به ازای ۱۷ درصد کاهش نرخ کرنش، ۲/۶ درصد به طول لهیدگی اضافه می‌شود. پیرمحمد و همکاران<sup>[21]</sup> سازه‌های مخروطی با مقاطع مختلف را مورد بررسی قرار دادند و برای به دست آوردن اندازه‌های بهینه از شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد سازه مخروطی با سطح مقطع دایره‌ای دارای بهترین عملکرد می‌باشد. قدس‌بین جهرمی و همکاران<sup>[23]</sup> رفتار لوله‌های فلزی مشبک و تأثیر اندازه مقطع و چند لایه کردن لوله‌های تحت بارگذاری محوری با سرعت کم را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که استوانه‌های مشبک علاوه بر مزیت وزن کم، ظرفیت جذب انرژی بالایی دارند. همچنین افزایش سطح مقطع و چند لایه کردن می‌تواند قابلیت جذب انرژی را بالا ببرد، ولی در عوض، افزایش نیروی اوج اولیه به عنوان یک پارامتر منفی نیز افزایش پیدا می‌کند. دهقانپان و همکاران<sup>[25]</sup> بهینه‌سازی رفتار جاذب‌های انرژی چند جداره و چند سلولی با مقاطع مختلف را بررسی کردند. آنها شبیه‌سازی را در نرم افزار آباکوس انجام داده و با نتایج آزمایشگاهی صحت‌سنجی کردند. سپس مدل‌های مختلفی را با پارامترهای ضخامت، زاویه رأس، فاصله دو لوله و تعداد سلول مدل‌سازی کرده، بر روی نتایج حاصل از این شبیه‌سازی طراحی آزمایش به روش پاسخ سطح انجام داده و معادلات تابع هدف را به دست آوردند. در ادامه با



شکل ۱) فروریزش جاذب استوانه‌ای؛ (الف) بدون فشردگی هوا، (ب) همراه با فشردگی هوا

جدول ۱) ثوابت مدل جانسون-کوک برای آلیاژ Al 6063-T6<sup>[10]</sup>

m	c	N	B(MPa)	A(MPa)	Al 6063
۰	۰/۰۰۳۶	۰/۰۷	۶۳/۹۹	۱۷۶/۴۵	T6

ضربه به صورت عمودی به درپوش بالای استوانه اعمال خواهد داشت و در راستای محور استوانه مچالگی رخ خواهد داد. در این پژوهش فشار داخلی به صورت فشار مکانیکی در نظر گرفته شده است و به دلیل پیچیدگی محاسبات و تاثیر کم آن در نتایج نهایی از مدل کردن تراکم لحظه‌ای هوا صرف نظر شده است. برای مش-بندی از المان استاندارد خطی C3D8R استفاده شده است. ابعاد مش بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۲) با در نظر گرفتن استقلال از مش و همچنین زمان تحلیل مسئله تعیین گردید. در شکل t زمان لازم برای تحلیل مسئله و E انرژی جذب شده توسط جاذب است.

در شکل (۳) چگونگی تغییر شکل برای یک جاذب با قطر ۶۰ میلی‌متر، ضخامت ۰/۵ میلی‌متر و فشار داخلی ۶ بار ارائه شده است. همان‌طور که از نوع تغییر شکل جاذب مشهود است، نحوه فروریزش در این نوع جاذب از نوع متقارن می‌باشد. مقادیر تنش ارائه شده در این شکل در زمانی که مچالگی جاذب به اندازه دوسوم طول آن (۱۰۰ میلی‌متر) است، ترسیم شده است. در شکل (۴) نمودار نیرو-جابجایی به ازای مچالگی ۱۰۰ میلی‌متر از طول ضربه‌گیر ترسیم شده است.

در شکل (۵) میزان جذب انرژی جاذب نسبت به زمان در حین مچالگی آن در راستای محور استوانه به طول ۱۰ سانتیمتر محاسبه شده است.

خروج هوا هنگام آزمایش تعبیه شده تا هیچ فشار داخلی در حین آزمایش در آن ایجاد نشود. حجم داخلی جاذب نمونه دوم (جاذب با فشار داخلی) هنگام ضربه و شروع فروریزش کاهش یافته و بنابراین فشار هوای داخلی افزایش خواهد داشت.

برای هر دو نمونه، وزنه‌ای معادل ۱۰ کیلوگرم از ارتفاع ۳۴۰ سانتی‌متری رها شده است. در شکل (۱) نحوه فروریزش این دو مدل ارائه شده است. مقایسه نتیجه آزمایش دو نمونه مذکور نشان‌دهنده این است که در نمونه الف که مجرای خروجی باز است، فروریزش از نوع نامتقارن رخ خواهد داد. این در حالی است که در نمونه دوم که دارای تراکم هوا می‌باشد، فروریزش ترکیبی است به‌گونه‌ای که ابتدا متقارن و سپس نامتقارن شده است. بهترین حالت فروریزش متقارن است چون بیشترین تغییر شکل پلاستیک در این حالت اتفاق می‌افتد و مد ترکیبی از حالت نامتقارن کمی بهتر است<sup>[14]</sup>. نمونه ب در شکل (۱) که در آن فشردگی هوا اتفاق افتاده، کمتر دچار فروریزش شده است. این آزمون اثبات نمود که فشردگی هوا در داخل جاذب می‌تواند باعث ایجاد فروریزش متقارن یا ترکیبی در حین ضربه در جاذب انرژی شود و بنابراین توانایی جذب انرژی بیشتری را در آن به وجود آورده است. ذکر این نکته ضروری است که وجود تراکم داخلی در جاذب، علاوه بر ایجاد امکان فروریزش متقارن، باعث جذب مقداری انرژی در اثر فشردگی هوا نیز خواهد شد که در بخش‌های بعدی به آن اشاره خواهد شد.

## ۲-۲- تحلیل المان محدود جاذب استوانه‌ای

فلزات هنگام تغییر شکل پلاستیک انرژی ضربه را جذب می‌کنند و میزان جذب انرژی به الگوی چین‌خوردگی آن‌ها بستگی دارد. در این تحقیق برای پیدا کردن بهترین الگوی چین‌خوردگی و همچنین محاسبه میزان جذب انرژی جاذب در زمان فروریزش از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شده است.

برای این منظور در ابتدا مشخصات هندسی و مکانیکی اولیه بدنه جاذب به صورت یک لوله استوانه‌ای از آلیاژ آلومینیوم Al6063-T6 مدل‌سازی گردید. سپس صفحات درپوش بالا و پایین استوانه به صورت صلب در نظر گرفته شد. چون فروریزش جاذب تحت ضربه دینامیکی رخ‌گرفته بالایی دارد، برای تعریف مشخصات این ماده در ناحیه پلاستیک از ثوابت جانسون-کوک استفاده شد و اثر نرخ کرنش در شبیه‌سازی لحاظ گردید. ثوابت جانسون کوک برای جاذب در جدول (۱) ارائه شده است<sup>[10]</sup>.

باتوجه به ماهیت ضربه‌ای بودن نیرو در آزمایش‌های تجربی، در تحلیل المان محدود نیز نیرو به صورت ضربه دینامیکی شبیه‌سازی شد و نحوه آنالیز به صورت دینامیک صریح (Dynamic Explicit) انتخاب گردید. تماس سطح بالا و پایین استوانه با صفحات صلب درپوش با قید Tie مقید شده تا امکان هیچ گونه لغزشی وجود نداشته باشد

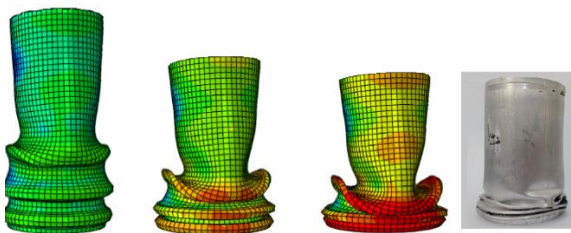
باید توجه داشت که مقدار انرژی محاسبه شده در این شکل فقط در اثر فروریزش بدنه جاذب استوانه‌ای است و برای تعیین انرژی کلی مستهلک شده در حین ضربه باید انرژی لازم برای فشردگی هوا نیز به صورت جداگانه محاسبه گردد و به مقدار فوق اضافه شود. لازم به ذکر است به علت پیچیدگی بسیار بالای مدل کردن افزایش فشار داخلی در هنگام فروریزش و تأثیر کم آن در میزان انرژی کل و با توجه به اینکه هدف نهایی به دست آوردن کل انرژی مستهلک شده است، در تحقیق حاضر از مدل کردن متراکم شدن هوا در حین مچالگی صرف نظر شده و انرژی جذب شده توسط تراکم هوا از رابطه (۲) محاسبه گردیده و سپس با انرژی لازم برای لهیدگی جداره ضربه گیر جمع شده است. شایان ذکر است که با مقایسه میزان انرژی جذب شده توسط جاذب مورد آزمایش در مقاله حاضر و انرژی محاسبه شده به صورت تئوری بر اساس جزئیات مطرح شده در مقاله، تأثیر کم نظر گرفتن تغییرات فشار در حین مچالگی که در ادامه به آن اشاره خواهد شد، تا حدی تأیید گردید.

۲-۳ صحت‌سنجی مدل عددی

برای تأیید تحلیل‌های عددی انجام شده، یک نمونه آزمایشگاهی با قطر ۶۰ میلی‌متر، طول ۱۵ سانتی‌متر و ضخامت جداره یک میلی‌متر ساخته شد و سپس وزنه ۱۰ کیلوگرمی از ارتفاع ۳۴۰ سانتی‌متری روی جاذب سقوط آزاد کرد و انرژی آن توسط جاذب، مستهلک شد. در شکل (۶) نحوه تغییر شکل هر دو مدل تجربی و عددی که به اندازه ۱۷ میلی‌متر فروریزش کرده‌اند، ارائه شده است. مقدار انرژی وارد شده به جاذب به صورت رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

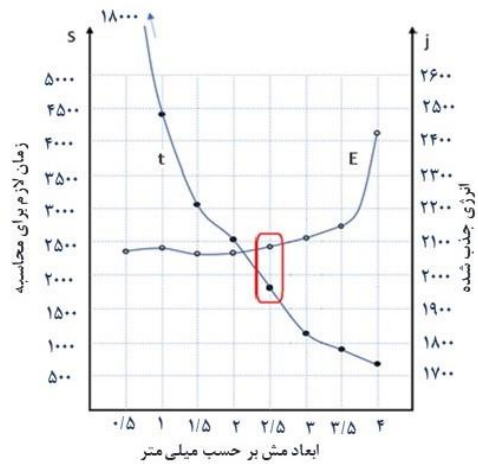
$$E = mgh = 10 \times 9.81 \times 3.4 = 333.54 J \quad (1)$$

در رابطه فوق کمیت  $m$  مقدار جرم ضربه‌زننده،  $g$  شتاب گرانش زمین و  $h$  ارتفاع ضربه‌زننده از سطح بالای جاذب است.



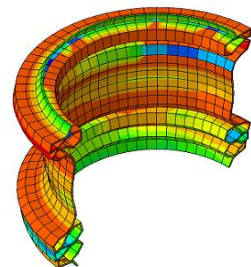
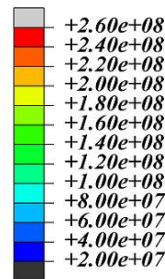
شکل ۶) مقایسه ظاهری مدل عددی و تجربی جاذب با شرایط یکسان

در شکل (۷) نمودار مقدار انرژی جذب شده مدل عددی به ازای زمانی برابر با  $t = 0.00085 s$  ارائه شده است. میزان مچالگی ایجاد شده در تحلیل عددی مدل برابر با ۱۷ میلی‌متر است و حدود ۳۳۰ ژول انرژی جذب شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که شبیه‌سازی عددی و فروریزش تجربی مطابقت بالایی دارند. بنابراین شبیه‌سازی عددی می‌تواند نوع فروریزش را به خوبی نشان دهد و اطلاعات درست و دقیقی برای تحلیل سازه ایجاد نماید. در شکل

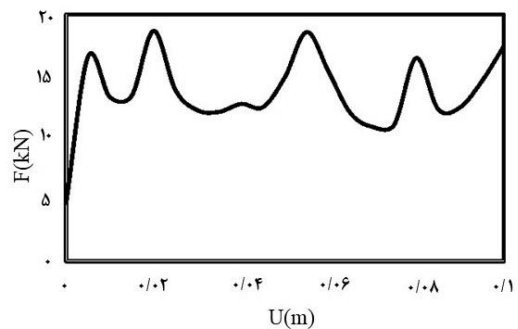


شکل ۲) نمودار آنالیز مش و حساسیت نسبت به اندازه المان بندی

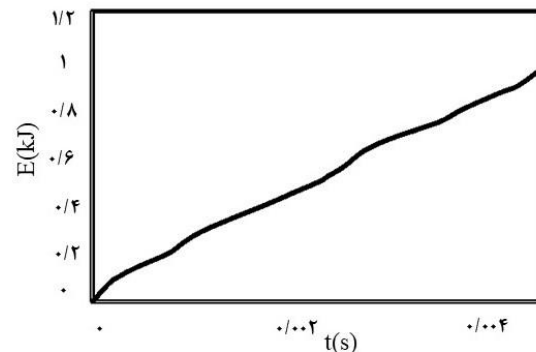
S, Mises (Avg: 75%)



شکل ۳) نحوه فروریزش جاذب استوانه‌ای دارای ۶ بار فشار داخلی اولیه

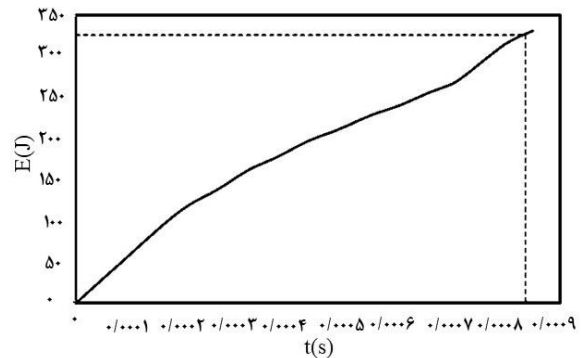


شکل ۴) نمودار نیرو-جابجایی، جاذب استوانه‌ای با ۶ بار فشار داخلی اولیه



شکل ۵) نمودار مقدار انرژی جذب شده در اثر فروریزش جاذب

(۷) محور عمودی E مقدار انرژی لازم برای فروریزش را بر حسب ژول نشان می‌دهد.



شکل ۷ نمودار مقدار انرژی جذب شده توسط جداره جاذب بر حسب ژول

نصب و همچنین جلوگیری از به وجود آمدن مد فروریزش کمانش اولیری تعیین می‌گردد. در این پژوهش طول جاذب برای تمام نمونه‌ها ۱۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده و ایجاد فشار در داخل جاذب به عنوان یک پارامتر موثر معرفی و مورد مطالعه قرار گرفت. پاسخ خروجی در اینجا بیشترین مقدار جذب انرژی بوده و طراحی آزمایش به روش عاملی کامل انجام پذیرفت. جدول (۲) پارامترها و مقادیر به کار رفته را بیان می‌کند.

جدول ۲ پارامترها و مقادیر استفاده شده برای شبیه‌سازی ۳۶ نمونه مختلف از جاذب

پارامتر	واحد	سطوح متغیرها
قطر (D)	میلی‌متر	۱۰۰ ۸۰ ۶۰
ضخامت (t)	میلی‌متر	۱/۵ ۱ ۰/۵
فشار داخلی (p)	بار	۶ ۵ ۱

پس از مشخص شدن پارامترها و سطوح آن‌ها با مدل کردن و شبیه‌سازی فرایند به کمک روش المان محدود مقدار انرژی جذب شده توسط جاذب جدار نازک استوانه‌ای محاسبه شده و مقدار انرژی صرف شده برای تراکم هوای داخل آن از رابطه (۲) در فرایند آدیاباتیک محاسبه گردید. در جدول (۳) میزان جذب انرژی در اثر تغییر شکل جاذب ( $E_f$ )، فشردگی های داخل آن ( $E_2$ ) و انرژی کلی جذب شده در نمونه‌های مختلف ارائه شده است.

#### ۴- بحث

در این قسمت نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی بر روی عملکرد جاذب و میزان جذب انرژی در آن مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در ابتدا نمودار باقی‌مانده‌ها به منظور بررسی اعتبار مدل و تأثیر ضرایب ورودی بر خروجی بررسی و مورد تایید قرار گرفت.

در شکل (۸) تأثیر پارامترهای مختلف نسبت به یکدیگر بر میزان جذب انرژی در جاذب ارائه شده است. بر این اساس میزان تأثیرپذیری پارامترها در مسئله مورد بررسی بر روی میزان جذب انرژی، به ترتیب ضخامت، قطر، فشار، اثر متقابل قطر-ضخامت و اثر متقابل قطر-فشار است. اثرات متقابل سه تایی قطر-ضخامت-فشار و دوتایی ضخامت-فشار به علت غیرمعدنادر بودن حذف شده‌اند. تأثیر یک پارامتر در پاسخ خروجی زمانی معنادار است که مقدار P-Value در تحلیل واریانس کمتر از ۰/۰۵ باشد. در جدول (۴) نتایج تحلیل واریانس و همچنین درصد میزان تأثیرگذاری هر کدام از پارامترهای مورد بررسی در میزان جذب انرژی ارائه شده است. مقدار ضریب تعیین R2 در این تحلیل آماری ۹۹/۱۷٪ می‌باشد که نشان دهنده اعتبار بالای مدل رگرسیونی ارائه شده است.

#### ۴-۲- محاسبه انرژی ناشی از تراکم هوای داخلی در جاذب

در ترمودینامیک، آدیاباتیک به فرایندی گفته می‌شود که در آن انتقال حرارت و جرم بین سیستم ترمودینامیکی و محیط اطراف وجود نداشته باشد. در این فرایند فقط کار عامل انتقال انرژی بین سیستم و محیط است [21]. در فرایند فشرده کردن گاز درون جاذب در اثر ضربه، چون تغییر شکل در مدت زمان بسیار کمی اتفاق می‌افتد، سیستم فرصت تبادل حرارت با محیط اطراف را پیدا نمی‌کند. به همین علت در تحقیق حاضر، فرایند متراکم شدن هوای داخل جاذب، یک فرایند آدیاباتیک در نظر گرفته شده است. در این صورت می‌توان انرژی مورد نیاز برای تغییر حجم گاز از وضعیت  $v_1$  به  $v_2$  را از رابطه ی (۲) محاسبه کرد [5]

$$E_2 = \int_{v_1}^{v_2} p dv = \int_{v_1}^{v_2} \frac{k}{v^\gamma} dv = \frac{k (v_2^{1-\gamma} - v_1^{1-\gamma})}{1-\gamma} \quad (2)$$

در رابطه فوق،  $\gamma$  یک مقدار ثابت است که وابسته به نوع گاز داخل جاذب دارد. در این پژوهش مقدار آن برای هوا برابر با ۱/۴ در نظر گرفته شده است. پارامتر  $k$  نیز یک مقدار ثابت وابسته به نوع گاز بوده و از رابطه (۳) قابل محاسبه است.

$$p v^\gamma = k \quad (3)$$

#### ۳- نتایج

به طراحی مجموعه‌ای از آزمایش‌ها به منظور دستیابی به نتیجه مطلوب با کمترین تعداد آزمایش در حالی که چندین متغیر در فرایند تبدیل ورودی به خروجی موثر باشند، طراحی آزمایش گفته می‌شود.

برای انجام آزمایش باید پارامترهای مؤثر بر جواب و بازه تغییرات هر پارامتر مشخص شود. در ضربه‌گیرهای استوانه‌ای جدار نازک طبق تحقیقات انجام شده در گذشته، مؤثرترین عوامل قطر و ضخامت جداره است. طول ضربه‌گیر بر اساس محدودیت فضا برای

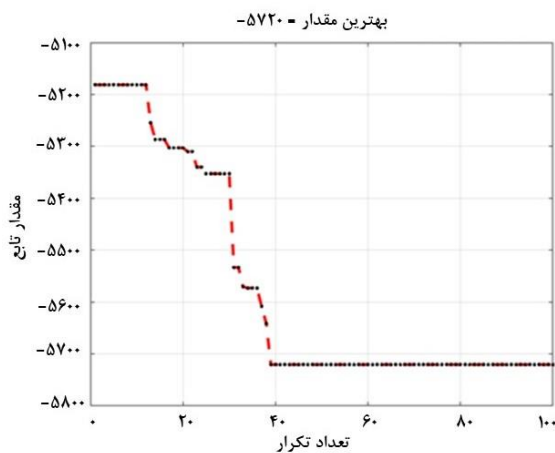
جدول ۳) مقادیر انرژی جذب شده برای نمونه‌های مختلف جاذب

ردیف واحد	قطر D mm	ضخامت t mm	فشار مطلق p bar	انرژی جذب شده توسط جاذب $E_1$ (ژول)	انرژی جذب شده در اثر فشردگی هوا $E_2$ (ژول)	انرژی کلی جذب شده $E_1 + E_2$ (ژول)
۱	۶۰	۰/۵	۱	۱۱۰۱/۶۵	۵۶/۵۶	۱۱۵۸/۲۱
۲	۶۰	۰/۵	۵	۱۰۳۲	۲۸۲/۸۳	۱۳۱۴/۸۳
۳	۶۰	۰/۵	۶	۹۶۵/۹۵	۳۳۹/۴	۱۳۰۵/۳۵
۴	۶۰	۰/۵	۷	۹۶۱/۵۱	۳۹۶/۱۵	۱۳۵۷/۶۶
۵	۶۰	۱	۱	۲۰۹۰/۵۹	۵۴/۶۴	۲۱۴۵/۲۳
۶	۶۰	۱	۵	۲۰۶۰/۷۸	۲۷۳/۰۶	۲۳۳۳/۸۴
۷	۶۰	۱	۶	۲۱۱۵/۹۳	۳۲۷/۹	۲۴۴۳/۸۳
۸	۶۰	۱	۷	۲۱۰۱/۹۳	۳۸۲/۳	۲۴۸۴/۲۳
۹	۶۰	۱/۵	۱	۳۶۷۳/۰۵	۵۲/۷۶	۳۷۲۵/۸۱
۱۰	۶۰	۱/۵	۵	۳۱۲۴/۹۱	۲۶۳/۸	۳۳۸۸/۷۱
۱۱	۶۰	۱/۵	۶	۳۵۱۱/۲۴	۳۱۶/۶۲	۳۸۲۷/۸۶
۱۲	۶۰	۱/۵	۷	۳۵۸۳/۳۹	۳۶۹/۳	۳۹۵۲/۶۹
۱۳	۸۰	۰/۵	۱	۱۱۹۰/۰۲	۱۰/۳	۱۲۹۱/۳۲
۱۴	۸۰	۰/۵	۵	۱۱۳۰/۵۶	۵۰۶/۷۹	۱۶۳۷/۳۵
۱۵	۸۰	۰/۵	۶	۱۱۵۶/۶۷	۶۰۸/۱	۱۷۶۴/۷۷
۱۶	۸۰	۰/۵	۷	۱۰۹۴/۴۷	۷۰۹/۵	۱۸۰۳/۹۷
۱۷	۸۰	۱	۱	۲۵۷۷	۹۸/۸	۲۶۷۵/۸
۱۸	۸۰	۱	۵	۲۳۲۵/۱۳	۴۹۴/۱	۲۸۱۹/۲۳
۱۹	۸۰	۱	۶	۲۲۸۰/۵۱	۵۹۲/۹۷	۲۸۷۳/۴۸
۲۰	۸۰	۱	۷	۲۳۳۹/۶۸	۶۹۱/۸	۳۰۲۱/۴۸
۲۱	۸۰	۱/۵	۱	۳۸۹۵/۸۹	۹۶/۳۱۹	۳۹۹۲/۲۰۹
۲۲	۸۰	۱/۵	۵	۳۹۶۸/۵	۴۸۱/۶۲	۴۴۵۰/۱۲
۲۳	۸۰	۱/۵	۶	۳۷۵۶/۴۹	۵۷۷/۹	۴۳۳۴/۳۹
۲۴	۸۰	۱/۵	۷	۳۸۴۴/۰۸	۶۷۴/۱	۴۵۱۸/۱۸
۲۵	۱۰۰	۰/۵	۱	۱۲۸۵/۷۴	۱۵۹/۲	۱۴۴۴/۹۴
۲۶	۱۰۰	۰/۵	۵	۱۱۴۴/۰۵	۷۹۵/۹۶	۱۹۴۰/۰۱
۲۷	۱۰۰	۰/۵	۶	۱۱۰۵/۹۴	۹۵۵/۲۷	۲۰۶۱/۲۱
۲۸	۱۰۰	۰/۵	۷	۱۱۰۵/۱	۱۱۱۴/۵	۲۲۱۹/۶
۲۹	۱۰۰	۱	۱	۲۷۲۶/۴	۱۵۶/۱۲	۲۸۸۲/۵۲
۳۰	۱۰۰	۱	۵	۲۵۱۲/۴۴	۷۸۰/۶	۳۲۹۳/۰۴
۳۱	۱۰۰	۱	۶	۲۵۰۵/۶۳	۹۳۶/۷	۳۴۴۲/۳۳
۳۲	۱۰۰	۱	۷	۲۵۳۰/۷۷	۱۰۹۲/۷	۳۶۲۳/۴۷
۳۳	۱۰۰	۱/۵	۱	۴۲۵۹/۷۱	۱۵۲/۷	۴۴۱۲/۴۱
۳۴	۱۰۰	۱/۵	۵	۴۱۳۰/۷۹	۷۶۳/۷	۴۸۹۴/۴۹
۳۵	۱۰۰	۱/۵	۶	۴۱۳۹/۳۴	۹۱۶/۴	۵۰۵۵/۷۴
۳۶	۱۰۰	۱/۵	۷	۴۳۷۴/۸۷	۱۰۶۹/۳	۵۴۴۴/۱۷

جدول ۵) محدوده مقادیر متغیرهای طراحی جاذب استوانه‌ای

ردیف	پارامتر	حداقل مقدار پارامتر	حداکثر مقدار پارامتر
۱	قطر D (میلی‌متر)	۶۰	۱۰۰
۲	ضخامت t (میلی‌متر)	۰/۵	۱/۵
۳	فشار p (بار)	۴	۱۰

برای بررسی تکمیلی نمونه بهینه به دست آمده برای جاذب در این قسمت مدل سازی آن انجام شده و در شکل (۱۰) با حالت بدون فشار داخلی مقایسه شده است. طول اولیه هر دو نمونه در ابتدا ۱۵۰ میلی‌متر بوده که هرکدام به اندازه ۱۰۰ میلی‌متر فروریزش کرده‌اند. همان‌طور که در شکل (۱۰) مشخص است، ایجاد تراکم و فشار داخلی باعث شده که فروریزش از حالت نامتقارن (الماسی) به حالت متقارن (Concertina) تبدیل شود و نحوه فروریزش بهبود پیدا کند.

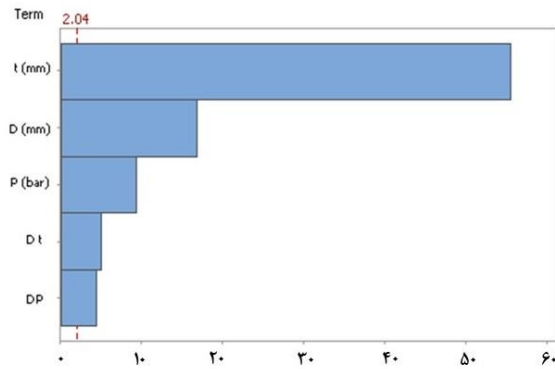


شکل ۹) سرعت همگرایی الگوریتم تکامل زمانی

میزان جذب انرژی صرفاً ناشی از فروریزش برای نمونه بدون تراکم داخلی ۴۲۵۹ ژول و برای نمونه دارای تراکم داخلی ۴۱۴۰ ژول می‌باشد این مقادیر توسط نرم افزار آباکوس محاسبه شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، انرژی لازم برای ایجاد چروکیدگی در بدنه جاذب دارای تراکم، حدود سه درصد از نمونه بدون تراکم کمتر است

. علت این است که نیروی فشار داخلی به چین خوردگی کمک می‌کند. البته گرچه در اینجا کمی قابلیت جذب انرژی کاهش یافته، اما به علت منظم شدن چین خوردگی، بازده جاذب بالاتر رفته و در یک مچالگی کامل عملکرد بهتری خواهد داشت.



شکل ۸) نمودار پارتوی اثرات اصلی

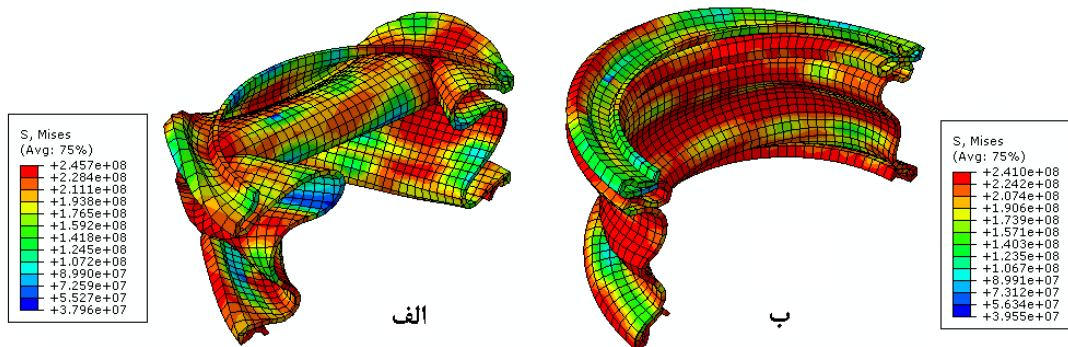
#### ۴-۱- بهینه‌سازی با الگوریتم فرا ابتکاری تکامل زمانی

بعد از تحلیل مسئله و یافتن رابطه بین مقدار جذب انرژی توسط جاذب با پارامترهای طراحی مسئله شامل قطر، ضخامت و فشار داخلی، می‌توان به طراحی بهینه جاذب پرداخت. باتوجه به ساختار غیرخطی روابط و پیچیدگی محاسبات در این پژوهش از یک روش فرا ابتکاری قدرتمند به نام تکامل زمانی استفاده شد. این الگوریتم بر اساس یافتن بهترین جواب و بسط آن با توجه به شرایط و ضوابط خاص زمانی عمل می‌کند [27]. روش مذکور از نظر سرعت همگرایی، قدرت یافتن بهینه مطلق و نیاز کمتر به ارزیابی تابع هدف برای حل مسائل مهندسی بر بسیاری از روش‌های بهینه‌سازی ارجحیت دارد [28]. این روش بهترین جواب را در یک حلقه انتخاب می‌کند و آن را بسط می‌دهد تا به بهترین جواب برای مسئله دست یابد [24].

برای انجام بهینه‌سازی، سه متغیر طراحی قطر، ضخامت و فشار داخلی در نظر گرفته شده است. محدوده تعیین شده برای این پارامترها در جدول (۵) نشان داده شده است. شکل (۹) نمودار همگرایی به جواب بهینه برای طراحی جاذب را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، الگوریتم تکامل زمانی توانسته با حدود ۴۰ تکرار برای اولین بار و در مجموع بعد از ۸۰ بار ارزیابی تابع هدف به جواب بهینه مسئله همگرا شود. با توجه به اینکه حالت استاندارد مسائل بهینه‌سازی به صورت حداقل-سازی است، برنامه کامپیوتری نوشته شده برای روش تکامل زمانی نیز بر همین مبنا است. همان‌طور که پیشتر ذکر گردید، در تحقیق حاضر هدف مسئله حداکثرسازی انرژی جذب شده توسط جاذب است. بر این اساس تابع هدف به صورت حداقل سازی منفی انرژی که معادل حداکثرسازی انرژی است، در نظر گرفته شد تا مسئله به فرم استاندارد یک مسئله بهینه‌سازی تبدیل شود.

در نمودار ستونی شکل (۱۱) مقادیر متغیرهای طراحی شامل قطر، ضخامت جداره و فشار اولیه داخلی جاذب استوانه‌ای را نشان می‌دهد که به ترتیب برابر با ۱۰۰ میلی‌متر، ۱/۵ میلی‌متر و ۱۰ بار به دست آمده است.

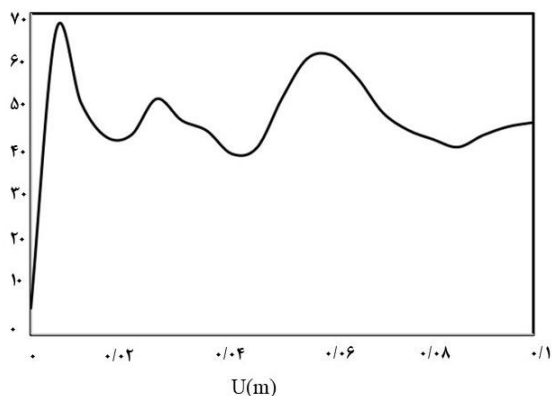




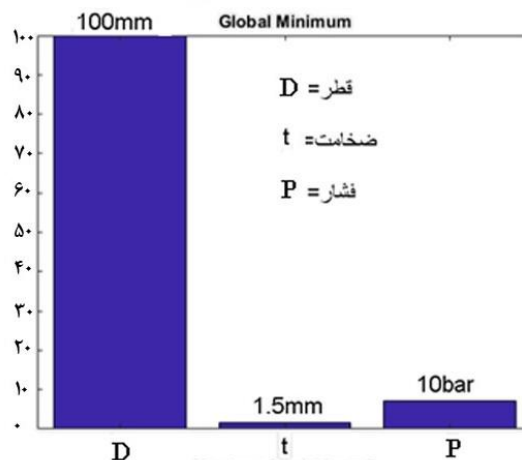
شکل ۱۰) تأثیر تراکم هوا بر فروریزش ضربه‌گیر؛ الف- بدون فشار و ایجاد تراکم، ب- دارای فشار اولیه و تراکم

۴۲۵۹ ژول خواهد بود. بنابراین جاذب بهینه توانسته ۳۳/۷٪ بیشتر نسبت به نمونه مشابه خود انرژی جذب نماید. علاوه بر میزان جذب انرژی بیشتر، یکی از موارد بسیار مهم در طراحی ضربه‌گیرها این است که شوک اولیه کمتری به سرنشینان وارد شود. باتوجه به نمودار نیرو-جابجایی شکل (۱۲) مشاهده می‌شود که نیروی اوج اولیه برای ایجاد شوک وجود دارد، اما در جاذب ارائه شده در تحقیق حاضر، تراکم تدریجی باعث می‌شود که نیروی متوسط لهیدگی به تدریج افزایش یابد. به عبارتی در جاذب با فشار داخلی چون در ابتدا فشار هوا کمتر است لذا ایجاد چروک راحت‌تر خواهد بود و به تدریج با افزایش فشار داخلی نیروی لازم برای ایجاد چروک بیشتر خواهد شد. لذا فروریزش با نیروی کم شروع و برای ادامه نیاز به نیروی بیشتری خواهد داشت. از این منظر در مقاله گفته شده که شوک اولیه نسبت به نیروی متوسط لهیدگی کاهش محسوسی خواهد داشت.

نمودار شکل (۱۳) نشان می‌دهد که انرژی لازم برای ایجاد تراکم چگونه افزایش یافته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با کاهش حجم داخلی بر اثر فروریزش (Y) انرژی لازم برای فروریزش (X) به تدریج افزایش یافته است. در نتیجه این افزایش تدریجی جذب انرژی از وارد شدن شوک اولیه به سرنشینان جلوگیری می‌کند.



شکل ۱۲) نمودار نیرو-جابجایی (نشان دهنده‌ی نیروی اوج اولیه)



شکل ۱۱) نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی با الگوریتم تکامل زمانی

برای محاسبه انرژی کلی جذب شده در نمونه دارای فشار داخلی باید انرژی لازم برای تراکم نیز از رابطه (۲) محاسبه گردد و به مقدار انرژی بدست آمده از نرم‌افزار باید اضافه گردد. حجم اولیه و نهایی جاذب و همچنین مقدار انرژی لازم برای تراکم با روابط زیر قابل محاسبه است.

$$v = \pi r^2 h \tag{۶}$$

$$k = p_1 v_1^\gamma \tag{۷}$$

$$E_2 = \frac{k (v_2^{(1-\gamma)} - v_1^{(1-\gamma)})}{1 - \gamma} \tag{۸}$$

انرژی لازم برای تراکم هوای داخل استوانه‌ای با طول اولیه ۱۵۰ میلی‌متر، قطر ۱۰۰ میلی‌متر، ضخامت ۱/۵ میلی‌متر و فشار اولیه ۱۰ بار، پس از ۱۰۰ میلی‌متر مجالگی برابر ۱۵۲۹ ژول خواهد بود. انرژی جذب شده توسط بدنه جاذب که از شبیه‌سازی اجزای محدود به دست آمده، برابر ۴۱۴۰ ژول است. جمع این دو انرژی، کل انرژی جذب شده توسط ضربه‌گیر خواهد بود.

$$E_t = E_1 + E_2 \rightarrow 1529J + 4140J = 5669J \tag{۹}$$

کل انرژی جذب شده توسط جاذب بهینه ۵۶۶۹ ژول است. درحالی‌که اگر تراکم هوا نباشد، انرژی لازم برای این مقدار لهیدگی

The quarterly journal of mechanics and applied mathematics. 1960 1;13(1):10-5.

2- Abramowicz W, Jones N. Dynamic axial crushing of square tubes. International Journal of Impact Engineering. 1984 1;2(2):179-208.

3- Chirwa EC. Theoretical analysis of tapered thin-walled metal invertebucktube. International journal of mechanical sciences. 1993 1;35(3-4):325-51.

4- Singace AA, El-Sobky H. Behaviour of axially crushed corrugated tubes. International Journal of Mechanical Sciences. 1997 1;39(3):249-68.

5- Zemansky MW, Dittman RH. Heat and thermodynamics.

6- Yamazaki K, Han J. Maximization of the crushing energy absorption of cylindrical shells. Advances in Engineering Software. 2000 1;31(6):425-34.

7- Alghamdi AA. Collapsible impact energy absorbers: an overview. Thin-walled structures. 2001 1;39(2):189-213.

8- Tarigopula V, Langseth M, Hopperstad OS, Clausen AH. Axial crushing of thin-walled high-strength steel sections. International Journal of Impact Engineering. 2006 1;32(5):847-82.

9- Damghani noori M, Aghili M. Energy Absorption study in strenghenend aluminium pipes with glass under axial loading, MSc dissertation, Semnan University, 2010.

10- Zhu H, Qin C, Wang JQ, Qi FJ. Characterization and simulation of mechanical behavior of 6063 aluminum alloy thin-walled tubes. In Advanced Materials Research 2011 (Vol. 197, pp. 1500-1508). Trans Tech Publications Ltd.

11- Graciano C, Martínez GA, Gutiérrez A. Failure mechanism of expanded metal tubes under axial crushing. Thin-Walled Structures. 2012 1;51:20-4.

12- Song J, Chen Y, Lu G. Light-weight thin-walled structures with patterned windows under axial crushing. International Journal of Mechanical Sciences. 2013 1;66:239-48.

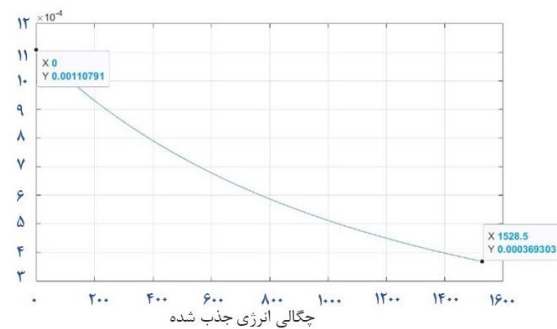
13- Azarakhsh S, Rahi A. Axial Crushing Analysis of Sandwich Thin-walled Tubes using Experimental and Finite Element Simulation. Journal of Simulation and Analysis of Novel Technologies in Mechanical Engineering. 2013 22;6(2):31-44.

14- Rezvani M J, Emperical study and numerical simulation of energy absorption in non completed conical pipes, Doctoral dissertation, Semnan University: 2013. (in Persian)

15- Nia AA, Parsapour M. Comparative analysis of energy absorption capacity of simple and multi-cell thin-walled tubes with triangular, square, hexagonal and octagonal sections. Thin-Walled Structures. 2014 1;74:155-65.

16- Nia AA, Parsapour M. Comparative analysis of energy absorption capacity of simple and multi-cell thin-walled tubes with triangular, square, hexagonal and octagonal sections. Thin-Walled Structures. 2014 1;74:155-65.

17- Yang Z, Yan H, Huang C, Diao X, Wu X, Wang S, Lu L, Liao L, Wei Y. Experimental and numerical study of circular, stainless thin tube energy absorber under



شکل ۱۳) نمودار افزایش انرژی جذب شده در اثر افزایش فشار داخلی جاذب در حین فروریزش

## ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر وجود تراکم هوای داخل جاذب مورد بررسی قرار گرفت و ایده مطرح شده تا حد زیادی باعث افزایش کارایی جاذب گردید. در این راستا با ایجاد فشار داخلی نحوه فروریزش جاذب از نامتقارن به متقارن تغییر کرد. با ایجاد فروریزش متقارن ظرفیت نهایی جذب انرژی در جاذب به دلیل امکان تغییر شکل بیشتر افزایش پیدا خواهد کرد. با توجه به حجم محاسبات و پیچیدگی تحلیل جاذب استوانه‌ای تحت فشار در این پژوهش، برای رسیدن به طراحی بهینه مسئله از روش فرا ابتکاری جدید تکامل زمانی استفاده شد. نتایج به دست آمده از این تحقیق می‌تواند به صورت زیر خلاصه شود:

- وجود فشار داخلی در جاذب هنگام فرود آمدن ضربه توانست قابلیت جذب انرژی را تا ۳۳٫۷ درصد افزایش دهد.
- وجود فشار در داخل ضربه‌گیر باعث به وجود آمدن فروریزش متقارن یا ترکیبی شده و در نهایت قابلیت جذب انرژی جاذب را افزایش می‌دهد.
- از آنجایی که تراکم هوای داخل ضربه‌گیر، در هنگام فروریزش به تدریج زیاد می‌شود، بنابراین نیروی لهیدگی به تدریج افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه از ایجاد و انتقال شوک اولیه به سرنشینان جلوگیری می‌شود.

**تاییدیه اخلاقی:** محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

**تعارض منافع:** در این مقاله برخی از نتایج حاصل از پایان‌نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول استفاده شده است. هیچ تعارض منافع دیگری برای اظهار وجود ندارد.

**منابع مالی:** هزینه‌های این پژوهش از بودجه شخصی و همچنین حمایت مالی دانشگاه بیرجند تأمین شده است.

## منابع

- 1- Alexander JM. An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading.

axial impact by a control rod. *Thin-Walled Structures*. 2014 1;82:24-32.

18- Yob N, Ismail KA, Rojan MA, Othman MZ, Zaidi AM. Quasi Static Axial Compression of Thin Walled Aluminum Tubes: Analysis of Flow Stress in the Analytical Models. *Modern Applied Science*. 2016 1;10(1):34.

19- Oskooei A, khodarahmi H, pakian M. Emperical and numerical study on the collapse behavior of thin-walled conical structures under mechanical loading 2015: 392-402. (in Persian)

20- Oskooei A, khodarahmi H, pakian M. Emperical and numerical study on the diamond collapse behavior of thin-walled pipes under mechanical loading 2015: 169-178. (in Persian)

21- Amarskaja IB, Belousov VS, Filippov PS. Analytical calculation of adiabatic processes in real gases. *InJournal of Physics: Conference Series* 2016 1 (Vol. 754, No. 11, p. 112003). IOP Publishing.

22- Pirmohammad S, Esmaili Marzdashti S. Study on the collapse behavior of multi-cell conical structures and their optimization using artificial neural networks. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*. 2017 22;7(2):111-27.

23- Ghodsbin Jahromi A, Hatami H. Numerical behavior study of expanded metal tube absorbers and effect of cross section size and multi-layer under low axial velocity impact loading. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*. 2018 20;49(4):685-96.

24- Sheikhi Azqandi M, Delavar M, Arjmand M. An enhanced time evolutionary optimization for solving engineering design problems. *Engineering with Computers*. 2020;36(2):763-81.

25- Dehghanian MA, Asgari M. Investigation and Optimization of Multi-walled Multi-cell Energy Absorbers considering Different Cross-sections.

26- Dehghanian MA, Asgari M. Investigation and Optimization of Multi-walled Multi-cell Energy Absorbers considering Different Cross-sections.

27- Sheikhi Azqandi M, Delavar M, Arjmand M. An enhanced time evolutionary optimization for solving engineering design problems. *Engineering with Computers*. 2020;36(2):763-81.

28- Bijari S, Sheikhi Azqandi M. OPTIMAL DESIGN OF REINFORCED CONCRETE ONE-WAY RIBBED SLABS USING IMPROVED TIME EVOLUTIONARY OPTIMIZATION. *Iran University of Science & Technology*. 2022 10;12(2):201-14.