

Design of Cubic Energy Absorber with Functionally Graded Geometry for Progressive-Functional Performance

Ali Hassanabadi, Mohsen Dadgar Aziz, Mojtaba Sheikhi Azqandi*

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

ABSTRACT

The development of efficient energy absorption systems has become an important necessity to increase occupant safety and protect cargo from accidents. Energy absorbers play a vital role in reducing structural damage by dissipating kinetic energy through plastic deformation. The performance of these absorbers is strongly influenced by geometric shape. In this study, the effect of functionally geometric design on the performance of a porous aluminum cubic absorber has been investigated. The main evaluation criteria were total and specific absorbed energy. First, the validity of the finite element model was confirmed by comparing the simulation results and experimental tests. Then, the behavior of geometric designs with different porosity patterns was analyzed numerically by DOE. The results show that the creation of porosity allows for the adjustment and control of the collapse behavior, such that the distribution of porosity has a significant effect on the force-displacement curve, total and specific absorbed energy, and the initial collapse force of the adsorbent. For example, in an initial diameter of 3 mm and a coefficient of variation of 1.2, porosity can reduce the mass and energy absorption of the adsorbent and the initial collapse force by about 17, 26, and 25%, respectively. Accordingly, these findings provide a path for the geometric optimization of porous adsorbents in a functionally scaled manner to simultaneously achieve high energy absorption capacity and lower initial collapse force.

KEYWORDS

Energy Absorber, Finite Element Method, Functionally Graded Geometry, Full Factorial Method, Smart Geometry.

* Corresponding Author: Email: Mojtabasheikhi@birjand.ac.ir

1. Introduction

In recent years, research on energy absorbers has increased significantly in order to reduce human and financial losses caused by accidents. An energy absorber is a system that converts kinetic energy resulting from the velocity of a system into other types of energy. So far, researchers have completed many studies on various types of energy absorbers with porous structures [1-5]. However, studies on energy absorbers with a porous cubic structure with a functionally graded geometry, which is considered in this study, have been very limited. On the other hand, determining the effect of various parameters, including the geometric shape of engineering systems, on their performance is of great importance [6]. Based on the study conducted by the authors, little research has been conducted so far in the field of analyzing and studying cubic absorbers with gradient structures. For this purpose, the present study aims to design an aluminum cubic absorber with functionally targeted holes. The holes embedded in the absorber were designed and created in a gradient manner. In other words, the diameter of each hole and the distance between the centers of each hole in the absorber are different in different positions. Therefore, the density and energy absorption capacity of the impact absorber depend on the distance from the initial impact location and, therefore, vary. The purpose of drilling is to use the least amount of material in the construction of the energy absorber with the greatest amount of energy absorption, and at the same time achieve the lowest initial collapse force. To validate the modeling and analysis of the problem performed numerically, a sample of the impact absorber was designed and manufactured, and after comparing the results obtained experimentally and numerically and confirming them, modeling and analysis of a larger number of absorbers were performed. Next, with the help of the experimental design method (DoE) and using the results of the analyses, predictions were made on how the adsorbent would behave under different porosity conditions.

2. Methodology

In this research, an attempt has been made to investigate the energy absorption for a porous cubic energy absorber. Accordingly, a cubic absorber was first made as shown in Figure 1. In the sample studied, the diameter of the holes is 6 mm, and the distance between the centers of the holes is 10 mm.

The produced sample was evaluated for pressure testing. In this test, the maximum force applied to the

sample and the maximum strain were obtained as values presented in Table 1.

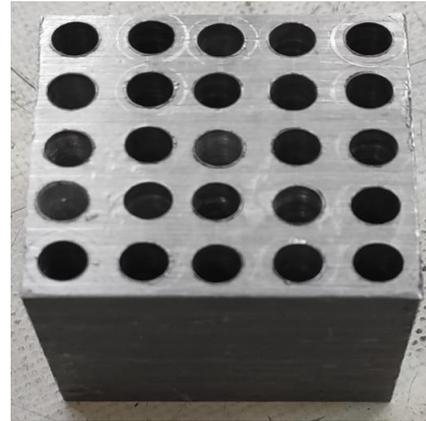


Figure 1. Modeling the arrangement of holes on the absorber, b) Cubic absorber made after creating holes

Table 1- Results of simple pressure test on cubic adsorber

Specific absorbed energy (J/kg)	Absorbed energy (J)	Maximum applied force (kN)	Maximum displacement (mm)
18095.61	4580	450.077	12.7652

After conducting the experimental test and obtaining the results, the problem analysis was carried out to calculate the absorbed energy of the absorber for different geometric samples with different sizes and placements of holes on the shock absorber surface, using the finite element method. Figure 2 shows a comparison between the force-displacement diagram of the sample presented in Figure 1 using the experimental test and the finite element method. As can be seen, these diagrams are in good agreement with each other, and therefore, the accuracy of the finite element method can be confirmed.

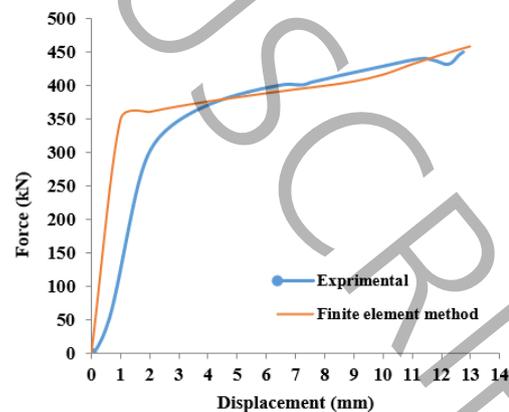


Figure 2 - Comparison of force-displacement diagrams of the absorber

According to the results obtained from the experimental test, numerical simulation, and the verification of the results, the design of experiments based on the full factorial method has been used to investigate the parameters affecting the collapse of the absorber. Considering the constant material and overall dimensions of the absorber, the variables of diameter and arrangement should be investigated to find different models. For this purpose, first two variables, d_0 and k , were defined, where d_0 is the diameter of the holes of the first row, and k is the ratio of the change of the holes of the next row to the previous row. The resulting relationship for finding the diameter of the holes of each level can be defined as a sequence with equation (1), where d_n is the diameter of the holes of the nth row.

$$d_n = k \times d_{n-1} \quad (1)$$

3. Discussion and Results

After determining the different levels of design parameters, modeling and analysis of all cases were performed, and the energy absorbed by the adsorber in all samples was obtained. Figures 3, 4, 5, and 6 show the force-displacement diagrams for different d_0 and k .

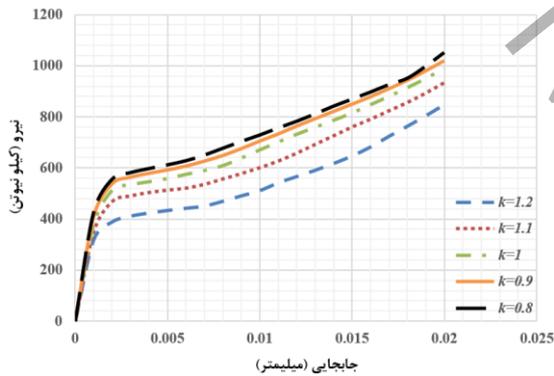


Figure 3- Force-displacement diagram with $d_0=3$ and coefficients k

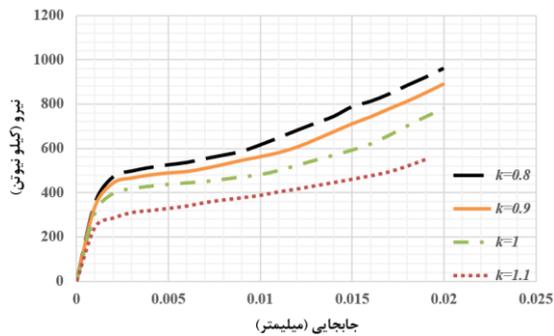


Figure 4- Force-displacement diagram with $d_0=5$ and coefficients k

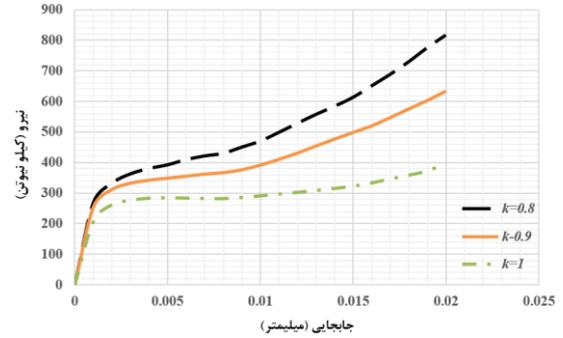


Figure 5- Force-displacement diagram with $d_0=7$ and coefficients k

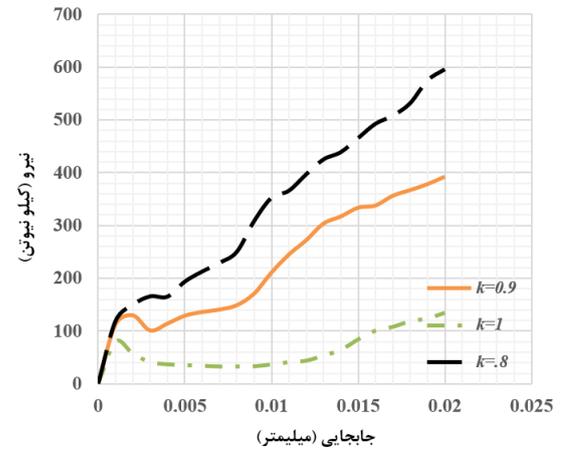


Figure 6- Force-displacement diagram with $d_0=9$ and coefficients k

As is clear from the diagrams, for a given d_0 , with decreasing k , the area under the curve, which is the absorbed energy, increases. In this case, the holes become smaller and the weight of the material increases. In other words, the porosity of the sample becomes smaller and more force is required to crush it.

For a specific d_0 , by increasing k due to the larger diameter of the holes and consequently the increase in the percentage absorber porosity and weight reduction, the absorbed energy decreases. In the case where the initial hole diameter is 3 mm, the energy reduction for different change coefficients was calculated to be about 26 percent. The important point is that in this case, the initial collapse force has also decreased by about 25 percent. On the other hand, for a specific change coefficient k , with an increase in the initial hole diameter, the energy absorbed by the absorber has decreased. The amount of this decrease is in the case where the change coefficient k is 0.8, and the initial hole diameter has increased from 3 mm to 9 mm, the amount of absorbed energy has decreased by about 54 percent. In this case, it should also be noted that the amount of the initial collapse force shows a decrease of about 72 percent. The important point is that in both cases above, the force required to change the shape of the absorber

and also the amount of mass of the absorber have decreased, which is desirable. By making the adsorbent porous, these two factors can be exploited, and a compromise can be established between the initial collapse force and the amount of energy of the adsorber and its mass.

In this study, the design of experiments method was used to investigate the effect of independent parameters on dependent parameters and predict the behavior of the adsorber. The regression equation for the specific surface energy function in joules per square meter (E_A) was obtained based on the input parameters as equation (2).

$$E_A = -7.85359 + 24.1969k + 1.99775d_0 - 10.1795 k^2 - 1.88214kd_0 - 0.0682779d_0^2 \quad (2)$$

4. Conclusions

This study investigated the behavior of absorbers with functionally graded geometry and analyzed the parameters affecting energy absorption in absorbers made of aluminum alloy. In the first step, the accuracy of numerical modeling using the finite element method was confirmed by comparison with experimental tests. In the next step, the levels of design variables were determined by applying a full factorial design using the design of experiments method. Then, all possible cases were analyzed using finite element simulation, and the effect of two key parameters, namely the hole arrangement pattern and the change in their diameter, was evaluated. The findings show that increasing the coefficient of variation (k), which leads to a larger hole diameter, an increase in the porosity percentage, and a decrease in weight, reduces the absorbed energy. Also, increasing the initial diameter of the holes has a reducing effect on the amount of energy absorption. Based on the results, the effect of the initial diameter on energy absorption is more pronounced than the coefficient of variation. On the other hand, increasing both of these parameters leads to a significant reduction in the initial collapse force. These observations indicate that by optimizing these variables, it is possible to design absorbers with lower weight and higher energy

absorption efficiency. As a future research direction, it is suggested to study the simultaneous effect of these parameters with other geometric factors, such as the spacing and arrangement of holes and the strain rate, as well as the use of more advanced finite element models. Also, validating the results with experimental tests with more complex geometries can be an effective step towards the practical development of this type of energy absorbers.

5. References

- [1] M. Mahbod, M. Asgari, C. Mittelstedt, Architected functionally graded porous lattice structures for optimized elastic-plastic behavior, *Journal of Materials: Design and Applications*, 234(8) (2020) 1099-1116.
- [2] A. M. Zanganeh, S.G. Khiavi, B. Mohammad Sadeghi, M. Divandari, Numerical study of the effect of geometric parameters on compressive mechanical properties of metallic lattice cylinders, *Journal of Mechanical Engineering Science*, 236(10) (2021) 5484-5494.
- [3] J. Song, M. Wang, D. Li, J. Zhang, Deformation and Energy Absorption Performance of Functionally Graded TPMS Structures Fabricated by Selective Laser Melting, *Applied Science*, 14(5) 2024, 2064.
- [4] A. Mohammadi, M. Sheikhi Azqandi, S. Rahnama, Designing of conical energy absorber with internal pressure by enhanced vibrating particle system algorithm, *Iranian Journal of Materials Forming*, 12(2) (2025) 29-41.
- [5] H. Wang, Y. Fu, M. M. Su, and H. Hao, Fabrication and compression investigation of the ordered porous aluminum with cubic pores, *Materials Science Forum*, 93 (2018) 97-105.
- [6] M. Sheikhi Azqandi, M. Hassanzadeh, First-and second-order sensitivity analysis of finite element models using extended complex variables method. *Archive of Applied Mechanics*, 91 (2021): 4263-4277, 2021.

طراحی جاذب انرژی مکعبی با هندسه مدرج تابعی برای عملکرد تدریجی-کارکردی

علی حسن آبادی، محسن دادگر عزیز، مجتبی شیخی ازغندی*

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده

امروزه توسعه سامانه‌های کارآمد جذب انرژی برای افزایش ایمنی سرنشینان و محافظت از بار در برابر تصادفات، به یک ضرورت مهم تبدیل شده است. جاذب‌های انرژی با اتلاف انرژی جنبشی از طریق تغییر شکل پلاستیک کنترل شده، نقش حیاتی در کاهش آسیب‌های سازه‌ای ایفا می‌کنند. عملکرد این جاذب‌ها به شدت تحت تاثیر پارامترهای هندسی جاذب است. در این پژوهش، تاثیر طراحی هندسی هدفمند بر عملکرد یک جاذب مکعبی متخلخل از جنس آلایژ آلومینیوم با هندسه مدرج تابعی بررسی شده است. معیارهای اصلی ارزیابی، انرژی جذب شده کلی و ویژه بوده‌اند. ابتدا اعتبار مدل اجزای محدود با مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمایش تجربی تایید گردید. سپس با به‌کارگیری روش طراحی آزمایش، رفتار طرح‌های هندسی با الگوهای تخلخل متفاوت به صورت عددی تحلیل شد. نتایج نشان می‌دهند که ایجاد تخلخل امکان کنترل رفتار فروریزش را فراهم می‌کند، به گونه‌ای که چگونگی توزیع تخلخل، تاثیر معناداری بر منحنی نیرو-جابجایی، مقدار انرژی جذب شده کلی و ویژه و همچنین نیروی فروریزش اولیه جاذب دارد. به عنوان نمونه در حالت قطر اولیه ۳ میلی‌متر و ضریب تغییر ۱/۲، تخلخل می‌تواند به ترتیب باعث کاهش حدود ۱۷، ۲۶ و ۲۵ درصدی جرم و جذب انرژی جاذب و نیروی فروریزش اولیه شود. بر این اساس، این یافته‌ها مسیری برای بهینه‌سازی هندسی جاذب‌های متخلخل به صورت مدرج تابعی جهت دستیابی همزمان به ظرفیت جذب انرژی بالا و نیروی فروریزش اولیه کمتر ارائه می‌دهد.

کلمات کلیدی

جاذب انرژی، روش المان محدود، ماده مدرج تابعی، روش عاملی کامل، هندسه هدفمند.

۱- مقدمه

امروزه امنیت جان سرنشینان و حفاظت از وسیله نقلیه و بار آنها از اهمیت بالایی برخوردار است. با افزایش تعداد وسایل نقلیه، حوادث مرتبط با آنها نیز بیشتر شده و سوانح مختلف جاده‌ای، ریلی، دریایی و هوایی منجر به خسارت‌های بسیار شدیدتری می‌شود. به همین دلیل در سال‌های اخیر تحقیقات درباره جاذب‌های انرژی به منظور کاهش خسارت‌های انسانی و مالی ناشی از تصادفات افزایش چشم‌گیری داشته است. جاذب انرژی سیستمی است که انرژی جنبشی ناشی از داشتن سرعت در یک سیستم را به انواع دیگر انرژی تبدیل می‌کند. مستهلک شدن این انرژی جنبشی به چند روش مختلف شامل تغییر شکل برگشت‌پذیر مانند انرژی کرنش الاستیک در جامدات، ایجاد فشار در سیالات تراکم‌پذیر و یا تغییر شکل برگشت‌ناپذیر مانند انرژی مورد نیاز برای تغییر شکل پلاستیک اتفاق می‌افتد. جاذب انرژی باید دارای ساختار به نسبت ساده، قابلیت نصب راحت، وزن کم و مقرون به صرفه باشد. طبق مطالعات صورت گرفته، از مهم‌ترین جاذب‌های انرژی می‌توان به لوله و قوطی‌ها، فروستا^۲، چندضلعی‌ها، جاذب‌های لانه زنبوری، صفحات ساندویچی، استرات^۳، مشبک، فومی و جاذب‌های متخلخل اشاره کرد. در ادامه تعدادی از مطالعات انجام شده بر روی انواع جاذب‌های انرژی مورد بررسی قرار گرفته است.

کدخداپور و همکاران [۱] تغییر شکل پلاستیک و خواص مکانیکی فشاری فوم آلومینیومی با حفره‌های کره‌ای توخالی ساخته شده با روش فضاگه‌دار را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه روش‌های عددی و تجربی جهت ارزیابی تاثیر توزیع منظم و نامنظم حفره‌ها و راستای بارگذاری بر خواص مکانیکی فوم ساخته شده مورد استفاده قرار گرفت و رفتار سخت‌شوندگی ماده در دو حالت توزیع منظم و نامنظم حفره‌ها با استفاده از نتایج تجربی بررسی گردید. بررسی خواص مکانیکی به دست آمده، نشان داد که رفتار الاستیک نمونه‌های نامنظم فوم‌هایی که با چیدمان منظم ساخته شده‌اند، بیشتر است. هر چند نمونه‌های نامنظم، خواص الاستیک بهتری از خود نشان دادند، ولی قابلیت جذب انرژی آنها تحت فشار در مقایسه با نمونه‌های منظم کمتر بود. بیسواز و همکاران [۲] تغییر شکل و رفتار خرابی آلیاژ $Ti6Al4V$ متخلخل تحت بار دینامیکی و استاتیکی را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه مشخص شد که حفره به علت افزایش تمرکز تنش باعث کاهش استحکام جاذب می‌شود. علاوه بر این توزیع و شکل تخلخل‌ها تاثیر مهمی در تغییر شکل و رفتار شکست مواد متخلخل دارد.

وفایی [۳] به بررسی عددی و تجربی دو جاذب مکعبی آلومینیومی پرداختند. یکی از این جاذب‌ها در یک جهت و دیگری در دو جهت سوراخ کاری شده بودند. او یک مکعب را در راستای محور x و دیگری را در دو راستای x و y با سوراخ‌های به قطر یکسان ایجاد نمود. در ادامه به دو روش تجربی و عددی نمونه‌های حاصله را آزمایش کرد. وی دریافت با حذف کردن تاثیر جرم جاذب، افزایش متغیر درصد تخلخل، باعث بهبود رفتار جذب انرژی ماده می‌گردد. خلا پژوهشی این مطالعه، عدم در نظر گرفتن هندسه متغیر در سوراخ‌ها و ناهمگنی آنها بود.

گراسیانو و همکاران [۴] جاذب‌های مشبک را به صورت شبه استاتیکی جهت محاسبه نیروی فروریزش و میزان ظرفیت جذب انرژی بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که تعداد سوراخ‌های دیواره و شکل سطح مقطع سوراخ بر مقدار جذب انرژی و نیروی فروریزش اولیه مؤثر است.

وانگ و همکاران [۵] به بررسی رفتار ساختارهای آلومینیومی متخلخل منظم با چهار ساختار مکعبی مختلف تحت آزمون شبه استاتیک پرداختند. در این پژوهش خواص فشاری و رفتار این ساختارها در جذب انرژی مورد ارزیابی قرار گرفت و مشخص گردید که طراحی سازه برای تبدیل مکانیسم تغییر شکل برای بهبود خواص فشاری و رفتار جذب انرژی مؤثر بود. در این پژوهش نیز ساختارهای منظم و یکنواخت مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

^۲ Frusta

^۳ Strut

محبود و همکاران [۶] خواص مکانیکی الاستیک-پلاستیک سازه‌های متخلخل منظم و مدرج تابعی ساخته شده به روش افزایشی ساخته شده‌اند، بررسی کردند. مدول‌های الاستیک و همچنین جذب انرژی از طریق تحلیل اجزای محدود ارزیابی شدند. نتایج نشان می‌دهد که مدول‌های الاستیک و رفتار پلاستیک سازه‌های شبکه‌ای به طور قابل توجهی تحت تأثیر هندسه سلول و چگالی نسبی لایه‌ها قرار می‌گیرند. آنها نتیجه گرفته‌اند که بهینه‌سازی منجر به عملکرد بسیار بهتر سازه‌های متخلخل منظم و مدرج تابعی می‌شود.

زنگنه و همکاران [۷]، شبیه‌سازی‌های عددی بر روی نمونه‌های مشبک استوانه‌ای آلایژ آلومینیمی با شکل‌های هندسی شامل ضخامت و فیلت‌های مختلف را تحت تنش فشاری با نرخ کرنش ثابت با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام دادند و بهترین ضخامت و فیلت را برای رسیدن به حداکثر جذب انرژی و بیشترین نیرو منجر به استحکام کشش نهایی را ارائه دادند. موریرا و همکاران [۸] رفتار فوم‌های آلومینیومی سلول باز با تخلخل‌هایی با ابعاد متفاوت تحت اثر ضربه را مورد بررسی قرار دادند. قطر فوم‌های آلومینیومی US4، US5 و US6 به ترتیب ۴، ۵ و ۶ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. ضربه‌ای با جرم یک کیلوگرم و سرعت هشت متر بر ثانیه به فوم‌های با ابعاد تخلخل مختلف برخورد کرد. نتایج این شبیه‌سازی نشان داد که فوم US5 در یک تغییر شکل یکسان، می‌تواند نیروی بیشتری را در قیاس با دو مدل دیگر تحمل کند. همچنین استحکام تسلیم و سفتی ویژه آن نیز در مقایسه با دیگر نمونه‌ها بیشتر می‌باشد. در این حالت نیز ساختار فوم با اندازه یکنواخت در نظر گرفته شده است و تاثیر غیریکنواختی مد نظر نبوده است.

واجاری و همکاران [۹] به بررسی تجربی رفتار مکانیکی ساختارهایی مکعبی مرکزدار و کاگومی تحت آزمون فشار شبه استاتیک پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با عوض شدن و اصلاح شکل هندسی می‌توان قابلیت تغییر شکل‌های بزرگتر بدون ایجاد شکست را در نمونه‌ها ایجاد نمود و در نتیجه علاوه بر جذب انرژی یکنواخت در آن‌ها، می‌توان مقدار جذب انرژی را افزایش داد.

سانگ و همکاران [۱۰] به بررسی جاذب انرژی با هندسه‌های دارای حداقل سطوح پرداختند و تاثیر الگوی پر شدگی بر جذب انرژی و نیروی فروریزش اولیه را به سرانجام رساندند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که جاذب‌ها با ساختارهای ورقی می‌توانند نحوه تغییر شکل بهتری را برای افزایش ظرفیت جذب انرژی ایجاد کنند. علاوه بر این نیروی فروریزش اولیه در جاذب به صورت مدرج تابعی می‌تواند همراه با کاهش موثری باشد.

بهروان و همکاران [۱۱] طراحی بهینه ضربه‌گیر استوانه‌ای برای رسیدن به مشخصات هندسی شامل قطر و ضخامت‌های متفاوت تحت فشار داخلی با روش تکامل زمانی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که ایجاد تراکم می‌تواند حدود ۳۰ درصد قابلیت جذب انرژی جاذب را بالا ببرد. علاوه بر این تاثیر مثبتی بر کاهش مقدار نیروی فروریزش اولیه جاذب دارد.

آذرخش و همکاران [۱۲] اثر پارامترهای مختلف بر جذب انرژی جاذب لوله‌ای شامل وجود درپوش در انتهای لوله، شیارهای حلقوی و طولی، ایجاد حفره در دیواره جاذب و زاویه بارگذاری بر نحوه لهیدگی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها حاکی از این است که اگر چه وجود شیارهای حلقوی، طولی و ایجاد حفره بر روی بدنه لوله منجر به کاهش جذب انرژی می‌گردد، ولی باعث فروریزش پایدار و کاهش نیروی بیشینه لهیدگی شده و از شدت نیروهای وارده به سرنشینان و سازه اصلی جلوگیری می‌کند. از طرفی دیگر تعداد حفره‌ها اثر محسوسی بر نحوه فروریزش و نمودار نیرو-جابجایی ندارند، در حالی که شکل هندسه حفره بر نحوه فروریزش و نیروی متوسط لهیدگی موثر است.

محمدی و همکاران [۱۳] به بررسی پارامترهای موثر هندسی شامل تغییرات زوایا، ضخامت و قطر بر روی عملکرد یک جاذب انرژی مخروطی تحت فشار داخلی پرداختند. در این حالت نیز تراکم باعث شد که علاوه بر کاهش نیروی فروریزش اولیه، مقدار جذب انرژی کلی جاذب نیز بهبود پیدا کند.

وحدت آزاد و همکاران [۱۴] انرژی جذب شده پروفیل استوانه‌ای پر شده با فوم به سه روش محوری، شعاعی و دوجهته (شعاعی و محوری) تحت بار شبه استاتیکی را بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که به لحاظ میزان جذب انرژی بیشتر، به ترتیب استوانه پر شده با فوم تابعی دوجهته، فوم ساده، فوم تابعی محوری و فوم تابعی شعاعی دارای عملکرد مناسب‌تری است. پیرمحمد و همکاران [۱۵] بهینه‌سازی چند منظوره ساختارهای دولایه مربعی و هشت‌ضلعی با شکل حفره‌های متفاوت را بررسی کردند. آن‌ها سه شکل متفاوت حفره شامل شش‌ضلعی، مربعی و بیضوی بر روی ساختارهای دولایه هشت‌ضلعی و مربعی را بررسی کردند. پس از مقایسه مدل اجزای محدود طراحی شده با داده‌های تجربی، رفتار فروریزش ساختارها با استفاده از روش عددی شبیه‌سازی گردید. بنابر نتایج حاصله، با استفاده از به‌کارگیری روش ایجاد حفره درون دیواره‌های جاذب، میزان جذب انرژی به طور قابل توجهی افزایش یافت.

چهاردولی و همکاران [۱۶] اثر سوراخ بر نحوه فروپاشی مخروط‌های ناقص ته بسته تحت بارگذاری محوری شبه استاتیکی را مطالعه کردند. شبیه‌سازی ساختارهای مخروطی به کمک نرم‌افزار المان محدود و مقایسه آن‌ها با داده‌های حاصل از آزمایش‌های تجربی انجام شد و تطابق خوبی بین نتایج تجربی و عددی وجود داشت. در این مطالعه، چند متغیر طراحی با سطوح مختلف شامل زاویه یال، ضخامت و آرایش سوراخ‌ها بررسی شد و نحوه فروریزش آن‌ها باهم مورد مقایسه قرار گرفت. آن‌ها دریافتند که افزایش تعداد سوراخ در بدنه جاذب‌ها، منجر به کاهش نیروی بیشینه و افزایش نیروی له‌شدگی و در نتیجه بالا رفتن کارایی جاذب می‌گردد. بنابراین بر اساس نتایج به دست آمده، کارایی کلی جاذب‌های سوراخ‌دار از مشابه بدون سوراخ بیشتر شد. افزایش تعداد سوراخ تا حدی می‌تواند باعث افزایش قابلیت جذب انرژی جاذب را به دنبال داشته باشد.

فعلی و همکاران [۱۷] به بررسی تحلیلی و عددی جاذب‌های انرژی چند سلولی مربعی شکل دارای ضخامت ثابت و همچنین ضخامت متغیر به صورت مدرج تابعی پرداختند. آن‌ها مقادیر جذب انرژی و نیروی فروریزش را بررسی کردند و مقادیر مطرح شده رو باهم مقایسه نمودند.

چوبینی و همکاران [۱۸] جذب انرژی لوله‌های جدارنازک با شکل‌های مربعی و دایروی تحت بار ضربه‌ای را به دو روش تجربی و عددی بررسی کردند. حداکثر کردن میزان جذب انرژی در اثر تغییر شکل برای لوله آلومینیوم و بررسی اثر وجود فوم درون آن بر روی جذب انرژی تحت ضربه، هدف از انجام تحقیق بود. آن‌ها دریافتند که با توجه به جنس ضربه‌گیر، جذب انرژی لوله توپر نسبت به توخالی ۲۰ درصد و لوله مربعی نسبت به دایروی ۵۰ درصد بیشتر می‌باشد.

الیاسی و همکاران [۱۹] قابلیت جذب انرژی لوله‌های جدارنازک سوراخ‌دار استوانه‌ای از جنس آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها یک الگوی هندسی جدید برای لوله‌های جدارنازک سوراخ‌دار استوانه‌ای را جهت بهبود ویژگی‌های جذب انرژی ارائه دادند. به این منظور، از روش طراحی آزمایش تاگوچی برای یافتن سطوح بهینه پارامترهای هندسی لوله جهت دستیابی به بیشینه نسبت انرژی به وزن و کمینه کرنش معادل موثر استفاده شد. تعداد ردیف سوراخ‌ها، تعداد سوراخ در هر ردیف، قطر سوراخ کوچک و ضریب قطر سوراخ کوچک به عنوان پارامترهای هندسی لوله‌ها در نظر گرفته شدند. نیروی اولیه لهیدگی، انرژی جذب شده کل، نسبت انرژی به وزن و نسبت نیروی بیشینه اولیه به نیروی متوسط برای چیدمان‌های بهینه باهم مقایسه شدند. بررسی نتایج نشان داد که چیدمان سوراخ‌ها می‌تواند منجر به بهترین نتیجه برای جذب انرژی شود. کلوکسیا و همکاران [۲۰] به بررسی عددی و تجربی جاذب‌های انرژی شبکه‌ای به صورت مدرج تابعی پرداخته‌اند. در این مطالعه یک فرایند درجه‌بندی برای بررسی جذب انرژی در این ساختارها ارائه می‌دهد. با استفاده از تحلیل المان محدود، توزیع تنش در نمونه شبکه‌ای یکنواخت اولیه را بررسی کرده و سپس بر اساس آن و با هدف همگن‌سازی، ساختار شبکه را اصلاح می‌کند. نتایج این مطالعه حاکی از آن است که درجه‌بندی انجام شده منجر به بهبود قابل توجه در جذب انرژی ویژه و جذب انرژی حجمی و همچنین توزیع تنش یکنواخت‌تر می‌شود.

تاکنون بر روی انواع جاذب‌های انرژی، تحقیقات زیادی انجام شده است. اما در مورد جاذب‌های انرژی با ساختار مکعبی متخلخل با هندسه‌ای به صورت مدرج تابعی که در این پژوهش مد نظر قرار گرفته، بررسی‌ها بسیار محدود بوده است. از طرفی تعیین میزان تاثیر پارامترهای مختلف از جمله شکل هندسی سیستم‌های مهندسی بر عملکرد آن‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است [۲۱]. علاوه بر این در سال‌های اخیر ساختارهای آلومینیوم متخلخل منظم، نوع جدیدی از فلزات متخلخل است که به دلیل ساختار منظم، پتانسیل بالایی برای کاربردهای مهندسی دارند [۲۲].

بر اساس بررسی صورت گرفته توسط نویسندگان تاکنون تحقیقات کمی در زمینه تحلیل و بررسی جاذب مکعبی با ساختار گرادیانی انجام شده است. به این منظور هدف پژوهش حاضر طراحی یک جاذب مکعبی آلومینیومی دارای سوراخ‌هایی به صورت منظم و هدفمند است. سوراخ‌های تعبیه شده در جاذب به صورت گرادیانی، طراحی و ایجاد گردید. به عبارتی قطر هر سوراخ و فاصله بین مراکز هر سوراخ در جاذب در موقعیت‌های مختلف متفاوت است. بنابراین چگالی و قابلیت جذب انرژی در ضربه‌گیر وابسته به فاصله از محل اولیه ضربه بوده و بنابراین متغیر می‌گردد. هدف از سوراخ‌کاری استفاده از کمترین مقدار ماده در ساخت جاذب انرژی با بیشترین مقدار جذب انرژی و در عین حال رسیدن به کمترین نیروی فروریزش اولیه است. برای اعتبارسنجی مدل‌سازی و تحلیل مسئله انجام شده به صورت عددی، نمونه‌ای از ضربه‌گیر طراحی و ساخته شد و پس از مقایسه نتایج گرفته شده به صورت تجربی و عددی و تایید آن، مدل‌سازی و تحلیل تعداد بیشتری جاذب انجام شد. در ادامه با کمک روش طراحی آزمایش و استفاده از نتایج تحلیل‌های انجام شده، پیش‌بینی چگونگی رفتار جاذب با شرایط مختلف تخلخل صورت پذیرفت.

۲- بیان مسئله

با توجه به کاربرد روزافزون جاذب‌های انرژی در وسایل نقلیه، مطالعه و بررسی جزئیات ساختاری جاذب‌ها در حال توسعه است. متغیرهای ساختاری از جمله جنس، چگالی نسبی و شکل بر رفتار ضربه‌گیرها تاثیر قابل‌توجهی دارند. در این تحقیق سعی شده میزان جذب انرژی برای یک جاذب انرژی مکعب شکل متخلخل از جنس آلیاژ آلومینیوم سری ۶۰۰۰ با طرح‌های مختلف مورد بررسی قرار گیرد. آلومینیوم‌های آلیاژی این سری ترکیبی از آلومینیوم، منیزیم و سیلیسیم است. وجود این دو عنصر در آلیاژ، قابلیت عملیات حرارتی را به آلیاژ داده و سبب بهتر شدن خواص مکانیکی آن مانند استحکام و مقاومت به سایش می‌شود. علاوه بر این در این سری از آلیاژ تعادل بین استحکام و شکل‌پذیری برقرار بوده و به راحتی قابلیت ماشینکاری دارد. آلیاژ ۶۰۶۳ پرمصرف‌ترین آلیاژ این گروه است و در این تحقیق نیز از آن استفاده شده است. یکی از مهمترین معیارها در طراحی جاذب‌ها، قابلیت مستهلک کردن و جذب انرژی آن‌ها است. میزان جذب انرژی در جاذب را می‌توان از رابطه (۱) به‌دست آورد [۲۳].

$$E = \int_0^{d_{max}} F \cdot dx \quad (1)$$

در این رابطه E میزان جذب انرژی و d_{max} بیشترین طول فروریزش و F نیروی لهیدگی لحظه‌ای است. انرژی جذب شده بر واحد جرم یا همان انرژی مخصوص جذب SAE از رابطه (۲) به دست می‌آید [۲۳].

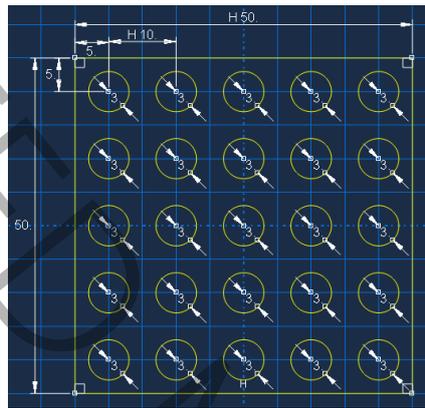
$$SAE = \frac{E}{m} \quad (2)$$

در رابطه فوق m جرم جاذب می‌باشد. در یک جاذب انرژی، انرژی مخصوص جذب به نوع فروریزش و نحوه لهیدگی آن بستگی دارد.

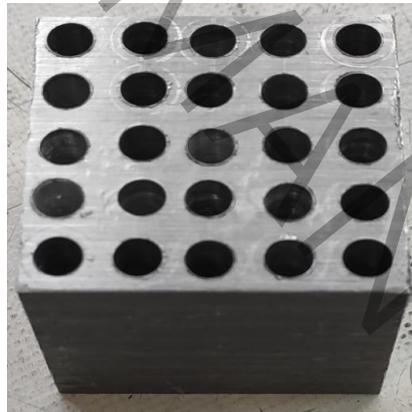
۲-۱- ساخت نمونه اولیه جاذب

ابتدا مکعب مورد نظر با ابعاد $50 \times 50 \times 50$ میلی‌متر توسط دستگاه برش برقی پدالی برش زده شد. به منظور دقت در سوراخ کاری ابتدا الگوی چینش سوراخ‌ها به صورت دقیق مشخص گردید و الگوی ترسیمی ارائه شده در شکل ۱ الف به سطح کار

منتقل و سپس با استفاده از سمبه نشان محل سوراخ‌ها مشخص گردید. در قطعه مورد نظر، قطر سوراخ‌ها ۶ میلی‌متر و فاصله مرکز سوراخ‌ها از یکدیگر ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. پس از مشخص شدن محل سوراخ‌ها، عملیات سوراخ کاری با دریل ثابت و بادقت بالا صورت پذیرفت و در ادامه با استفاده از مته با سایز کوچکتر و با دور پایین سوراخ‌ها ایجاد شد. سپس با مته با قطر ۶ میلی‌متر سوراخ‌ها سایز شدند. با توجه به اینکه نحوه ساخت قطعه می‌تواند تاثیر بسزایی در نتایج آزمایش داشته باشد، لذا در این مرحله سعی شد با دقت بالا مراحل ساخت انجام گردد. دلیل انتخاب این حالت برای بررسی اعتبارسنجی، در مرحله اول امکان ساخت راحت‌تر آن و همچنین امکان دقت بیشتر و علاوه بر این مقرون به صرفه‌تر بودن ساخت این قطعه بوده است. در حالتی که توزیع سوراخ‌ها به صورت گرادیانی تغییر کند، باید سوراخ‌ها با مته ریزتر ایجاد گردد که این خود باعث افزایش زمان ساخت و همچنین افزایش هزینه نیز می‌شود. در شکل ۱ ب قطعه ساخته شده سوراخ کاری شده به عنوان جاذب ارائه شده است.



a-الف



b-ب

شکل ۱- الف) مدل‌سازی چیدمان سوراخ‌ها بر روی جاذب (ابعاد به میلی‌متر)، ب) جاذب مکعبی ساخته شده بعد از ایجاد سوراخ کاری
Figure 1- a) Modeling the arrangement of holes on the absorber, b) Cubic absorber made after creating holes

۳- تحلیل تجربی جاذب

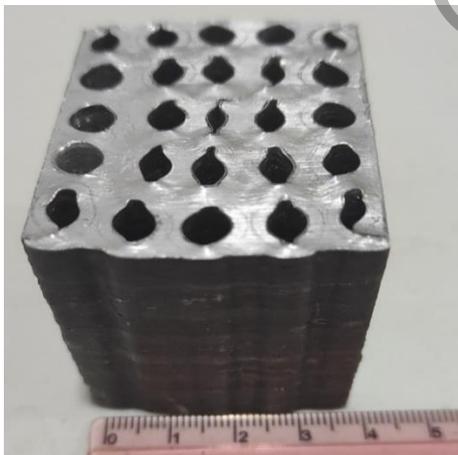
قطعه ساخته شده جهت آزمایش فشار توسط دستگاه فشار ۳۰۰ ژول (SIT-300E) آزمایشگاه خواص مکانیکی پارک علم و فناوری خراسان رضوی ارائه شده در شکل ۲ آزمایش گردید. این دستگاه قابلیت اندازه‌گیری نیرو در بازه 10N تا 600 kN را داشته و امکان رسم منحنی تنش- کرنش و همچنین تعیین مقاومت تسلیم، مدول الاستیسیته و استحکام نهایی را دارد.



شکل ۲- دستگاه تست کشش ۳۰۰ ژول (SIT-300E) به منظور تعیین خواص مکانیکی قطعه کار

Figure 2- 300 Joule tensile testing machine (SIT-300E) to determine the mechanical properties of the workpiece

آزمون فشار در این پژوهش، طبق استاندارد DIN 50134 [۲۴] که برای ارزیابی استحکام و رفتار تغییرشکل فلزات سلولی مثل اسفنج‌های فلزی، فوم‌های فلزی و سازه‌های کروی توخالی جامد تحت فشار ارائه شده است، انجام شد. بر اساس این استاندارد باید سطوح تماس با صفحه‌های فشار کاملاً موازی و صاف باشد و لبه‌ها هیچ‌گونه براده‌ای نداشته باشد. برای دقت بالا باید آزمون در درجه دمای اتاق بین در حدود بین ۱۸ تا ۲۸ درجه سانتیگراد انجام شود. نمونه بر روی فک پایین دستگاه کاملاً ثابت شد تا از لغزش احتمالی در طول فرآیند بارگذاری جلوگیری گردد و حرکت فک بالایی با سرعت ثابت ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه به سمت پایین تعیین گردید. هدف از سرعت کم فک بالایی، شبیه‌سازی آزمون فشار در حالت شبه استاتیکی است. پس از برخورد فک بالا با سطح نمونه، قطعه شروع به تغییر شکل کرد تا رفتار قطعه علاوه بر منطقه الاستیک در محیط پلاستیک نیز مورد ارزیابی قرار گیرد و نمودار نیرو بر حسب جابجایی و سپس میزان انرژی جذب شده در طی تغییر کل محاسبه گردد. شکل ۳ وضعیت ضربه‌گیر را پس از اعمال نیروی فشاری نشان می‌دهد. در این آزمون بیشترین نیروی وارده بر نمونه و نیز بیشترین مقدار کرنش به صورت مقادیر ارائه شده در جدول ۱ به دست آمد. در ادامه نمودار نیرو- جابجایی آزمون تجربی مطابق شکل ۴ حاصل گردید.



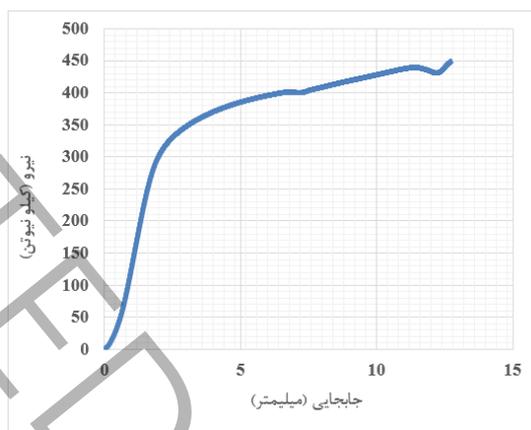
شکل ۳- شکل هندسی جاذب بعد از تغییر شکل و ایجاد تغییر شکل پلاستیک در آن

Figure 3 - The geometric shape of the absorber after plastic deformation

Table 1- Results of simple pressure test on cubic adsorber

جدول ۱- نتایج آزمون فشار ساده بر روی جاذب مکعبی

بیشترین مقدار تغییر طول	بیشترین نیروی اعمالی	انرژی جذب شده	انرژی جذب شده ویژه
(mm)	(kN)	(J)	(J/kg)
۱۲/۷۶۵۲	۴۵۰/۰۷۷	۴۵۸۰	۱۸۰۹۵/۶۱

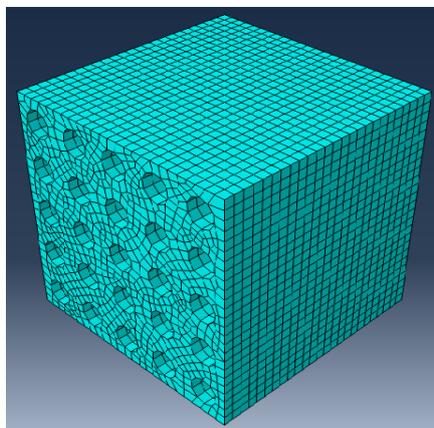


شکل ۴- نمودار نیرو-جابجایی حاصل از آزمون فشار جاذب

Figure 4 - Force-displacement diagram of the adsorber in the pressure test

۴- تحلیل عددی جاذب و اعتبار سنجی

در این قسمت تحلیل مسئله جهت محاسبه انرژی جذب شده جاذب به‌ازای نمونه‌های مختلف شکل هندسی با اندازه و جانمایی متفاوت سوراخ‌ها بر روی سطح ضربه‌گیر، با استفاده از روش المان محدود انجام گرفته است. برای این منظور جهت اعتبارسنجی، ابتدا یک نمونه مطابق با قطعه ساخته شده در بخش قبل جهت مقایسه نتایج حاصله از روش آزمایشگاهی با روش المان محدود مدل‌سازی شد. در شکل ۵ مدل هندسی و المان بندی شده جاذب به صورت مشخصات ارائه شده در شکل ۱ نشان شده است. خواص مکانیکی ضربه‌گیر شامل چگالی، مدول یانگ، ضریب پواسون و ضرایب جانسون کوک در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۵- مدل شبیه‌سازی شده نمونه جاذب با روش المان محدود

Figure 5- Simulated model of the adsorber using the finite element method

Table 2- Mechanical properties of aluminum alloy used in the absorber

جدول ۲- خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم به کار رفته در جاذب

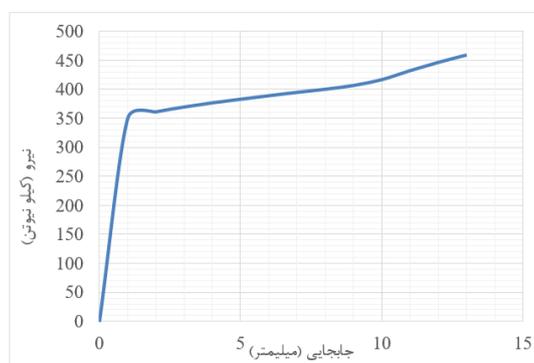
چگالی (kg/m ³)	ضریب پواسون			مدل یانگ (GPa)	خواص الاستیک
۲۸۲۳/۳	۰/۳۳			۷۷/۱۲۵	
<i>m</i>	<i>C</i>	<i>n</i>	<i>B</i> (MPa)	<i>A</i> (MPa)	خواص پلاستیک (جانسون کوک) [۲۵]
۰	۰/۰۰۳۶	۰/۰۷	۶۳/۹۹	۱۷۶/۴۵	

در این پژوهش برای تعریف ماده با توجه تاثیر کرنش سختی در رفتار ماده، مدل جانسون کوک مورد استفاده قرار گرفت. لازم به ذکر است با توجه به عدم تاثیر دما در این مدل سازی، ضریب مربوط به دما صفر در نظر گرفته شده و از اثر آن صرف نظر شده است.

برای شبیه سازی آزمون شبه استاتیک، نمونه بین دو فک قرار گرفته و فک بالایی بسیار آهسته با سرعت ثابت ۰/۵ میلی متر بر دقیقه به سمت فک پایین حرکت کرده تا از تاثیرات اینرسی جلوگیری گردد. سرعت حرکت فک بالایی بر نتایج حاصله موثر می باشد. برای اعمال شرایط مرزی اعمالی، با توجه به ثابت بودن فک پایینی در دستگاه کشش و گیردار بودن قطعه در آن، تمام درجات آزادی قطعه در تماس با فک پایینی کاملاً مقید شده است. برای سطح بالایی قطعه که در تماس با فک بالایی دستگاه است نیز فقط در جهت اعمال نیروی فشاری (محور Z) به سمت پایین حرکت می کند و در تمام جهات دیگر مقید شده است. برای اطمینان به نتایج در شبیه سازی، آنالیز حساسیت به مش در تحلیل مسئله استفاده شده و در تمام حالات اندازه مش واحدی کوچک شده و انتخاب گردیده که نتایج گرفته شده مستقل از اندازه مش باشد. برای تحلیل مسئله از المان های C3D8R استفاده شده که حرف C بیانگر این است که از خانواده المان پیوسته می باشد، 3D، سه بعدی بودن المان و ۸ تعداد گره المان و R بیانگر انتگرال کاهش یافته می باشد.

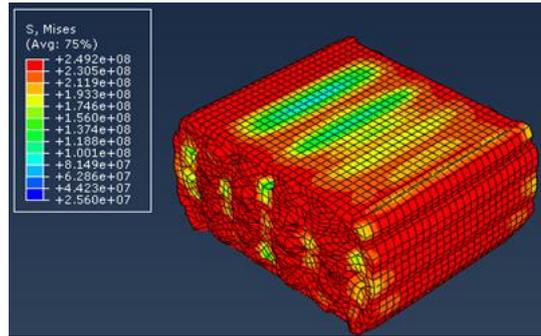
پس از مدل کردن نمونه با روش المان محدود و تعیین تمام پارامترها همانند آزمایش تجربی، نمودار نیرو-جابجایی به شکل ۶ حاصل گردید. شکل ۷ وضعیت لهیدگی و مقدار تنش قطعه پس از اعمال فشار با روش المان محدود در تمام نواحی جاذب را نشان می دهد.

در شکل ۸ مقایسه ای بین نمودار نیرو-جابجایی با استفاده از آزمون تجربی و روش المان محدود ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود این نمودارها با تقریب مناسبی بر یکدیگر منطبق بوده و لذا می توان صحت روش المان محدود را تایید کرد. بیشترین اختلاف بین این دو شکل در محدوده تغییر شکل الاستیک اتفاق افتاده است. همان گونه که از نمودار هر دو روش تجربی و عددی نیز مشخص است در حالت تغییر شکل نهایی جاذب، نیرو فروریزش حدود ۴۵۰ کیلو نیوتن می باشد.



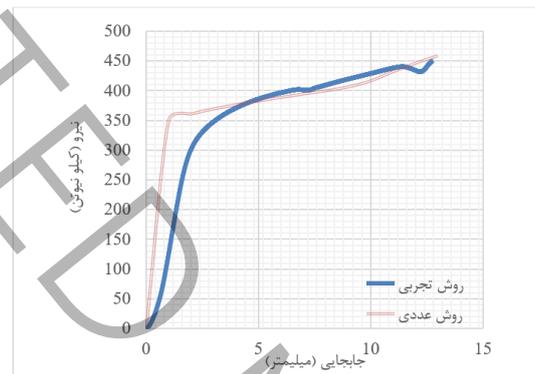
شکل ۶- نمودار نیرو-جابجایی با استفاده از روش المان محدود

Figure 6 - Force-displacement diagram using the finite element method



شکل ۷- شکل لهیدگی و توزیع تنش قطعه بعد از اعمال فشار در روش المان محدود

Figure 7 - Crushing shape and stress distribution of the absorber after applying force by finite element method



شکل ۸- مقایسه نمودارهای نیرو- جابجایی جاذب با روش‌های آزمایش تجربی و المان محدود

Figure 8 - Comparison of force-displacement diagrams of the absorber with experimental and finite element methods

جدول ۳ مقادیر میزان انرژی جذب شده نمونه به دو روش تجربی و المان محدود و درصد میزان خطای نسبی روش المان محدود را بیان می‌کند. اختلاف انرژی جذب شده به دو روش دارای اختلاف کمی است و درصد خطای نسبی (قدر مطلق اختلاف مقدار انرژی با روش تجربی و روش عددی تقسیم بر مقدار انرژی با روش تجربی) در حدود ۸/۲۷ درصد را دارد.

Table 3- Absorbed energy of the absorber by the finite element and experimental methods, and the relative error percentage of the finite element method

جدول ۳- مقادیر انرژی جذب شده نمونه به دو روش المان محدود و تجربی و درصد خطای نسبی روش المان محدود

المان محدود (J)	تجربی (J)	درصد خطای نسبی المان محدود
۴۹۵۹/۶۷	۴۵۸۰/۱۲	۸/۲۷

باتوجه به نتایج به دست آمده از آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی و صحت سنجی نتایج، جهت بررسی پارامترهای موثر بر فروریزش ضربه‌گیر مکعبی آلومینیومی مدرج تابعی و پیش‌بینی رفتار جاذب با شکل‌های هندسی متفاوت در این پژوهش از روش طراحی آزمایش استفاده شده است. برای این منظور ابتدا باید متغیرهای موثر بر متغیر پاسخ و بازه تغییرات هر کدام مشخص شود. بر اساس بررسی‌های انجام گرفته متغیرهای جنس، ابعاد ضربه‌گیر، قطر سوراخ‌ها و نحوه چینش سوراخ‌ها بر روی نتایج تاثیر بسزایی دارند و با توجه به ثابت بودن جنس و ابعاد کلی ضربه‌گیر، می‌بایست متغیرهای قطر و نحوه چینش را جهت یافتن مدل‌های متفاوت مورد بررسی قرار داد. برای این کار ابتدا دو متغیر d_0 و k تعریف شد که d_0 قطر سوراخ‌های

ردیف اول و k نسبت تغییر سوراخ‌های ردیف بعدی نسبت به ردیف قبل می‌باشد. رابطه حاصله برای یافتن قطر سوراخ‌های هر سطح را می‌توان به صورت دنباله‌ای با رابطه (۳) تعریف نمود که d_n قطر سوراخ‌های ردیف n ام است.

$$d_n = k \times d_{n-1} \quad (3)$$

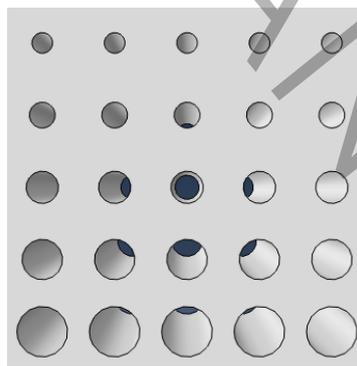
در صورتی که k بیشتر از یک باشد، قطر سوراخ‌ها در هر سطر بزرگتر می‌شود و اگر کوچکتر از یک در نظر گرفته شود، قطر سوراخ‌ها در سطرها بعدی به همین نسبت کوچکتر خواهد شد. در جدول ۴ سطوح تغییر متغیرهای طراحی هندسی جاذب بر مبنای روش فاکتوریل کامل ارائه شده است.

Table 4. Levels of change of the design variables of the absorber
جدول ۴ سطوح تغییر متغیرهای هندسی جاذب

k	d_0	متغیر
-	میلیمتر	واحد اندازه‌گیری
۰/۸	۳	سطوح متغیر
۰/۹	۵	
۱	۷	
۱/۱	۹	
۱/۲	-	

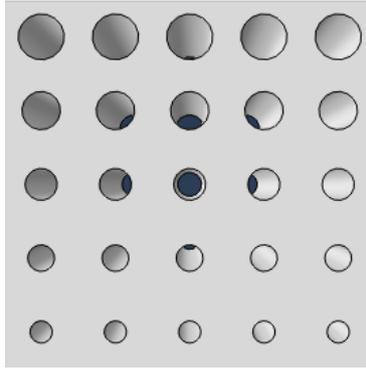
۵- بحث و بررسی نتایج

پس از مشخص شدن سطوح مختلف پارامترهای طراحی، مدل کردن و تحلیل تمام موارد جدول ۴ انجام شد و مقدار انرژی جذب شده جاذب در تمام نمونه‌ها به دست آمد. در شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ تعدادی از نمونه‌های تحلیل شده با k و d_0 مختلف نشان داده شده است.



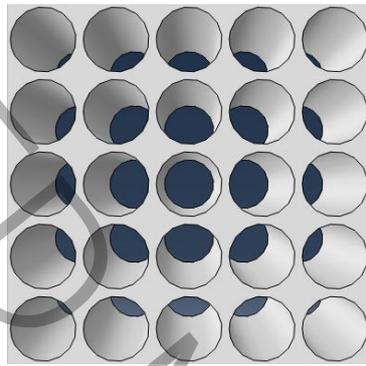
شکل ۹- مشخصات هندسی جاذب با $d_0=3$ و $k=1.2$

Figure 9 Geometric characteristics of the absorber with $d_0=3$ and $k=1.2$



شکل ۱۰- مشخصات هندسی جاذب با $d_0=7$ و $k=0.8$

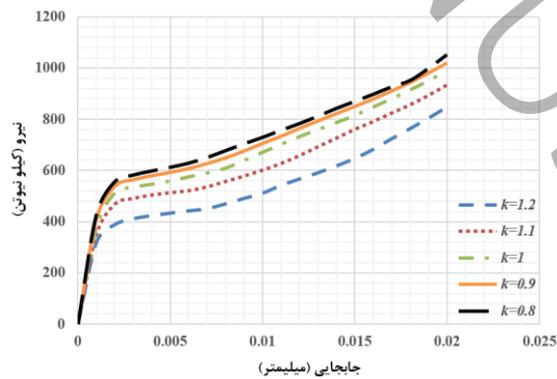
Figure 10 - Geometric characteristics of the absorber with $d_0=7$ and $k=0.8$



شکل ۱۱- مشخصات هندسی جاذب با $d_0=9$ و $k=1.0$

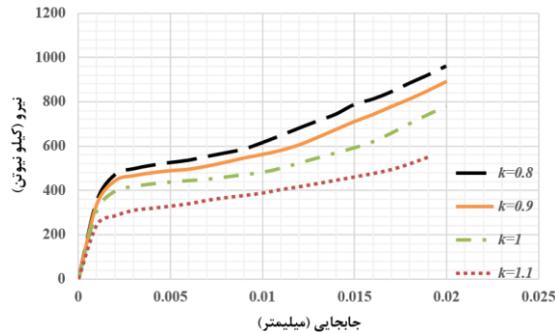
Figure 11 - Geometric characteristics of the absorber with $d_0=9$ and $k=1.0$

شکل‌های ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵ نمودار نیرو-جابجایی برای حالت‌های مختلف d_0 و k را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در نمودارها هم مشخص است، برای یک d_0 مشخص، با کاهش ضریب k ، سطح زیر منحنی که همان انرژی جذب شده است، افزایش می‌یابد. در این حالت سوراخ‌ها کوچکتر شده و وزن ماده افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر تخلخل نمونه کمتر شده و برای مچالگی آن به نیروی بیشتری نیاز است.



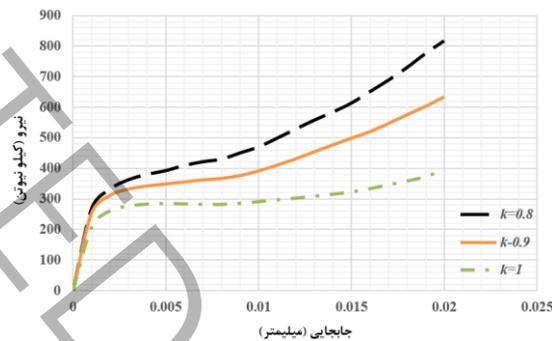
شکل ۱۲- نمودار نیرو-جابجایی با $d_0=3$ و ضرایب k

Figure 12- Force-displacement diagram with $d_0=3$ and coefficients k



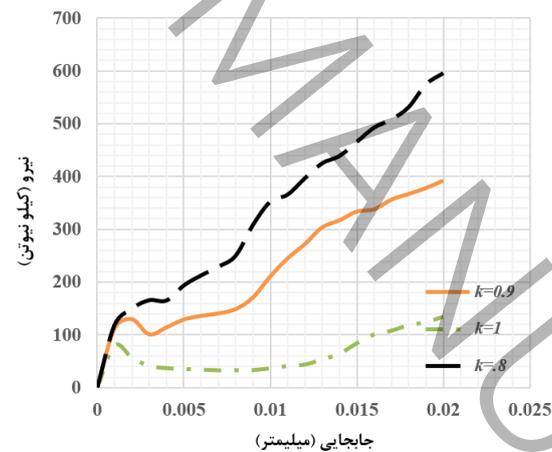
شکل ۱۳- نمودار نیرو-جابجایی با $d_0=5$ و ضرایب k

Figure 13- Force-displacement diagram with $d_0=5$ and coefficients k



شکل ۱۴- نمودار نیرو-جابجایی با $d_0=7$ و ضرایب k

Figure 14- Force-displacement diagram with $d_0=7$ and coefficients k



شکل ۱۵- نمودار نیرو-جابجایی با $d_0=9$ و ضرایب k

Figure 15- Force-displacement diagram with $d_0=9$ and coefficients k

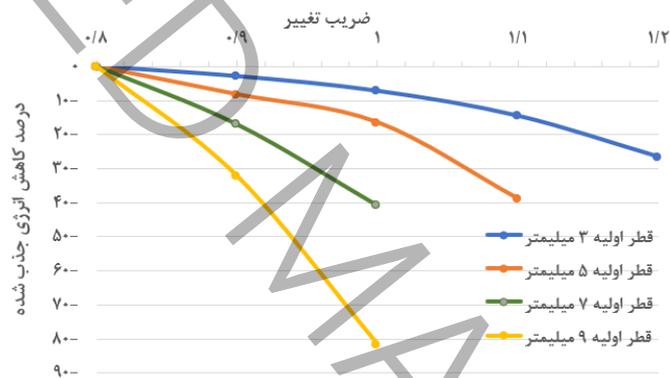
در جدول ۵ مقادیر انرژی جذب شده جاذب برای مدل‌های مختلف ارائه شده است. به دلیل محدودیت هندسی امکان طراحی و آزمایش بعضی از حالت‌های d_0 و k امکان‌پذیر نبود. به ازای یک d_0 خاص، با افزایش k به دلیل بزرگتر شدن قطر سوراخ‌ها و در نتیجه افزایش درصد تخلخل ضربه‌گیر و کاهش وزن، انرژی جذب شده کاهش می‌یابد. در حالتی که قطر سوراخ ابتدایی برابر با ۳ میلی‌متر است، کاهش انرژی در یک ردیف جدول ۵ و به ازای ضرایب تغییر مختلف، حدود ۲۶ درصد محاسبه شد. نکته حائز اهمیت این است که در این حالت مقدار نیروی اولیه فروریزش نیز حدود ۲۵ درصد کاهش پیدا کرده است. از طرفی دیگر به ازای یک ضریب تغییر k خاص، با افزایش قطر اولیه سوراخ، مقادیر انرژی جذب شده توسط جاذب کاهش یافته است. مقدار این کاهش در حالتی که ضریب تغییر k برابر با ۰/۸ است و قطر سوراخ ابتدایی از ۳ میلی‌متر به ۹ میلی‌متر افزایش یافته، مقدار انرژی جذب شده حدود ۵۴ درصد کاهش یافته است. در این حالت نیز باید توجه داشت که مقدار نیروی فروریزش اولیه در

حدود ۷۲ درصد کاهش را نشان می‌دهد. نکته حائز اهمیت این است که در هر دو حالت فوق نیروی مورد نیاز برای تغییر شکل جاذب و همچنین مقدار جرم جاذب کمتر شده است که این مطلوب است. با متخلخل کردن جاذب از این دو مورد می‌توان بهره برد و مصالحه‌ای بین نیروی اولیه فروریزش و مقدار انرژی جاذب و جرم آن برقرار نمود. در شکل ۱۶ درصد تغییر انرژی جذب شده برای یک قطر اولیه ثابت و به ازای مقادیر مختلف ضریب تغییر k رسم شده است. همان‌طور که از داده‌های جدول ۵ نیز مشخص بود میزان درصد کاهش انرژی جذب شده در هر حالت با افزایش قطر اولیه با آهنگ زیادی افزایش یافته است.

Table 5- Absorbed energy of different samples in Joules

جدول ۵- انرژی جذب شده توسط هر نمونه بر حسب ژول

ضریب تغییر	۰/۸	۰/۹	۱/۰	۱/۱	۱/۲
۳	۱۴۵۳۹/۶۸	۱۴۱۲۰/۸۲	۱۳۴۸۵/۵۲	۱۲۴۲۹/۳۳	۱۰۶۹۱/۶۹
۵	۱۲۷۳۷/۰۱	۱۱۶۸۷/۹۸	۱۰۶۴۶/۲۳	۷۷۹۸/۸۷	-
۷	۹۹۷۰/۵۳	۶۶,۸۲۷۸	۵۸۹۹/۳۹	-	-
۹	۶۶۳۸/۲۲	۴۵۰۰/۱۶	۱۲۱۷/۹۱	-	-



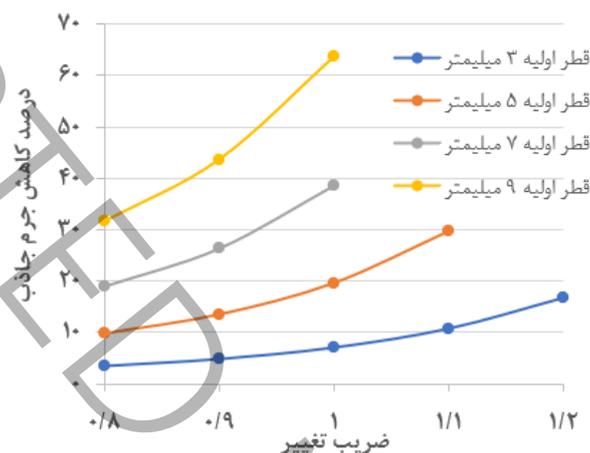
شکل ۱۶- درصد تغییر انرژی جذب شده به ازای مقادیر مختلف ضریب تغییر و در یک قطر اولیه ثابت

Figure 16 - Percentage change in absorbed energy for different values of the coefficient of variation and at a constant initial diameter

با توجه به توضیحات ارائه شده، در ادامه مقادیر انرژی ویژه جاذب (انرژی تقسیم بر سطح جاذب) برای هر نمونه محاسبه شد. لازم به ذکر است هدف به دست آوردن انرژی جذب شده به جرم است، اما به جهت کمتر شدن محاسبات، انرژی فقط تقسیم بر سطح جاذب شده است، زیرا مقادیر چگالی و ابعاد در تمام نمونه‌ها ثابت است. در جدول ۶ مقدار انرژی جذب شده هر نمونه آزمایشی بر سطح آن تقسیم شده است. در شکل ۱۷ درصد کاهش جرم جاذب به ازای مقادیر مختلف ضریب تغییر و در یک قطر اولیه ثابت ارائه شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، نمودار درصد کاهش جرم جاذب نسبت به انرژی جذب شده آن روندی معکوس دارد. بنابراین همان‌طور که پیشتر هم ذکر شد، با افزایش تخلخل هم انرژی جذب شده و هم جرم با یک رفتار تغییر می‌کنند و در عین حال نیروی فروریزش اولیه نیز کاهش پیدا کرده و از اعمال نیروی اینرسی بیش از حد به خودرو و سرنشینان در این حالت جلوگیری به عمل خواهد آمد.

Table 6 - Energy per unit area of different samples in j/mm^2
 جدول ۶- مقدار انرژی بر واحد سطح هر نمونه بر حسب ژول بر میلیمتر مربع

ضریب تغییر	۰/۸	۰/۹	۱/۰	۱/۱	۱/۲
۳	۶۰۳۳۰۶۲	۵۹۳۳۱۱۷	۵۸۱۲۷۲۴	۵۵۷۳۶۹۰	۵۱۴۰۲۳۵
۵	۵۶۳۵۸۴۵	۵۴۱۱۱۰۱	۵۰۴۷۸۷۵	۴۴۵۶۴۹۷	-
۷	۴۹۳۵۹۰۵	۴۴۹۹۲۷۱	۳۸۳۰۸۷۲	-	-
۹	۳۸۸۲۰۰۰	۳۱۹۱۶۰۲	۱۳۳۸۳۶۲	-	-



شکل ۱۷ - درصد کاهش جرم جاذب به ازای مقادیر مختلف ضریب تغییر و در یک قطر اولیه ثابت

Figure 17 – Percentage reduction in adsorbent mass for different values of the coefficient k and at a constant initial diameter

در این پژوهش برای بررسی تاثیر پارامترهای مستقل بر روی پارامترهای وابسته و پیش‌بینی رفتار جاذب از روش طراحی آزمایش بهره گرفته شد. معادله رگرسیون برای تابع انرژی ویژه سطح بر حسب ژول بر مترمربع (E_A) بر اساس پارامترهای ورودی به صورت رابطه (۴) به دست آمد.

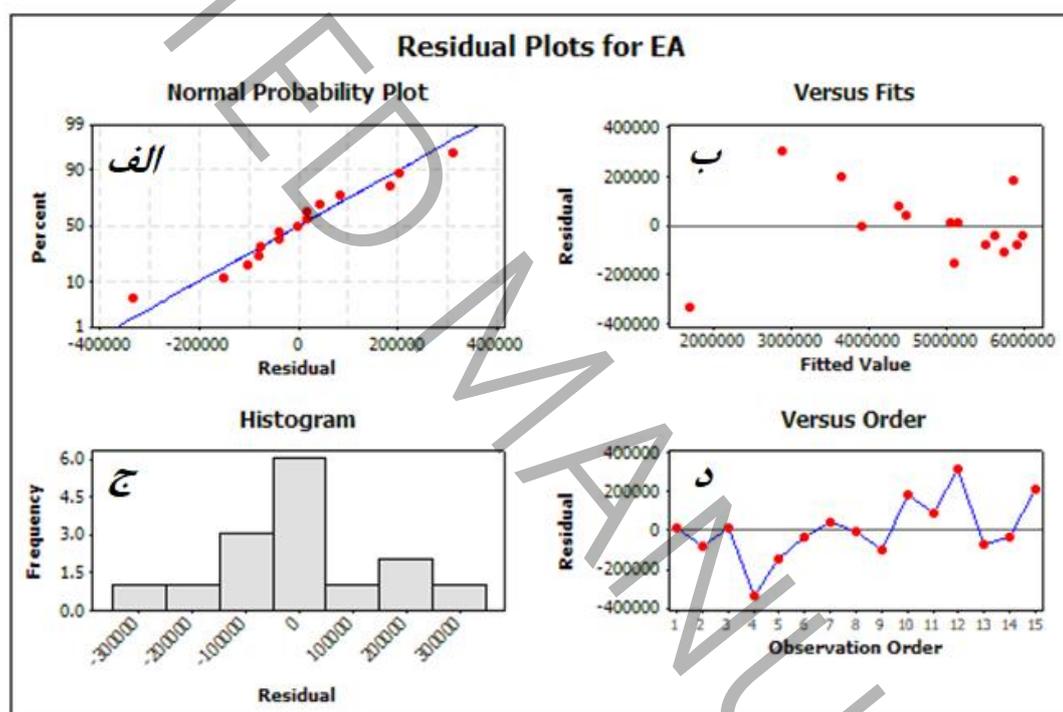
$$E_A = -7.85359 + 24.1969k + 1.99775d_0 - 10.1795 k^2 - 1.88214kd_0 - 0.0682779d_0^2 \quad (4)$$

در جدول ۷ نحوه آنالیز واریانس داده‌ها ارائه شده که نشان دهنده میزان اثرگذاری متغیرها بر تابع E_A است. بر این اساس تاثیر یک متغیر در پاسخ خروجی زمانی معنادار است که مقدار P -Value در نمودار کمتر از ۰/۰۵ باشد. شکل ۱۸ نمودارهای چهارگانه مربوط به نمودارهای باقی مانده مربوط به پارامتر خروجی E_A را نشان می‌دهد. شکل ۱۸ الف نمودار احتمال نرمال است. این نمودار، توزیع نرمال باقیمانده‌ها برای پارامتر خروجی در فرآیند را نشان می‌دهد. در نمودار شکل ۱۸ ب پراکندگی باقیمانده‌ها ارائه شده که در آن برابری و همگنی واریانس داده‌ها در این نمودار مشخص می‌شود. نداشتن الگوی مشخص و شکل معین برای متغیر خروجی، همگنی و برابری واریانس داده‌ها را اثبات می‌کند. شکل ۱۸ ج نشان‌دهنده نمودار هیستوگرام می‌باشد. با توجه به این نمودار و شکل تقریباً زنگوله‌ای آن، می‌توان گفت باقیمانده‌ها دارای توزیع نرمال می‌باشند. شکل ۱۸ د نمودار پراکندگی باقیمانده‌ها نسبت به بازه زمانی است. عدم وجود آرایش منظم در این نمودار پراکندگی و منحصر به فرد بودن باقیمانده‌ها در بازه زمانی را نشان می‌دهد.

Table 7 - Analysis of variance data for the E_A

جدول ۷- آنالیز واریانس داده‌ها برای تابع E_A

P	F	Adj SS	Adj MS	Seq SS	DF	
0.0000001	114/645	2/18.54 × 10 ¹³	4/361.08 × 10 ¹³	2/18.54 × 10 ¹³	5	رگرسیون
0.0001370	39/994	1/52139 × 10 ¹³	1/52139 × 10 ¹³	1/57384 × 10 ¹³	1	d
0.277124	6/876	2/61553 × 10 ¹¹	2/61553 × 10 ¹¹	3/52854 × 10 ¹³	1	k
0.439202	5/482	2/08539 × 10 ¹¹	2/08539 × 10 ¹¹	9/29945 × 10 ¹⁰	1	$k \times k$
0.0000798	46/122	1/75450 × 10 ¹³	1/75450 × 10 ¹³	1/40967 × 10 ¹³	1	$k \times d$
0.0005505	27/229	1/03580 × 10 ¹³	1/03580 × 10 ¹³	1/03580 × 10 ¹³	1	$d \times d$
		3/4236 × 10 ¹¹	3/8040 × 10 ¹⁰	3/4236 × 10 ¹¹	9	خطا
				2/21477 × 10 ¹³	14	جمع‌بندی



شکل ۱۸- نمودارهای چهارگانه مربوط به تابع E_A

Figure 18- Residual plots for E_A

۶- نتیجه‌گیری

این پژوهش به بررسی رفتار جاذب‌های با هندسه‌ی مدرج تابعی و تحلیل پارامترهای مؤثر بر جذب انرژی در ضربه‌گیرهای ساخته‌شده از آلیاژ آلومینیوم پرداخت. در گام نخست، صحت مدل‌سازی عددی با روش المان محدود از طریق مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی تأیید گردید. در مرحله بعد، با به‌کارگیری روش طراحی آزمایش و استفاده از طرح فاکتوریل کامل، سطوح متغیرهای طراحی تعیین شد. سپس تمام حالات ممکن با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود تحلیل گردید و تأثیر دو پارامتر کلیدی، یعنی الگوی چینش سوراخ‌ها و تغییر اندازه‌ی قطر آن‌ها، مورد ارزیابی قرار گرفت. یافته‌ها نشان می‌دهد که افزایش ضریب تغییر (k) که منجر به بزرگ‌تر شدن قطر سوراخ‌ها، افزایش درصد تخلخل و کاهش وزن می‌شود، باعث کاهش انرژی جذب‌شده می‌گردد. همچنین، افزایش قطر اولیه‌ی سوراخ‌ها نیز اثر کاهنده‌ای بر میزان جذب انرژی دارد. بر پایه‌ی نتایج،

تأثیر قطر اولیه بر جذب انرژی در مقایسه با ضریب تغییر پرننگ تر است. از سوی دیگر، افزایش هر دو پارامتر مذکور، منجر به کاهش چشمگیر نیروی فروریزش اولیه می‌شود. این مشاهدات نشان می‌دهد که می‌توان با بهینه‌سازی این متغیرها، ضربه‌گیری با وزن کمتر و کارایی جذب انرژی بالاتر طراحی نمود. به عنوان مسیر پژوهشی آتی، پیشنهاد می‌گردد اثر همزمان این پارامترها با دیگر عوامل هندسی نظیر فاصله و آرایش سوراخ‌ها و نرخ کرنش و نیز استفاده از مدل‌های توسعه یافته‌تر المان محدود مورد مطالعه قرار گیرد. همچنین، اعتبارسنجی نتایج با آزمایش‌های تجربی به با هندسه‌های پیچیده‌تر می‌تواند گامی مؤثر در جهت توسعه‌ی کاربردی این نوع جاذب‌های انرژی باشد.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

d_0	قطر اولیه m
d_{max}	بیشترین طول فروریزش جاذب، m
E	جذب انرژی، J
E_A	مقدار انرژی ویژه سطح، J/m ²
F	نیروی لحظه‌ای فروریزش N
k	ضریب تغییر
m	جرم kg
SAE	انرژی جذب شده ویژه J/kg

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

- [1] J. Kadkhodapour, H. Montazerian, M. Samadi, Plastic deformation and compressive mechanical properties of hollow sphere aluminum foams produced by space holder technique, *Materials and Design*, 83 (2015): 352-362.
- [2] N. Biswas, J.L Ding, Numerical study of the deformation and fracture behavior of porous Ti6Al4V alloy under static and dynamic loading, *International Journal of Impact Energy*, 82 (2015): 89- 102.
- [3] A. Vafaei, An investigation on the energy absorbed with the Aluminum porous structure made by cylindrical profiles, M.Sc. Thesis, Sahand University of Technology, 2020 (in Persian).
- [4] C. Graciano, G. Martínez, A. Gutiérrez, Failure mechanism of expanded metal tubes under axial crushing, *Thin-Walled Structures*, 51(2012): 20–24.
- [5] H. Wang, F. Yu, S. Mingming, H. Hai, Effect of structure design on compressive properties and energy absorption behavior of ordered porous aluminum prepared by rapid casting, *Materials and Design*, 167 (2019): 107631.
- [6] M. Mahbod, M. Asgari, C. Mittelstedt, Architected functionally graded porous lattice structures for optimized elastic-plastic behavior, *Journal of Materials: Design and Applications*, 234(8) (2020) 1099-1116.
- [7] A.M. Zanganeh, S.G. Khiavi, B. Mohammad Sadeghi, M. Divandari, Numerical study of the effect of geometric parameters on compressive mechanical properties of metallic lattice cylinders, *Journal of Mechanical Engineering Science*, 236(10) (2021) 5484-5494.
- [8] P. Moreira, J. Mendonça, and N. Peixinho, Numerical simulation of impact loading on open-cell aluminum foams, in *New Trends in Mechanism and Machine Science*, Springer, pp. 949-956. 2015.
- [9] M. Hosseini Vajari, S. Dariushi, M. Behzadnasab, An experimental investigation on mechanical properties of 3D-printed bio-inspired sandwich panels based on silk cocoon geometry, 8(4) (2021) 19- 26 (in Persian).
- [10] J. Song, M. Wang, D. Li, J. Zhang, Deformation and Energy Absorption Performance of Functionally Graded TPMS Structures Fabricated by Selective Laser Melting, *Applied Science*, 14(5) 2024, 2064.
- [11] A. Behravan, S. Seyedkashi, M. Sheikhi Azqandi, Optimum design and construction of cylindrical energy absorber under internal pressure using time evolutionary optimization algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, 23(1) (2022) 45-55 (in Persian).
- [12] S. Azarakhsh, A. Ghamarian, M. J. Rezvani, Investigation of different geometric parameters effect on axial crushing of thin-walled conical tubes, *Journal of Mechanical Engineering*, 52(2) (2023) 203-212 (in Persian).
- [13] A. Mohammadi, M. Sheikhi Azqandi, S. Rahnama, Designing of conical energy absorber with internal pressure by enhanced vibrating particle system algorithm, *Iranian Journal of Materials Forming*, 12(2) (2025) 29-41.
- [14] N. Vahdat Azad, Go. Liaghat, A. Vahdatazad, A. Negahbanborun, M. Dehghani Mohammadabadi, Energy absorption investigation of cylindrical tube filled by functionally graded foam in quasi static test, *Journal of Aeronautical Engineering*, 21(1) (2019) 1-10 (in Persian).
- [15] S. Pirmohammad, S. Esmaili-Marzdashti, Multi-objective crashworthiness optimization of square and octagonal bitubal structures including different hole shapes, *Thin Walled Structures*, 139 (2019) 126-138.
- [16] S. Chahardoli, M. Karimi, H. Hadian, Experimental and Numerical investigation of the Hole Effect on Collapse Properties of End-capped Conical Tubes under Axial Quasi-static Loading, *Journal of Mechanical Engineering*, 48(3) (2018) 57-67 (in Persian).
- [17] S. Feli, M. H. Kiani, S. S. Jafari, Investigation of the performance of multi-cellular energy absorbers with functionally graded thickness under impact loading, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 56(10) (2025) 1451-1472 (in Persian).
- [18] M. Choubini, G.H. Liaghat, M. Pol, Investigation of energy absorption and deformation of thin walled tubes with circle and square section geometries under transverse impact loading, *Modares Mechanical Engineering*, 15(1) (2015) 75-84 (in Persian).
- [19] M. Elyasi, M. Rooholamini Ahangar, V. Modanloo, Improving energy absorption of AA6061 holed thin-walled cylindrical tubes, *Modares Mechanical Engineering*, 23(11) (2023) 587-595 (in Persian).

- [20] A. Coluccia, G. Meyer, S. Liseni, Ch. Mittelstedt, G. De Pasquale, Functionally graded lattice structures for energy absorption: Numerical analysis and experimental validation, *Composite Structures*, 360, (2025) 119013.
- [21] M. Sheikhi Azqandi, M. Hassanzadeh, First-and second-order sensitivity analysis of finite element models using extended complex variables method. *Archive of Applied Mechanics*, 91 (2021): 4263-4277, 2021.
- [22] H. Wang, Y. Fu, M. M. Su, and H. Hao, Fabrication and compression investigation of the ordered porous aluminum with cubic pores, *Materials Science Forum*, 93 (2018) 97-105.
- [23] J. Rouzegar, M. R. Keshavarz, H. Assae, Experimental Study of Energy Absorption of Square Column under Multi-Indentation Loading, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 51(1) (2018) 33-42 (in Persian).
- [24] DIN 50134:2008, Testing of metallic materials - Compression test of metallic cellular materials, Deutsches Institut für Normung, 2008.
- [25] H. Zhu, C. Qin, J. Q. Wang, F. J. Qi, Characterization and simulation of mechanical behavior of 6063 aluminum alloy thin-walled tubes. *Advanced Materials Research*, 197 (2011) 1500-1508.

Design of Cubic Energy Absorber with Functionally Graded Geometry for progressive-functional performance

Ali Hassanabadi¹, Mohsen Dadgar Aziz², Mojtaba Sheikhi Azqandi^{3*}

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

ABSTRACT

Nowadays, with the increasing number of vehicles and their high speeds, it is very important to protect passengers and goods inside them by designing energy absorbers with high reliability during accidents. Energy absorbers prevent major damage to the vehicle body by absorbing the kinetic energy through plastic deformation and crushing. Material and geometric shape are the most important factors in the performance of energy absorbers. In this study, the effect of smart functionally geometric designs of the porous cubic absorber has been investigated. The main criteria are the total and specific energy absorbed. At first, by comparing the results of the simulated model using the finite element method with experimental tests, the results are validated. Then, by applying the design of experiments method, the analysis of different geometric shapes on their behavior was performed. The results obtained show that the amount and shape of porosity have a significant effect on the overall performance of the total and specific energy, and initial collapse force. For example, in the case with an initial diameter of 3 mm and a change parameter of 1.2, functionally geometric can be reduced by 17, 26, and 25 percent mass, total energy, and initial collapse force, respectively. Therefore, the amount and functional shape of porosity have a significant effect on the overall performance of the adsorbent for low initial collapse force and high capacity of absorbent energy.

KEYWORDS

Energy Absorber, Finite Element Method, Functionally Graded Geometry, Full Factorial Method, Smart Geometry.

* Corresponding Authors: Email: MojtabaSheikhi@birjand.ac.ir