



Numerical and Experimental Investigation of The Destruction of Thin-Walled Multi-Cell Quadrangular Structures Made By 3D Printer Under Lateral Impact

Pooya Pirali ^{a*}, Mohsen Heydari Beni ^a, Behnam Hajimousaei ^a, Jafar Eskandari Jam ^a

^a Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

Original Article

Use your device to scan and read the article online



Citation: Pirali P, Heydari Beni M, Hajimousaei B, Eskandari Jam J. Numerical and Experimental Investigation of The Destruction of Thin-Walled Multi-Cell Quadrangular Structures Made By 3D Printer Under Lateral Impact. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2024;4(1):158-188.

 <https://10.61186/masm.4.1.158>

KEYWORDS

Hierarchical thin-walled structures,
ABS polymer,
3D printer,
Lateral impact,
Energy absorption.

ABSTRACT

Thin-walled structures due to their lightness, good energy absorption capacity and high energy to weight absorption ratio are one of the most efficient energy absorption systems in various industries such as automotive, to protect the lives of passenger and pedestrian. The purpose of this project is to investigate the response of hierarchical square thin-walled structures that made of ABS polymer and made by a 3D printer under lateral impact. At first, different models are presented in separate categories. Then, due to the hierarchically of the samples, in the simulations, the effect of parameters such as the shape of the houses, the number of houses, the thickness of the walls and etc. are examined and the best samples are made for experimental tests. Then, in order to validate the samples, after making them by a 3D printer, they were subjected to lateral impact by a drop-weight impact test machine and the obtained results were compared with the simulation results. The results showed that by increasing the number of houses in each sample (increased to 16) and reducing the wall thickness of the samples in order to keep the weight constant, the amount of energy absorption increased by 16%, the average crushing force by 35% and the efficiency of the crushing force by 47%. Found. Also, the amount of change in length and shrinkage of each sample decreases with the increase in the number of houses. The smaller the amount of shrinkage (length change) of the sample under impact, the greater the maximum crushing force and impact resistance of the sample. According to the results, the sample with 16 rectangular houses (IHR16) was the best energy absorber among the manufactured samples.

Extended Abstract

1. Introduction

Thin wall structures are one of the most efficient energy absorbing systems in various industries, such as automotive, railway and military, due to their lightness, suitable energy absorption capacity and high energy absorption to weight ratio, in order to protect the lives of passengers as well as pedestrians. Pedestrians are considered during accidents or protection of equipment and devices.

Zhang et al. [6] worked on the amount of energy absorption in linear and tubular structures under axial destruction. In this research, which deals with the simulation and experimental testing of parts with a special

* Corresponding author. Tel.: +982122945140

E-mail address: ppirali@mut.ac.ir

DOI: <https://10.61186/masm.4.1.158>.

Received: June 11, 2024; Received in revised form: June 16, 2024; Accepted: June 18, 2024

© Author



geometry, circular aluminum tubes are arranged next to each other in different states and are subjected to quasi-static load. In addition, the weight of all samples is considered the same for a better comparison.

Li et al. [7] worked on the energy absorption characteristics of series structures under axial and diagonal loads. In this research, the samples were made by aluminum round tubes. By using these pipes, the cross section of the structures has become triangular, square and hexagonal. Also, by using more pipes, the mentioned structures have been optimized.

Ngoc et al. [8] have worked on the energy absorption characteristics of square series structures under axial load. The design of these structures was inspired by the internal structure of bone and bamboo. In this research, first the samples were simulated by Abaqus software and then they were verified by theoretical method.

According to the conducted studies, in most of them, especially in thin-walled structures, the tests performed were quasi-static, and the response of energy absorbers to impact has been investigated less. Also, in the articles that have investigated the impact test, they have focused more on the axial impact mode. Also, the material of the examined samples was mainly made of metal, which cannot be used in all conditions due to the high weight and special physical conditions of metals. However, the case that is noteworthy in the above studies is the lack of examination of multicellular thin-walled structures with mesh and different geometries and made of polymer under lateral impact load. Therefore, in this study, this issue has been investigated.

2. Modeling and formulation

In this study, a total of eight thin-walled structures made of ABS and subjected to lateral impact have been investigated. ABS polymer has been used to make samples by 3D printer. Also, these parts were printed by Novin Negar Additive Manufacturing Company and by Kitek M1 machine. These samples were drawn under the ASTM D638 standard in SolidWorks software and then printed. The simulations of this project have been carried out by Abaqus software. After the end of the simulation, by doing independence from the mesh, the mesh with dimensions of 0.8 mm and type S4R was selected for different samples and the comparison of the results of the samples with each other has been discussed in terms of energy absorption characteristics. For the experimental test process, a weight drop test machine was used. In order to perform experimental tests, at first, the set of weights is set in such a way that their total weight is equal to 6.615 kg. Also, the striking surface is considered to be flat so that the force enters the upper surface of the parts in a wide and equal manner. Two samples were made from each of the samples and a total of 8 tests were performed. By this device, the command to drop the weight is sent and the weight collides with the samples. As a result, the amount of shrinkage due to plastic deformation and the performance of the samples against impact can be investigated. During the descent of the weight, the data of the acceleration of the weight was entered into the computer by the sensor and the acceleration-time graph of the weight was extracted.

3. Results

1HR16 sample has the highest amount of energy absorption in the equilibrium distance (at $x=3.15$ mm in numerical mode and at $x=2.88$ mm in experimental mode). Also, sample 1HQ6 has the lowest amount of absorbed energy in the equilibrium distance in numerical mode and sample 1HR12 has the lowest value in experimental mode. Considering that samples 1HQ6 and 1HQ8 have square houses and samples 1HR12 and 1HR16 also have rectangular houses, the amount of energy absorption in the equilibrium distance in the experimental state for sample 1HQ8 is 5% more than the sample is 1HQ6 and the sample 1HR16 absorbs 33% more energy than the sample 1HR12. In numerical mode, samples 1HQ8 and 1HR16 have more energy absorption.

Samples 1HR12 and 1HR16 are actually the same as samples 1HQ6 and 1HQ8, respectively, inside each of their square-shaped houses, a horizontal reinforcement was created and turned them into houses. It is rectangular. So, you can compare these samples two by two. It can be seen here that the amount of energy absorption in the experimental mode for the 1HR16 sample is 25% more than the 1HQ8 sample, and in the numerical mode, the 1HR16 sample absorbs more energy. Also, the amount of energy absorption in experimental mode for sample 1HR12 is 2% less than that of sample 1HQ6, but in numerical mode, the amount of energy absorption of sample 1HR12 is higher than sample 1HQ6, and this difference can be due to the presence of physical defects in the manufactured parts. Figure 1 shows the equilibrium energy diagram of all 4 samples in experimental and numerical mode.

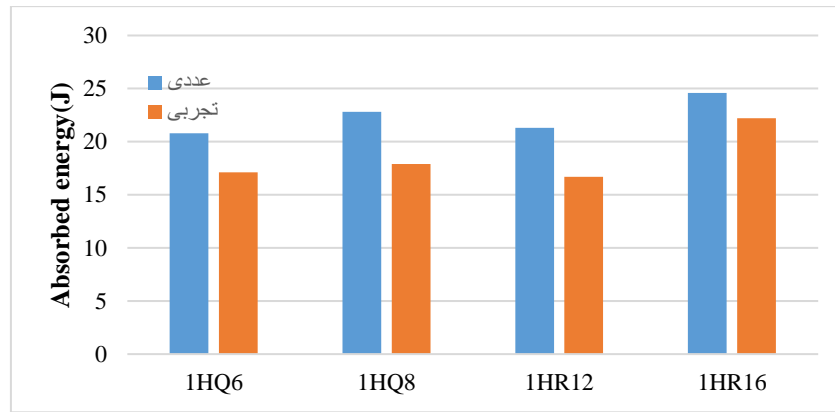


Figure 1. Equilibrium energy diagram of samples in numerical and experimental mode.

In both numerical and experimental mode, sample 1HR16 has the highest value and sample 1HQ6 has the lowest average value of crushing force. In the comparison of rectangular house samples with square house samples, the average crushing force in the experimental state for sample 1HR12 is about 6.5% more than sample 1HQ6 and for sample 1HR16, it is 30% more than sample 1HQ8. Figure 2 also shows the graph of the average crushing force of all 4 samples in numerical and experimental mode.

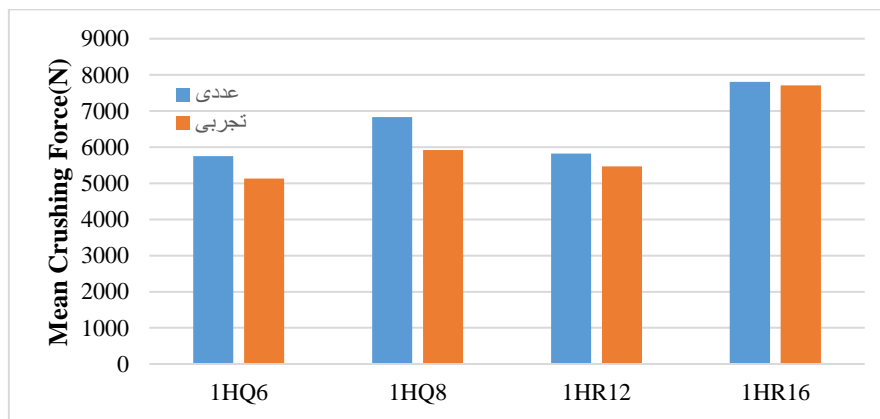


Figure 2. The average crushing force of samples in numerical and experimental mode.

In the experimental and numerical mode, it is related to the 1HQ6 sample and the highest rate of efficiency is also specific to the 1HR16 sample. Also, among the 1HR12 and 1HR16 samples, the 1HR16 sample has a much higher efficiency, which shows that this type of energy absorber is better than the rest is Figure 3 shows the compression force efficiency diagram for all 4 samples.

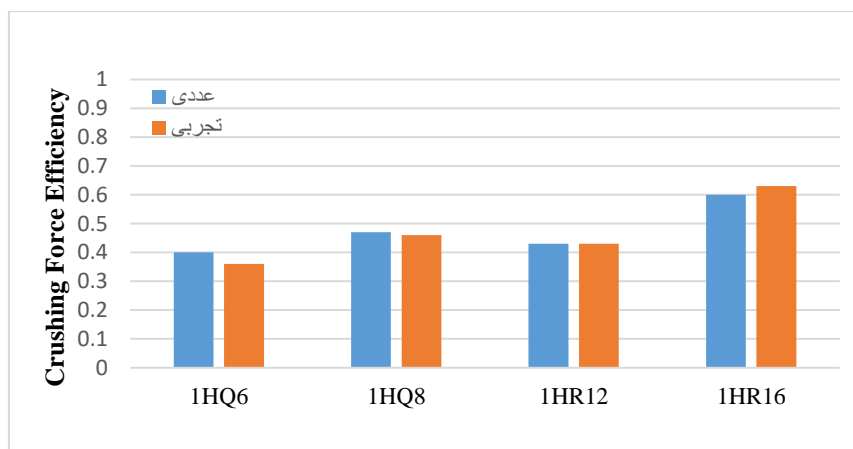


Figure 3. The efficiency diagram of the crushing force of the samples in numerical and experimental mode.

In order to make a better comparison between these 8 samples, it should be noted that the amount of length change in the amount of absorbed energy is an effective factor, so this parameter should be compared in equilibrium conditions for all 8 existing samples. In order to do this, considering the minimum amount of length change that belongs to the 1HR16 sample, the amount of length change in which the absorbed energy is measured is considered equal to 3.15 mm.

In these simulations, an impact with an energy of 25 joules has been applied and the amount of total absorbed energy in all structures is more than 95% of the applied energy. Also, according to the values of absorption energy at a distance of $x=3.15$ mm, which is in equilibrium conditions for all 8 samples, it can be seen that sample 1HR16 is the best sample in terms of energy absorption. Sample 1HR16 has the highest value and sample 2H2Q8 has the lowest average crushing force. The amount of crushing efficiency for an ideal energy absorber is 1 (100%), but achieving this number is very difficult. As a result, according to the results, sample 1HR16 has the best efficiency of crushing force among all samples. According to the numerical and experimental results and their interpretation, it is clear that the sample 1HR16 is the best sample to be used as an energy absorber. It was also observed that with the increase in the number of houses in each row, the energy absorption properties and parameters improve, and in general, the rectangular house samples are better energy absorbers than the similar square house samples.

4. conclusion

The purpose of this study was to investigate numerically and experimentally the destruction of thin-walled multi-cell quadrangular structures made by 3D printers due to lateral impact. Below is a summary of the results of numerical simulations and experimental tests.

- In general, and according to the results of simulations and experimental tests, by increasing the number of houses in each sample and reducing the wall thickness of the samples in order to keep the weight, the amount of energy absorption, the average crushing force and the efficiency of crushing force increases. Also, the amount of change in length and shrinkage of each sample decreases with the increase in the number of houses.
- Considering that the rectangular house samples were created by adding a horizontal reinforcement to the square house samples, it can be seen that the amount of energy absorption in the equilibrium distance, the average crushing force and the energy efficiency the flattening of rectangular samples, like any square sample, has increased.
- By increasing the number of square houses from 6 to 8, the amount of energy absorption has increased by 5%, the average crushing force has increased by 15%, and the crushing force efficiency has increased by 30%.
- By increasing the number of rectangular houses from 12 to 16, the amount of energy absorption has increased by 16%, the average crushing force has increased by 35%, and the crushing force efficiency has increased by 47%.
- By converting a sample of 6 square houses to a sample of 12 rectangular houses, the average crushing force increases by about 7% and the efficiency of crushing force increases by 20%.
- By converting a sample of 8 square houses to a sample of 16 rectangular houses, the average crushing force increases by 30% and the crushing force efficiency increases by 37%.
- By adding inner layers to the samples, the values of energy absorption parameters decrease.
- The smaller the amount of shrinkage (change in length) of the sample under impact, the greater the maximum shrinkage force and resistance of the sample to impact. According to these points and results, it is obvious that sample 1HR16 is the best energy absorber among these samples.



بررسی عددی و تجربی تخریب سازه‌های چهارگوش چند سلولی جدار نازک ساخته شده توسط پرینتر سه بعدی در اثر ضربه جانبی

پویا پیرعلی^{الف*}، محسن حیدری بنی^ب، بهنام حاجی‌موسائی^ج، جعفر اسکندری جم^د

^{الف} استادیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران. ppirali@mut.ac.ir
^ب دانشجوی دکتری، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران. mohsenheydari1371@gmail.com
^ج کارشناسی ارشد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران. behnam@yahoo.com
^د استاد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران. eskandari@mut.ac.ir

چکیده	واژگان کلیدی
سازه‌های جدار نازک به خاطر سبکی، ظرفیت جذب انرژی مناسب و نسبت جذب انرژی به وزن بالا به عنوان یکی از کارآمدترین سیستم‌های جذب انرژی در صنایع مختلف از جمله خودروسازی به منظور حفظ جان سرنشین و عابر پیاده در هنگام تصادفات به حساب می‌آیند. هدف از مقاله پیش رو بررسی عددی و تجربی نحوه پاسخ سازه‌های چهارگوش جدار نازک چند سلولی از جنس پلیمر ABS که توسط پرینتر سه‌بعدی ساخته شده‌اند، نسبت به ضربه جانبی می‌باشد. در ابتدا نمونه‌های مختلف در دسته‌بندی‌های جداگانه تهیه و سپس به بررسی تاثیر پارامترهایی مانند شکل خانه‌ها، تعداد خانه‌ها، ضخامت دیواره‌ها و ... پرداخته شده و بهترین نمونه‌ها جهت انجام تست تجربی ساخته شد. در ادامه به منظور صحت‌سنجی نمونه‌های ساخته شده، نمونه‌ها توسط دستگاه تست سقوط وزنه تحت ضربه جانبی قرار گرفته و نتایج بدست آمده با نتایج شبیه‌سازی مورد مقایسه و بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد خانه‌های هر نمونه (افزایش به ۱۶ عدد) و کاهش ضخامت دیواره نمونه‌ها به منظور ثابت نگه داشتن وزن، میزان جذب انرژی ۱۶٪، میانگین نیروی لهیدگی ۳۵٪ و بازده نیروی لهیدگی ۴۷٪ افزایش یافت. همچنین میزان تغییر طول و لهیدگی هر نمونه با افزایش تعداد خانه‌ها کاهش می‌یابد. هر چه میزان لهیدگی (تغییر طول) نمونه تحت ضربه کمتر باشد، ماکزیمم نیروی لهیدگی و مقاومت نمونه در برابر ضربه بیشتر است که با توجه به نتایج حاصل، نمونه دارای ۱۶ خانه مستطیلی (IHR16) بهترین جاذب انرژی در بین نمونه‌های ساخته شده بود.	سازه‌های جدار نازک چند سلولی، پلیمر ABS، پرینتر سه بعدی، ضربه جانبی، جذب انرژی. تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۹

۱- مقدمه

در اکثر طراحی‌های مهندسی، برای جلوگیری و یا کاهش خسارات ناشی از برخورد و همچنین حفاظت از جان انسان‌ها از سیستم‌های جاذب انرژی استفاده شده است. سازه‌های له‌شونده جاذب انرژی سازه‌هایی هستند که انرژی جنبشی حاصل از انفجار، برخورد و ... را به انرژی کرنشی پلاستیک و یا انرژی ای که صرف تغییر شکل پلاستیک و یا شکست می‌شود، تبدیل می‌کنند و مانع از انتقال مستقیم انرژی به سازه اصلی می‌گردند. در حقیقت این سازه‌ها سیستم‌های فداشونده‌ای هستند که با از بین بردن خود، سازه را از خطرات احتمالی حفظ می‌کند. امروزه در بسیاری از کاربری‌ها از جمله صنایع خودروسازی، کاربردهای

نظامی، نیروگاه‌ها، سازه‌های صنعت نفت، پتروشیمی و همچنین صنایع مهم و حساس از این سازه‌ها استفاده شده است. از رایج‌ترین انواع جاذب انرژی می‌توان به سازه‌های میان‌تهی (لوله‌ها) با مقاطع دایروی و مربعی، سازه‌های لانه زنبوری، سازه‌های جدارنازک، کامپوزیت‌ها و فوم‌های فلزی اشاره کرد که با توجه به نوع بارگذاری از هر یک از این سازه‌ها در شرایطی خاصی استفاده شده است [۱].

لوله‌ها و ستون‌های مربعی سال‌های زیادی است که به عنوان وسایل جاذب انرژی در صنعت خودرو، قطار، کشتی و هواپیما مورد مطالعه قرار می‌گیرند. طیف گسترده‌ای از سازوکار تغییر شکل در جاذب‌های ستون مربعی و لوله‌ای وجود دارند که شامل چین‌خوردگی محوری، پهن شدن جانبی، شکاف، وارونگی، خمش و انبساط است. اما از میان همه این سازوکارها، مکانیزم فروریزش محوری که منجر به ایجاد چین‌خوردگی‌هایی در طول جاذب می‌شود، از نظر جذب انرژی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۲].

سازه‌های لانه زنبوری از جمله‌ی اولین جاذب‌های انرژی مورد استفاده در صنایع خودروسازی، هوا فضا و بسته‌بندی می‌باشند. یکی از مهم‌ترین مزایای این سازه‌ها این است که با تغییر پارامترهای هندسی سازه از قبیل ارتفاع، ضخامت، اندازه سلول و زاویه داخلی آن می‌توان به خواص مکانیکی متفاوتی دست پیدا نمود [۳].

استفاده از مواد کامپوزیتی در حوزه‌های گوناگون صنعتی از جمله صنایع هوافضا (شامل بال، بدنه و پروانه موتور هواپیما)، خودروسازی (شامل بدنه و سپرها)، دریایی (شامل قایق‌ها و تجهیزات فراساحلی) و تجهیزات ورزشی (شامل دوچرخه، راکت تنیس، تخته اسکی) افزایش چشمگیری داشته است. کامپوزیت‌ها به دلایل مختلف، جایگزین مناسبی برای قطعات فلزی محسوب می‌شوند که برجسته‌ترین آن‌ها، نسبت استحکام و سفتی به وزن بالاست. علاوه بر خواص مکانیکی قابل توجه، انعطاف زیاد در طراحی از دیگر مزیت‌های کامپوزیت‌هاست که با استفاده از این مواد، هر سازه‌ای را می‌توان متناسب با کاربرد آن با دقت بالا طراحی، چینش و بهینه‌سازی کرد [۴].

با گسترش ساخت فوم‌های فلزی، میزان کاربرد آنها در صنایع مختلف نیز در حال افزایش است. همچنین به دلیل خاصیت جذب انرژی فوم‌های فلزی، ساخت سازه‌های مختلف مانند انواع سپرهای محافظ، ستون‌ها و پنل‌های ساندویچی و ... با هدف استهلاک و جذب بارهای ضربه‌ای گسترش پیدا کرده‌اند. در صنعت خودروسازی جهت استفاده در سپر خودروها به منظور جذب انرژی ناشی از ضربه در تصادفات از فوم‌های آلومینیومی استفاده می‌شود. در صنایع هوافضا به منظور کاهش هزینه‌های ساخت هواپیماها، از فوم آلومینیومی در بدنه آن‌ها به شکل پنل ساندویچی استفاده می‌شود. همچنین در صنایع تاسیساتی جهت انتقال کنترل شده سیالات، انتقال حرارت، استفاده جهت کاهش نویز و صدا و حتی ساخت الکتروود باتری‌ها و حتی فیلترها استفاده می‌گردد [۵].

همانطور که گفته شد در صنایع مختلف از جمله خودروسازی، ریلی و نظامی به منظور حفاظت از جان سرنشینان و همچنین عابران پیاده در هنگام تصادفات و یا حفاظت از وسایل و دستگاه‌ها در صنایع نظامی از جاذب‌های انرژی استفاده می‌شود. سازه‌های جدار نازک به خاطر سبکی، ظرفیت جذب انرژی بالا، طول لهیدگی مناسب و نسبت جذب انرژی به وزن بالا به عنوان یکی از کارآمدترین سیستم‌های جذب انرژی در صنایع مختلف به حساب می‌آیند. همچنین امروزه برای افزایش کارایی این نوع جاذب‌ها از هندسه‌های متفاوت و جنس‌ها مختلف استفاده می‌شود.

سال ۲۰۱۹ ژانگ و همکارانش بر روی میزان جذب انرژی در سازه‌های سلسله‌ای و لوله‌ای شکل تحت تخریب محوری کار کرده‌اند. در این تحقیق که به شبیه‌سازی و تست تجربی قطعات با هندسه خاصی پرداخته شده‌است، لوله‌های دایروی شکل آلومینیومی با حالت‌های متفاوتی در کنار یکدیگر چیده شده‌اند و تحت بار شبه‌استاتیکی قرار می‌گیرند. در ضمن وزن همه نمونه‌ها برای مقایسه بهتر، یکسان در نظر گرفته شده‌است [۶].

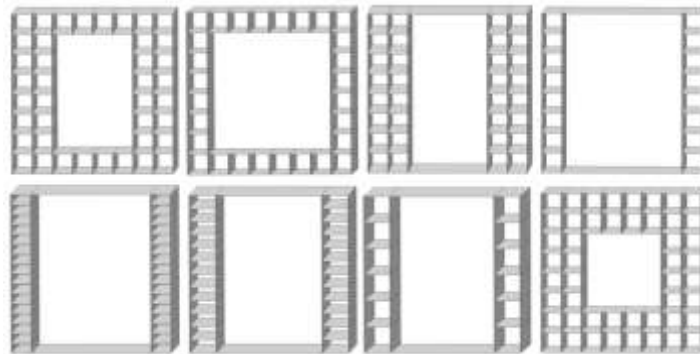
در سال ۲۰۲۱ لی و همکارانش بر روی خصوصیات جذب انرژی سازه‌های سلسله‌ای تحت بار محوری و مورب کار کرده‌اند. در این تحقیق نمونه‌ها توسط لوله‌های دایروی آلومینیومی ساخته شده‌اند. با استفاده از این لوله‌ها، سطح مقطع سازه‌ها به صورت

مثلثی، مربعی و شش ضلعی درآمده است. همچنین با استفاده از تعداد لوله‌های بیشتر، سازه‌های مذکور بهینه‌سازی شده‌اند [۷]. در سال ۲۰۲۱ نگوک و همکارانش بر روی خصوصیات جذب انرژی سازه‌های سلسله‌ای مربعی شکل تحت بار محوری کار کرده‌اند. برای طراحی این سازه‌ها از ساختار درونی استخوان و بامبو الهام گرفته شده است. در این تحقیق ابتدا نمونه‌ها توسط نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده و سپس به روش تئوری مورد صحت‌سنجی قرار گرفته‌اند [۸].

با توجه به مطالعات انجام گرفته، در اکثر آن‌ها به ویژه در سازه‌های جدارنازک تست‌های انجام گرفته به صورت شبه‌استاتیکی بوده و کمتر به بررسی پاسخ جاذب‌های انرژی نسبت به ضربه پرداخته شده است. همچنین در مقالاتی که به بررسی تست ضربه پرداخته‌اند، بیشتر بر روی حالت ضربه‌ی محوری متمرکز بوده‌اند. همچنین عمدتاً جنس نمونه‌های بررسی شده از فلز بوده که به دلیل وزن بالا و شرایط خاص فیزیکی فلزات، امکان استفاده از آن‌ها در همه شرایط وجود ندارد. اما موردی که با دقت در مطالعات بالا قابل توجه است، عدم بررسی سازه‌های جدارنازک چندسلولی با هندسه‌ای مشبک و متفاوت و از جنس پلیمر تحت بار ضربه جانبی می‌باشد. از این رو جاذب‌های انرژی مورد بررسی در این مطالعه نیز از دسته جاذب‌های انرژی جدار نازک با هندسه‌ای جدید و متفاوت می‌باشند.

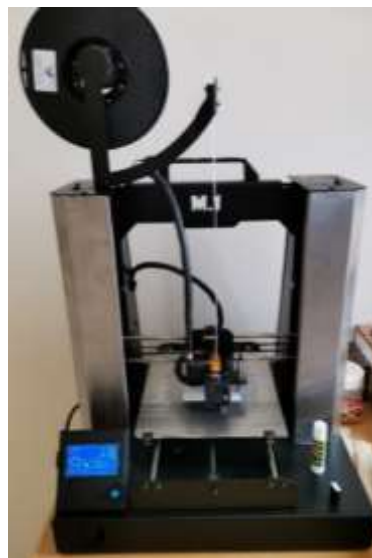
۲- مدل‌سازی و فرمول‌بندی

در این مطالعه، در مجموع به بررسی هشت عدد از سازه‌های جدار نازک که از جنس ABS هستند و تحت ضربه به صورت جانبی قرار گرفته‌اند، پرداخته شده است. در شکل ۱ شماتیک این نمونه‌ها به نمایش درآمده است.



شکل ۱ شماتیک نمونه‌های بررسی شده در آباکوس

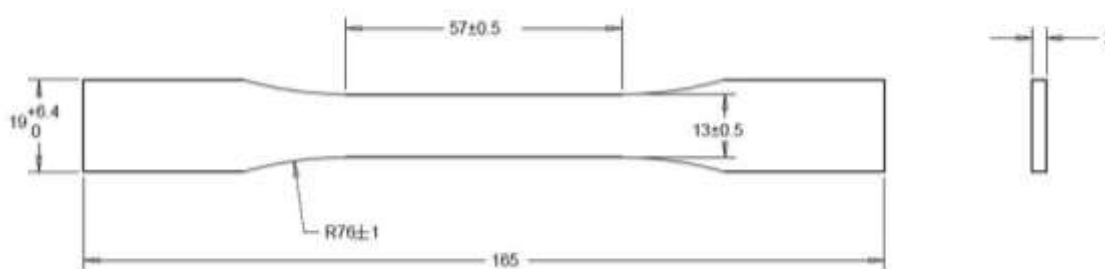
برای ساخت نمونه‌ها توسط پرینتر سه بعدی، از پلیمر ABS استفاده شده است. همچنین این قطعات توسط شرکت ساخت افزایشی نوین نگار و توسط دستگاه کیتک مدل M1 پرینت شده‌اند. شکل ۲ این دستگاه را در حین پرینت قطعات نشان می‌دهد.



شکل ۲ دستگاه پرینتر سه بعدی کیتک مدل M1

برای انجام پرینت قطعات، ضخامت هر لایه‌ای که توسط دستگاه، پرینت می‌شود برابر با ۲۵۰ میکرون در نظر گرفته شده است. این مقدار به گونه‌ای انتخاب شده است که هم چسبندگی بین لایه‌ها و در نتیجه استحکام قطعات در حداکثر میزان ممکن باشد و هم احتمال اعوجاج و ایجاد ترک درون قطعه به حداقل میزان ممکن کاهش پیدا کند. با توجه به این میزان از ضخامت لایه‌ها، برای پرینت کردن هر قطعه بیش از ۷/۵ ساعت زمان صرف شده‌است.

همچنین جهت اطمینان بیشتر از خواص پلیمر ABS مورد استفاده، تست کشش شبه استاتیکی در آزمایشگاه کامپوزیت دانشگاه صنعتی مالک اشتر بر روی نمونه‌های استاندارد انجام شده است. این نمونه‌ها تحت استاندارد ASTM D638 در نرم‌افزار سالیدورکس رسم شده و سپس پرینت شده‌اند. شکل ۳ ابعاد این نمونه‌های استاندارد را نمایش می‌دهد.



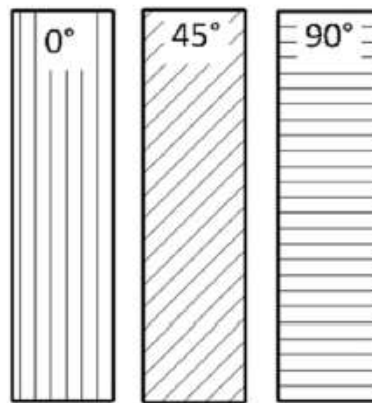
شکل ۳ ابعاد نمونه تست کشش تحت استاندارد ASTM D638 [۲].

شکل ۴ نیز دستگاه تست فشار و کشش شبه‌استاتیکی دانشگاه صنعتی مالک اشتر را نشان می‌دهد.



شکل ۴ دستگاه تست فشار و کشش شبه‌استاتیکی دانشگاه صنعتی مالک اشتر

برای دقت بیشتر در به دست آوردن خواص پلیمر ABS، نمونه‌های استاندارد در دو جهت ۹۰ درجه و ۰ درجه پرینت شده‌اند. این درجه‌ها در حقیقت راستای حرکت نازل پرینتر در حین پرینت را نشان می‌دهد. برای مثال در شکل ۵ شماتیک جهت‌های مختلف پرینت را نشان داده شده است.



شکل ۵ جهت‌های مختلف حرکت نازل پرینتر در هنگام پرینت [۹].

شکل ۶ نیز نمونه‌های استاندارد تست کشش را پس از انجام تست شبه استاتیکی با سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه و ایجاد شکست در آن‌ها نشان می‌دهد.



شکل ۶ نمونه‌های استاندارد ساخته شده و تست شده (الف) پرینت شده در جهت ۰ درجه (ب) پرینت شده در جهت ۹۰ درجه.

شبیه‌سازی‌های این پژوهش توسط نرم‌افزار آباکوس انجام گرفته است. پس از پایان شبیه‌سازی، با انجام استقلال از مش، مش با ابعاد ۰/۸ میلی‌متر و نوع S4R برای نمونه‌های مختلف انتخاب شده و به مقایسه نتایج نمونه‌ها با یکدیگر از لحاظ خصوصیت جذب انرژی پرداخته شده‌است.

جهت فرآیند تست تجربی، با هماهنگی با دانشگاه صنعتی امیرکبیر، از دستگاه تست سقوط وزنه این دانشگاه استفاده شده است. با توجه به اطلاعات موجود، این دستگاه قابلیت تنظیم ارتفاع پرتابه از ۲۰ سانتی‌متر تا ۱۵۰ سانتی‌متر را دارد. همچنین جرم ضربه‌زننده می‌تواند از ۲/۱ کیلوگرم تا ۱۵ کیلوگرم متغیر باشد. اما با توجه به نوع سنسور و تجربه مسئول آزمایشگاه، تست ضربه با انرژی بیشتر از ۴۰ ژول به دلیل ایجاد نویزهای بسیار زیاد در خروجی، امکان پذیر نبود. در شکل ۷ دستگاه سقوط وزنه نشان داده شده‌است.

در این دستگاه یک صفحه فلزی اصلی وجود دارد که توسط یک زنجیر به موتور الکتریکی متصل شده و در یک راهنمای عمودی قرار گرفته است که با این مکانیزم می‌توان ارتفاع ضربه‌زننده را تعیین کرد. همچنین بر روی این صفحه فلزی دو عدد قفل مکانیکی تعبیه شده تا ضربه‌زننده را نگه دارد و در زمان مورد نظر آن را رها کند. شکل ۸ صفحه‌ی فلزی اصلی، قفل‌های موجود بر روی آن و گایدهای عمودی را نشان می‌دهد.



شکل ۷ دستگاه سقوط وزنه دانشگاه صنعتی امیرکبیر



شکل ۸ نمایی از متعلقات دستگاه سقوط وزنه

ضربه‌زننده در این دستگاه متشکل از چند وزنه می‌باشد که به صفحه فلزی موجود در شکل ۸ وصل می‌شوند. در بالای این وزنه‌ها نیز سنسور شتاب‌سنج توسط یک پیچ قرار گرفته است. همه‌ی این متعلقات با هم وزن ضربه‌زننده را تعیین می‌کنند. در شکل ۹ همه‌ی اجزای ضربه‌زننده نشان داده شده است.



شکل ۹ اجزای مختلف ضربه‌زننده



برای تنظیم ارتفاع ضربه‌زننده و همچنین رهاسازی آن در زمان دلخواه، از دستگاه کنترلر موجود در شکل ۱۰ استفاده شده است. پس از رهاسازی ضربه‌زننده، شتاب لحظه‌ای آن در هنگام سقوط و همچنین برخورد با قطعه، توسط سنسور شتاب‌سنج اندازه‌گیری شده است و به کامپیوتر وارد می‌گردد تا بتوان نمودار شتاب-زمان ضربه‌زننده را استخراج کرد.



شکل ۱۰ کنترلر دستگاه سقوط وزنه

در ابتدا مجموعه وزنه‌ها به شکلی تنظیم شده است که وزن کلی آن‌ها برابر با ۶/۶۱۵ کیلوگرم باشد. همچنین سطح ضربه‌زننده به شکل تخت در نظر گرفته شده است تا نیرو به صورت گسترده و برابر، به سطح بالایی قطعات وارد شود. مجموعه‌ی وزنه‌ها و وزن هر کدام از آن‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱ مجموعه وزنه‌ها و وزن هر کدام از آن‌ها

				
۱۵۰ گرم	۱۱۴ گرم	۱۰۴۰ گرم	۳۰۶۱ گرم	۲۲۵۰ گرم

جاذب‌های انرژی که توسط پرینتر سه بعدی و طبق ابعاد جدول ۲ ساخته شده‌اند نیز در شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ به نمایش درآمده است. از هر یک از نمونه‌ها دو عدد ساخته شده و در مجموع ۸ تست انجام شده است ولی با توجه به شباهت هر دو نمونه با یکدیگر، فقط عکس یکی از نمونه‌ها ارائه شده است.



شکل ۱۱ نمونه ساخته شده با کد اختصاصی HQ61



شکل ۱۲ نمونه ساخته شده با کد اختصاصی HQ8۱



شکل ۱۳ نمونه ساخته شده با کد اختصاصی HR12۱



شکل ۱۴ نمونه ساخته شده با کد اختصاصی HR16۱

جهت ثابت نگه داشتن قطعات در هنگام تست ضربه، از فیکسچر استفاده شده است. شکل ۱۵ این فیکسچر را نمایش می‌دهد.



شکل ۱۵ فیکسچر ساخته شده

همانطور که در شکل ۱۵ مشخص است، جهت جلوگیری از حرکت نمونه در حین ضربه، ۴ تسمه با ضخامت ۰/۵ سانتیمتر روی فیکسچر جوش داده شده است تا نمونه به صورت قالبی سر جای خود مستقر شود. در ادامه پس از هم مرکز کردن فیکسچر با ضربه‌زننده، فیکسچر توسط گیره‌های دستی بر روی صفحه‌ی دستگاه تست قرار گرفته و محکم شده است. شکل ۱۶ گیره‌های دستی محکم‌کننده فیکسچر را نشان می‌دهد.



شکل ۱۶ فیکسچر و گیره‌های دستی محکم‌کننده آن

پس از محکم کردن فیکسچر، قطعات به گونه‌ای بر روی آن قرار گرفته‌اند تا ضربه به صورت جانبی به نمونه‌ها برخورد کند. شکل ۱۷ نحوه قرارگیری یکی از نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

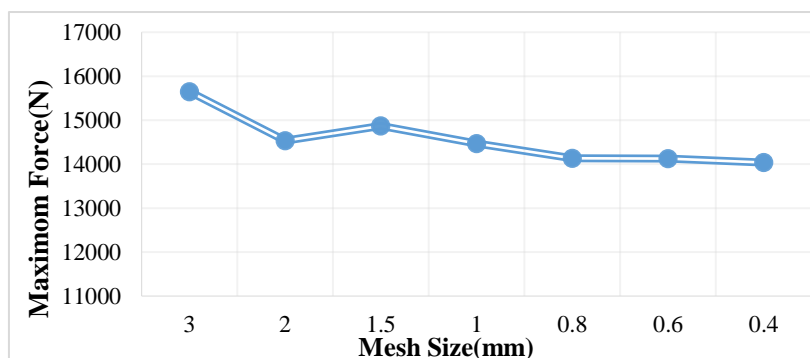
در ادامه جهت تنظیم ارتفاع ضربه‌زننده، از دستگاه موجود در شکل ۱۰ استفاده شده است. ارتفاع ضربه‌زننده به گونه‌ای تنظیم شده است که فاصله سطح بالایی قطعه تا وزنه برابر با ۳۸/۵ سانتی‌متر باشد. همچنین توسط همین دستگاه فرمان سقوط وزنه ارسال می‌شود و وزنه با نمونه‌ها برخورد می‌کند. در نتیجه میزان لهیدگی در اثر تغییر شکل پلاستیک و عملکرد نمونه‌ها در برابر ضربه قابل بررسی است. در حین فرود وزنه، داده‌های شتاب وزنه توسط سنسور به کامپیوتر وارد شده و نمودار شتاب-زمان وزنه استخراج شده است.



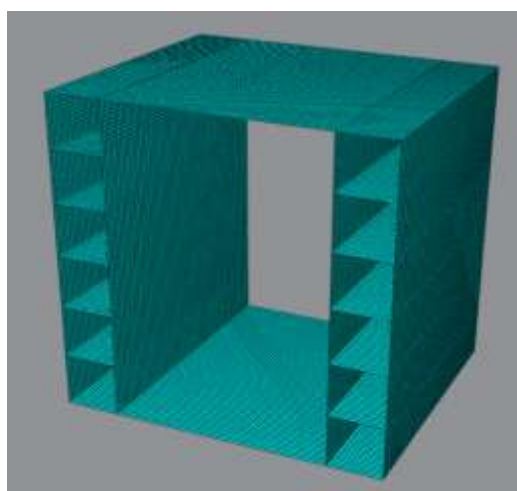
شکل ۱۷ نحوه قرارگیری یکی از نمونه‌ها برای انجام تست ضربه

۳- نتایج

جهت اطمینان از صحت نتایج شبیه‌سازی، بررسی استقلال از مش انجام گردیده است تا بهترین اندازه مش برای انجام شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گیرد. پس از انجام این بررسی مشخص شد که سایز مش $0/8$ میلی‌متر بهترین سایز برای شبیه‌سازی نمونه‌ها می‌باشد؛ زیرا در این سایز، همگرایی نتایج مربوط به ماکزیمم نیروی ضربه حاصل شده است. در شکل ۱۸ نمودار استقلال از مش نمونه 1HQ6 برای مثال ارائه شده است. همچنین شکل ۱۹ نیز مدل مش زده شده همین نمونه را در نرم‌افزار آباکوس را نشان می‌دهد.



شکل ۱۸ نمودار استقلال از مش نمونه 1HQ6



شکل ۱۹ مدل مش‌زنی شده نمونه 1HQ6

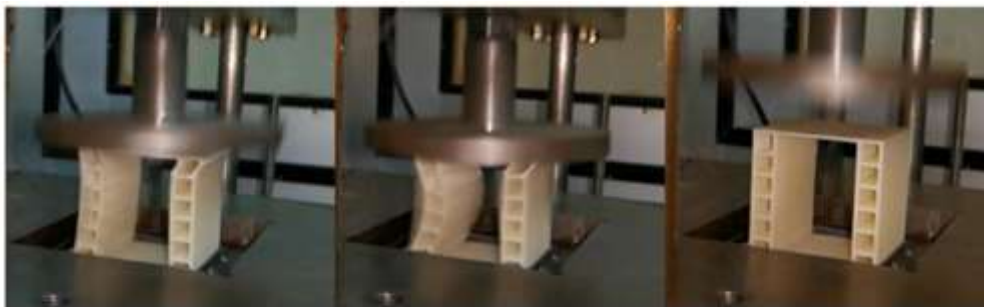
۳-۱- نتایج عددی و تجربی نمونه 1HQ6

پس از انجام تست ضربه از ارتفاع ۳۸/۵ سانتی متری توسط دستگاه تست سقوط وزنه، نمونه‌ها دچار تغییر شکل شده‌اند. شکل ۲۰ تغییر شکل نمونه‌های 1HQ6 نشان می‌دهد.

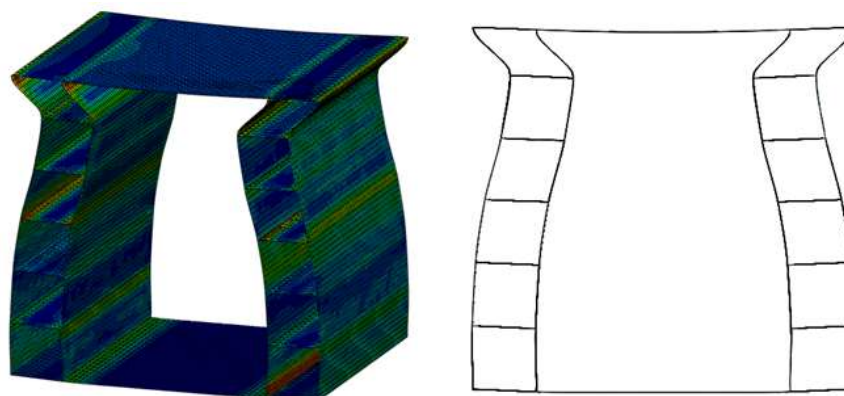


شکل ۲۰ نمونه‌های 1HQ6 پس از انجام تست ضربه و ایجاد تغییر شکل در آن‌ها.

با توجه به این موضوع که جنس نمونه‌ها از پلیمر ABS است، باعث می‌شود که قطعات دارای حالت ارتجاعی پس از ضربه باشند. به این صورت که در هنگام برخورد وزنه، نمونه‌ها دچار تغییر شکل شده ولی پس از اتمام برخورد، از میزان تغییر شکل آن‌ها کاسته می‌شود. این موضوع در شکل ۲۱ نشان داده شده است. شکل ۲۲ نیز نمونه 1HQ6 پس از تغییر شکل در نرم‌افزار آباکوس را نشان می‌دهد.



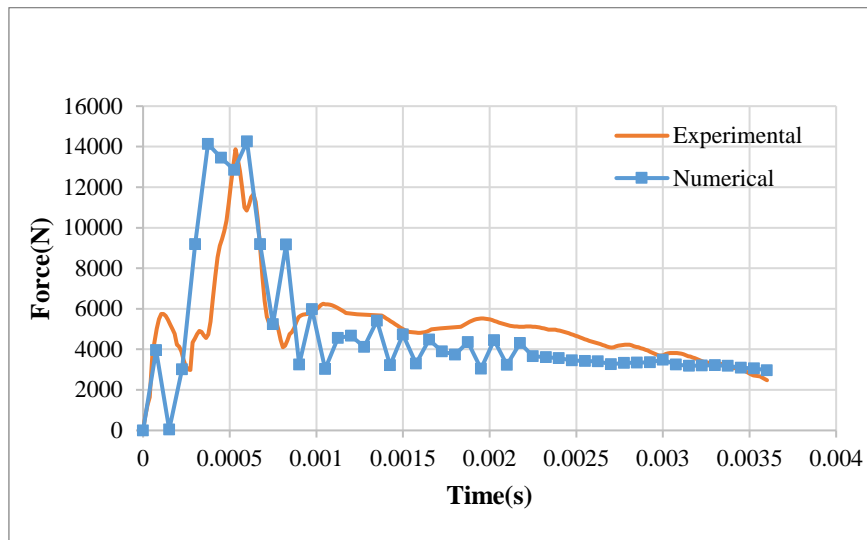
الف) قبل از برخورد ب) در هنگام برخورد ج) پس از برخورد
شکل ۲۱ نحوه تغییر شکل نمونه 1HQ6 تحت ضربه به صورت فریم به فریم



شکل ۲۲ تغییر شکل نمونه 1HQ6 در نرم‌افزار آباکوس

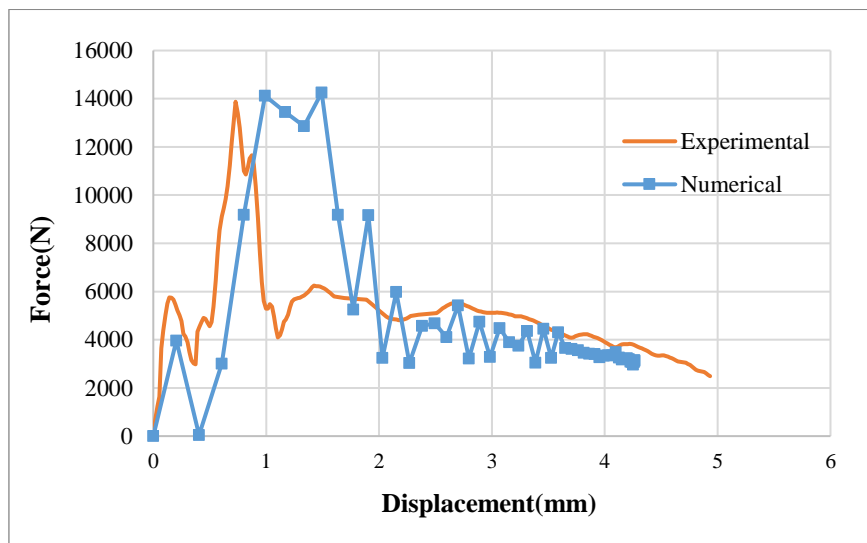
داده‌هایی که در حین انجام تست تجربی از دستگاه تست سقوط وزنه به عنوان خروجی دریافت شده است، داده‌های مربوط به نمودار شتاب زمان ضربه‌زنده است. اما داده‌های خروجی دارای نویز بسیار زیادی می‌باشند و برای استفاده از آن‌ها فرآیندهای فیلترسازی و نویزگیری بر روی آن‌ها انجام گرفته است. همچنین برای بدست آوردن نمودار نیرو زمان، جرم ضربه‌زنده در پارامتر

شتاب ضرب شده است. شکل ۲۳ نمودار نیرو - زمان را برای نمونه 1HQ6 در دو حالت تجربی و عددی نمایش می دهد.



شکل ۲۳ نمودار نیرو زمان نمونه 1HQ6 در حالت عددی و تجربی

با توجه به شکل ۲۳، مشاهده می شود که مقدار ماکزیمم نیرو در حالت تجربی تقریباً برابر با ۱۳۸۷۴ نیوتون و در حالت عددی برابر با ۱۴۲۵۵ نیوتون است. با توجه به این اعداد مشخص است که حالت عددی تنها دارای ۰.۳٪ خطا نسبت به حالت تجربی می باشد. همچنین برای به دست آوردن جابه جایی، از نرم افزار متلب کمک گرفته شده است تا نمودار شتاب زمان را به نمودار جابه جایی-زمان تبدیل کند. پس از بدست آمدن نمودار جابه جایی زمان، نمودار نیرو جابه جایی همانند شکل ۲۴ رسم شده است.



شکل ۲۴ نمودار نیرو جابه جایی نمونه 1HQ6 در حالت عددی و تجربی

همانگونه که در شکل ۲۴ مشخص است، میزان جابه جایی در حالت تجربی برابر با ۴/۹۳ میلی متر و در حالت شبیه سازی برابر با ۴/۲۶ میلی متر است. با توجه به جابه جایی به دست آمده از طریق حل عددی، مشخص می شود که این مقدار نسبت به مدل تجربی دارای ۱۳/۵٪ خطا می باشد.

۳-۲- تحلیل و مقایسه پارامترهای مختلف جذب انرژی برای نمونه 1HQ6

در این بخش به بررسی انرژی جذب شده، میانگین نیروی لهیدگی و بازده نیروی لهیدگی برای نمونه 1HQ6 پرداخته شده است. اما در ابتدا مفاهیم کلی و فرمول‌های پارامترهای مختلف جذب انرژی ارائه شده است.

الف) انرژی جذب شده بر اثر ضربه

مقدار انرژی جذب شده برابر با مساحت زیر نمودار نیرو جابه‌جایی است که طبق رابطه ۱ تعریف می‌شود که در آن P میزان نیرو و dx تغییرات طول می‌باشد.

$$E = \int P dx \quad (1)$$

برای انجام مقایسه بهتر بین نمونه‌ها، باید به این نکته توجه داشت که میزان تغییر طول در مقدار انرژی جذب شده، عاملی تاثیرگذار است لذا باید این پارامتر در شرایط تعادلی برای هر یک از نمونه‌های موجود مقایسه شود.

ب) میانگین نیروی لهیدگی

برای بدست آوردن میانگین نیروی لهیدگی^۱ (MCF) از رابطه ۲ استفاده شده است [۱۰].

$$P_m = \frac{1}{\delta_{max}} \int_0^{\delta_{max}} P dx \quad (2)$$

که در این رابطه P_m میانگین نیروی لهیدگی و δ_{max} ماکزیمم جابه‌جایی است. در حقیقت P_m نسبت انرژی جذب شده کل به ماکزیمم جابه‌جایی است.

ج) بازده نیروی لهیدگی

برای محاسبه بازده نیروی لهیدگی^۲ (CFE) از رابطه ۳ استفاده شده است [۱۱].

$$CFE = \frac{P_m}{P_f} \quad (3)$$

به بیان ساده‌تر بازده نیروی لهیدگی، نسبت میانگین نیروی لهیدگی به نیروی ماکزیمم^۳ (P_f) می‌باشد. میزان راندمان لهیدگی برای یک جذب انرژی ایده‌آل ۱ (۱۰۰٪) می‌باشد اما دستیابی به این عدد بسیار مشکل است.

با استفاده از روابط (۱) تا (۳)، انرژی جذب شده، میانگین نیروی لهیدگی و بازده نیروی لهیدگی برای نمونه 1HQ6 در دو حالت تجربی و عددی محاسبه شده و در جدول ۲ به نمایش درآمده است. همچنین میزان خطای حل عددی نسبت به داده‌های تجربی نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۲ مقایسه پارامترهای جذب انرژی برای نمونه 1HQ6 در دو حالت تجربی و عددی

	نمونه 1HQ6		درصد خطا
	تجربی	عددی	
انرژی جذب شده (ژول)	۲۵/۳	۲۴/۵	٪۳
میانگین نیروی لهیدگی (نیوتون)	۵۱۳۱/۸	۵۷۵۱/۱	٪۱۲
بازده نیروی لهیدگی	۰/۳۶	۰/۴۰	٪۱۱

با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌شود که با وجود انجام تست ضربه با انرژی ۲۵ ژول، میزان انرژی جذب شده در تست تجربی بیشتر از این مقدار می‌باشد که این حالت غیر ممکن است. علی‌رغم اینکه تست با دقت و حساسیت بسیار انجام شده است، اما

¹ Mean crushing force

² Crush force efficiency

³ Peak force(Pf)

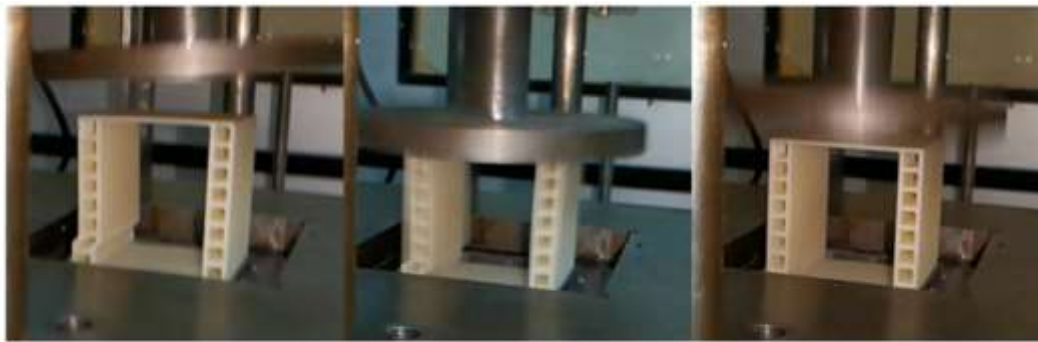
این خطا ممکن است به دلیل دقیق نبودن ارتفاع ضربه‌زننده، دقیق نبودن وزن‌های اعلام شده برای ضربه‌زننده از طرف مسئول آزمایشگاه و یا به دلیل نویزهای بسیار زیاد نمودار شتاب-زمان خروجی، باشد.

۳-۳- نتایج عددی و تجربی نمونه 1HQ8

شکل ۲۵ هر دو نمونه 1HQ8 را پس از انجام تست ضربه نمایش می‌دهد. در شکل ۲۶ نیز نحوه تغییر شکل نمونه 1HQ8 در سه حالت مختلف به صورت فریم به فریم نشان داده شده است.



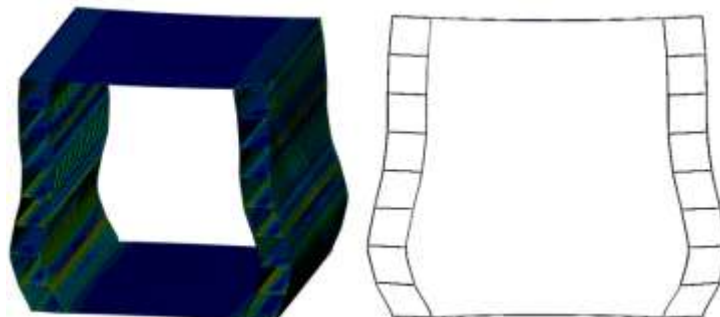
شکل ۲۵ نمونه‌های 1HQ8 پس از انجام تست ضربه و ایجاد تغییر شکل در آنها



الف) قبل از برخورد ب) در هنگام برخورد ج) پس از برخورد

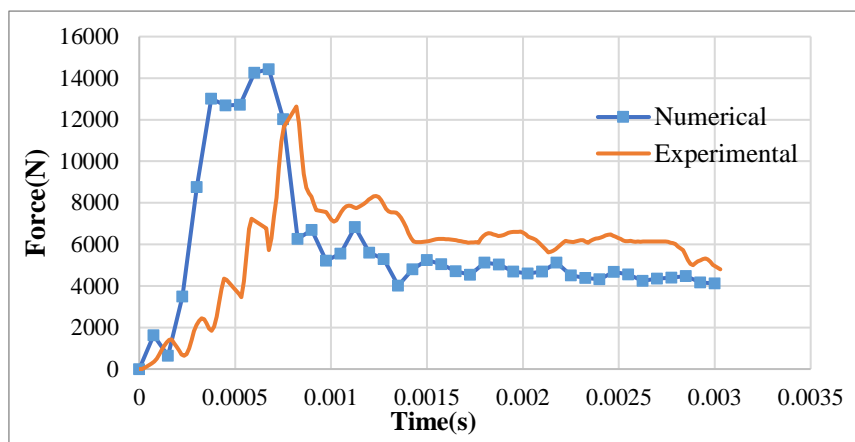
شکل ۲۶ نحوه تغییر شکل نمونه 1HQ8 تحت ضربه به صورت فریم به فریم

همانطور که در شکل ۲۶ نیز مشخص است، به دلیل وجود لقی بین ضربه‌زننده و گایدهای عمودی (شکل ۸)، ضربه‌زننده به صورت کاملاً عمود به قطعه برخورد نمی‌کند و به همین دلیل نوع تغییر شکل نمونه‌ها به حالت متقارن درنیامده است. در ادامه شکل ۲۷ نحوه تغییر شکل نمونه 1HQ8 در نرم‌افزار آباکوس را نشان می‌دهد که این تغییر شکل به صورت متقارن ایجاد شده است.



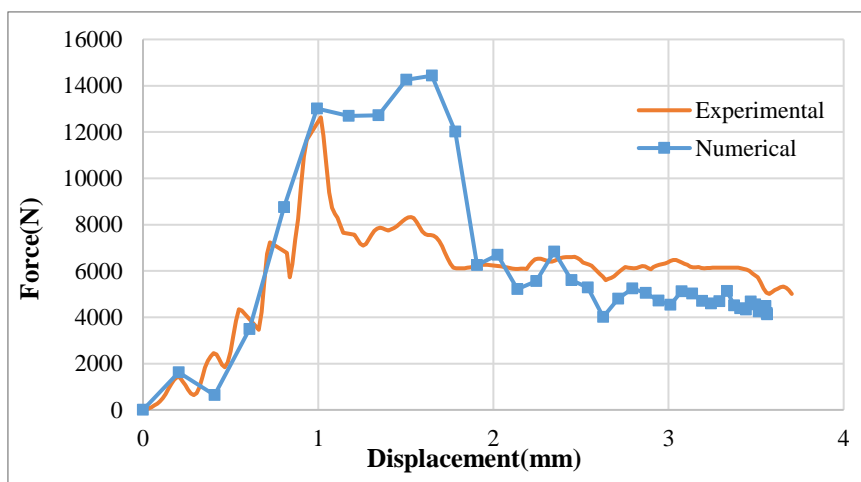
شکل ۲۷ تغییر شکل نمونه 1HQ8 در نرم‌افزار آباکوس

پس از دریافت داده‌های شتاب-زمان از دستگاه تست ضربه، فیلترسازی و نویزگیری داده‌ها انجام شده است. شکل ۲۸ نمودار نیرو-زمان نمونه 1HQ8 را نشان می‌دهد.



شکل ۲۸ نمودار نیرو زمان نمونه 1HQ8 در حالت عددی و تجربی

با توجه به شکل ۲۸، مشاهده می‌شود که مقدار ماکزیمم نیرو در حالت تجربی تقریباً برابر با ۱۲۶۳۵ نیوتون و در حالت عددی برابر با ۱۴۴۳۲ نیوتون است. با توجه به این اعداد مشخص است که حالت عددی دارای ۱۴٪ خطا نسبت به حالت تجربی می‌باشد. پس از بدست آمدن نمودار جابه‌جایی-زمان، نمودار نیرو-جابه‌جایی نیز همانند شکل ۲۹ رسم شده است.



شکل ۲۹ نمودار نیرو جابه‌جایی نمونه 1HQ8 در حالت عددی و تجربی

با توجه به شکل ۲۹، میزان جابه‌جایی در حالت تجربی برابر با ۳/۷۰ میلی‌متر و در حالت شبیه‌سازی برابر با ۳/۵۶ میلی‌متر است. در نتیجه مشخص می‌شود که جابه‌جایی به دست آمده در حل عددی نسبت به تست تجربی دارای ۴٪ خطا می‌باشد.

۳-۴- تحلیل و مقایسه پارامترهای مختلف جذب انرژی برای نمونه 1HQ8

با استفاده از روابط (۱) تا (۳) به مقایسه پارامترهای مختلف جذب انرژی برای نمونه 1HQ8 در دو حالت تجربی و عددی پرداخته شده است. جدول ۳ نتایج این مقایسه‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۳ مقایسه پارامترهای جذب انرژی برای نمونه 1HQ8 در دو حالت تجربی و عددی

	نمونه 1HQ8		
	تجربی	عددی	درصد خطا
انرژی جذب شده (ژول)	۲۱/۹	۲۴/۳	۱۰٪
میانگین نیروی لهیدگی (نیوتون)	۵۹۱۸/۹	۶۸۲۸/۹	۱۵٪
بازده نیروی لهیدگی	۰/۴۶	۰/۴۷	۲/۵٪

۳-۵- نتایج عددی و تجربی نمونه 1HR12

شکل ۳۰ هر دو نمونه 1HR12 را پس از انجام تست ضربه با انرژی ۲۵ ژول و ایجاد تغییر شکل در آن‌ها نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۳۱ نیز نحوه تغییر شکل این نمونه در سه حالت مختلف به صورت فریم به فریم نشان داده شده است.



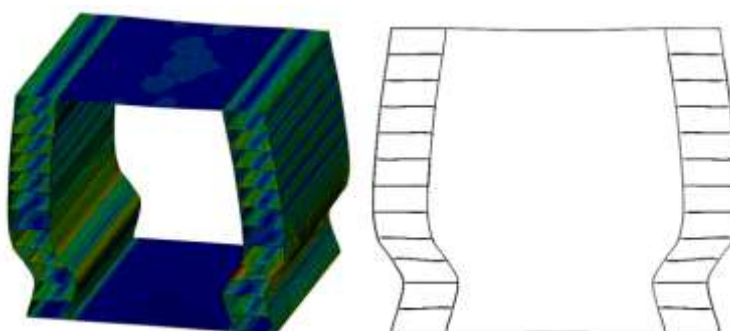
شکل ۳۰ نمونه‌های 1HR12 پس از انجام تست ضربه و ایجاد تغییر شکل در آن‌ها



الف) قبل از برخورد ب) در هنگام برخورد ج) پس از برخورد

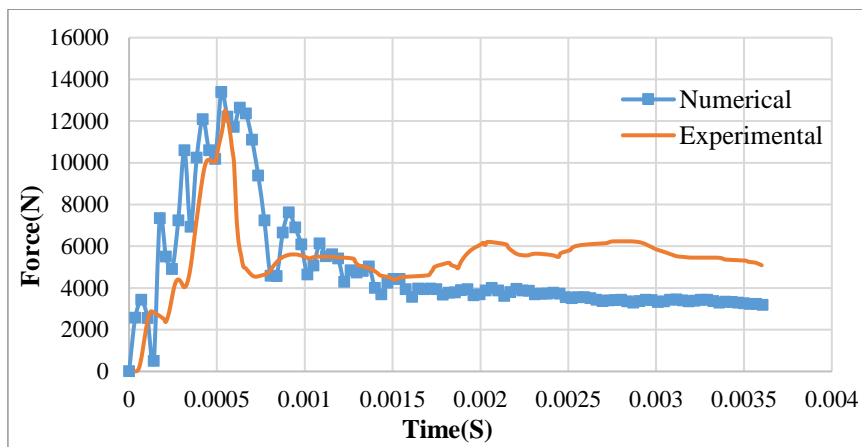
شکل ۳۱ نحوه تغییر شکل نمونه 1HR12 تحت ضربه به صورت فریم به فریم

در ادامه و در شکل ۳۲ نحوه تغییر شکل نمونه 1HR12 در نرم‌افزار آباکوس نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نحوه تغییر شکل، به صورت کاملاً متقارن بوده است.



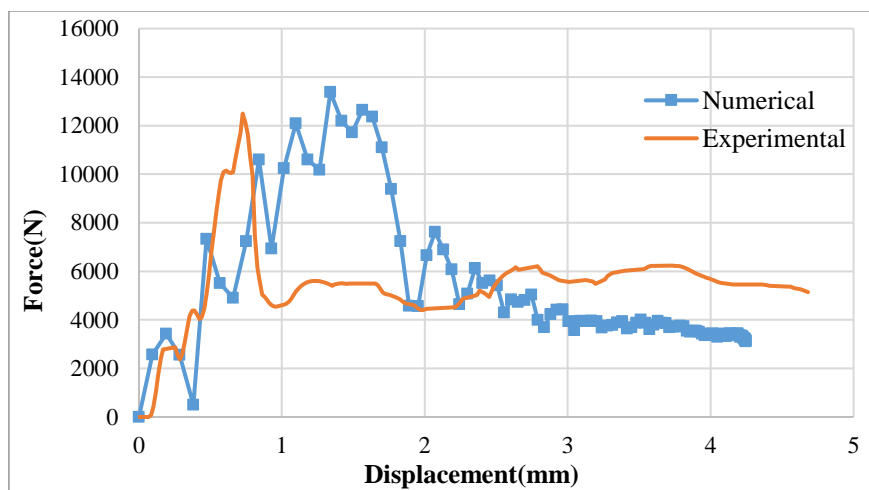
شکل ۳۲ تغییر شکل نمونه 1HR12 در نرم‌افزار آباکوس

پس از دریافت داده‌های شتاب زمان از دستگاه تست ضربه، فیلترسازی و نویزگیری داده‌ها انجام شده است. شکل ۳۳ نمودار نیرو زمان نمونه 1HR12 را نشان می‌دهد.



شکل ۳۳ نمودار نیرو زمان نمونه 1HR12 در حالت عددی و تجربی

با توجه به شکل ۳۳، مشاهده می‌شود که مقدار ماکزیمم نیرو در حالت تجربی تقریباً برابر با ۱۲۴۹۸ نیوتون و در حالت عددی برابر با ۱۳۳۸۴ نیوتون است. با توجه به این اعداد مشخص است که حالت عددی دارای ۷٪ خطا نسبت به حالت تجربی می‌باشد. پس از بدست آمدن نمودار جابه‌جایی زمان، نمودار نیرو-جابه‌جایی نیز همانند شکل ۳۴ رسم شده است.



شکل ۳۴ نمودار نیرو جابه‌جایی نمونه 1HR12 در حالت عددی و تجربی

با توجه به شکل ۳۴، میزان جابه‌جایی در حالت تجربی برابر با ۴/۶۸ میلی‌متر و در حالت شبیه‌سازی برابر با ۴/۲۴ میلی‌متر است. در نتیجه مشخص می‌شود که جابه‌جایی به دست آمده در حل عددی نسبت به تست تجربی دارای ۱۰٪ خطا می‌باشد.

۲-۳-۲-۴ تحلیل و مقایسه پارامترهای مختلف جذب انرژی برای نمونه 1HR12

همانند نمونه‌های قبلی، با استفاده از روابط (۱) تا (۳) به مقایسه پارامترهای مختلف جذب انرژی برای نمونه 1HR12 در دو حالت تجربی و عددی پرداخته شده است. جدول ۴ نتایج این مقایسه‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۴ مقایسه پارامترهای جذب انرژی برای نمونه 1HR12 در دو حالت تجربی و عددی

	نمونه 1HR12		
	تجربی	عددی	درصد خطا
انرژی جذب شده (ژول)	۲۵/۶	۲۴/۷	۳/۵٪
میانگین نیروی لهیدگی (نیوتون)	۵۴۷۰	۵۸۲۵/۴	۷٪
بازده نیروی لهیدگی	۰/۴۳	۰/۴۳	۰٪

با توجه به جدول ۴، مشاهده می‌شود که جذب انرژی در حالت تجربی بیشتر از ۲۵ ژول شده است. همانطور که برای نمونه 1HQ6 گفته شد، این خطا می‌تواند به دلیل نبودن ارتفاع ضربه‌زننده، دقیق نبودن وزن‌های اعلام شده برای ضربه‌زننده از

طرف مسئول آزمایشگاه و یا به دلیل نویزهای بسیار زیاد نمودار شتاب زمان خروجی، باشد.

۳-۶- نتایج عددی و تجربی نمونه 1HR16

شکل ۳۵ هر دو نمونه 1HR16 را پس از انجام تست ضربه با انرژی ۲۵ ژول و پس از ایجاد تغییر شکل در آنها، نشان می‌دهد.



شکل ۳۵ نمونه‌های 1HR16 پس از انجام تست ضربه و ایجاد تغییر شکل در آنها

در شکل ۳۶ نیز نحوه تغییر شکل نمونه 1HR16 در سه حالت مختلف به صورت فریم به فریم نشان داده شده است. در همین شکل مشخص است که به دلیل کج بودن ضربه‌زننده (خطای آزمایش) و یا به دلیل وجود ایرادات مختلف در قطعه در هنگام تولید مانند مک و یا ترک، نمونه به شکل متقارن تغییر شکل نداده است اما در شکل ۳۷ که نحوه تغییر شکل نمونه در نرم‌افزار آباکوس را نشان می‌دهد، به وضوح مشخص است که نمونه به صورت متقارن تغییر شکل پیدا کرده است.

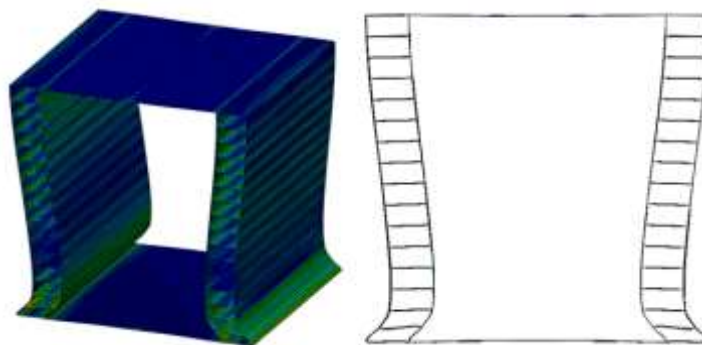


ج) پس از برخورد

ب) در هنگام برخورد

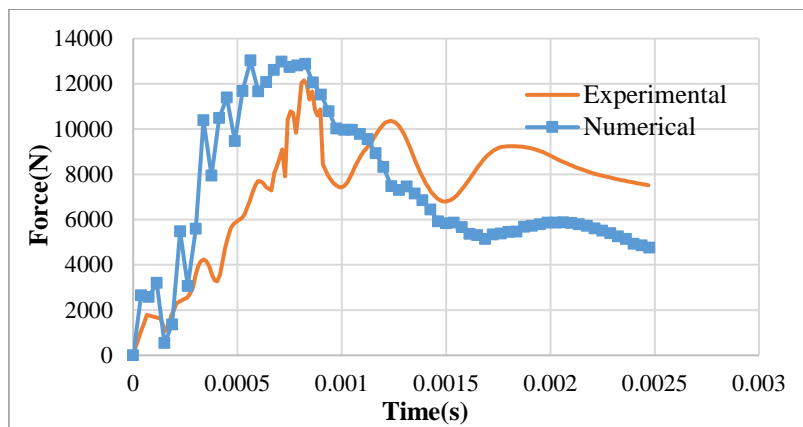
الف) قبل از برخورد

شکل ۳۶ نحوه تغییر شکل نمونه 1HR16 تحت ضربه به صورت فریم به فریم



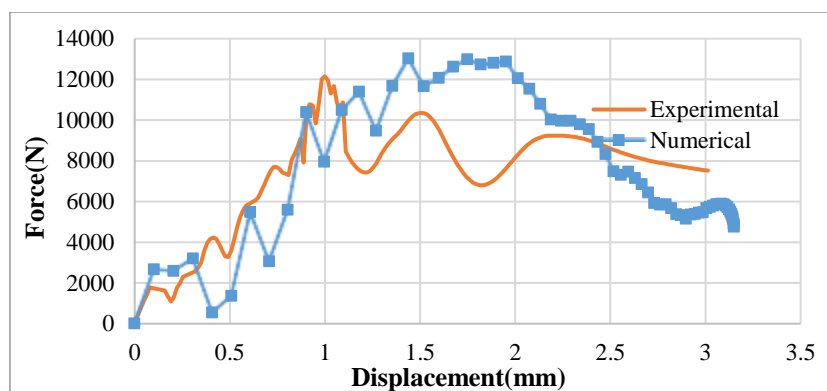
شکل ۳۷ تغییر شکل نمونه 1HR16 در نرم‌افزار آباکوس

پس از دریافت داده‌های شتاب زمان از دستگاه تست ضربه، فیلترسازی و نویزگیری داده‌ها انجام شده است. شکل ۳۸ نمودار نیرو زمان نمونه 1HR16 را نشان می‌دهد.



شکل ۲۸ نمودار نیرو-زمان نمونه IHR16 در حالت عددی و تجربی

با توجه به شکل ۲۸، مشاهده می‌شود که مقدار ماکزیمم نیرو در حالت تجربی برابر با ۱۲۱۵۳ نیوتون و در حالت عددی تقریباً برابر با ۱۳۰۲۸ نیوتون است. با توجه به این اعداد مشخص است که حالت عددی دارای ۷/۵٪ خطا نسبت به حالت تجربی می‌باشد. همچنین پس از بدست آمدن نمودار جابه‌جایی-زمان، نمودار نیرو-جابه‌جایی نیز همانند شکل ۳۹ رسم شده است.



شکل ۳۹ نمودار نیرو جابه‌جایی نمونه IHR16 در حالت عددی و تجربی

به دلیل وجود نداشتن ترمز در دستگاه تست ضربه دانشگاه امیرکبیر، در بعضی موارد ضربه‌های ثانویه به نمونه زده شده که همین امر موجب افزایش اختلال و نویز در انتهای نمودارهای هر نمونه شده است.

با توجه به شکل ۳۹، میزان جابه‌جایی در حالت تجربی برابر با ۲/۸۸ میلی‌متر و در حالت شبیه‌سازی برابر با ۳/۱۵ میلی‌متر است. در نتیجه مشخص می‌شود که جابه‌جایی به دست آمده در حل عددی نسبت به تست تجربی دارای ۸٪ خطا می‌باشد.

۳-۶-۱- تحلیل و مقایسه پارامترهای مختلف جذب انرژی برای نمونه IHR16

همانند نمونه‌های قبلی، با استفاده از روابط (۱) تا (۳) به مقایسه پارامترهای مختلف جذب انرژی برای نمونه IHR16 در دو حالت تجربی و عددی پرداخته شده است. جدول ۵ نتایج این مقایسه‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۵ مقایسه پارامترهای جذب انرژی برای نمونه IHR16 در دو حالت تجربی و عددی

	نمونه IHR16		درصد خطا
	تجربی	عددی	
انرژی جذب شده (ژول)	۲۲/۲	۲۴/۶	۹٪
میانگین نیروی لهیدگی (نیوتون)	۷۷۰۸/۳	۷۸۰۹/۵	۱/۵٪
بازده نیروی لهیدگی	۰/۶۳	۰/۶۰	۵٪

۳-۷- مقایسه کلی نمونه‌های موجود در تست تجربی

در بخش‌های قبل به ارائه نتایج مربوط به هر نمونه پرداخته شده است. حال به بررسی و مقایسه نمونه‌های موجود در تست

تجربی با یکدیگر می‌پردازیم.

۳-۷-۱- جذب انرژی

در ابتدا به مقایسه جذب انرژی نمونه‌ها پرداخته شده است. با توجه به اینکه میزان تغییر طول در مقدار انرژی جذب شده عامل تاثیرگذار است لذا باید این پارامتر در شرایط تعادلی برای هر ۴ نمونه موجود مقایسه شود. جهت انجام این کار، با لحاظ کمترین میزان تغییر طول که متعلق به نمونه 1HR16 است، میزان تغییر طولی که در آن انرژی جذب شده اندازه‌گیری می‌شود، برابر با ۲/۸۸ میلی‌متر در حالت تجربی و ۳/۱۵ میلی‌متر در حالت عددی در نظر گرفته می‌شود. جدول ۶ میزان جذب انرژی هر نمونه در حالت عددی و تجربی را در حالت کلی و در فواصل مشخص نشان می‌دهد.

جدول ۶ مقادیر انرژی جذب شده برای هر ۴ نمونه در حالت عددی و تجربی

شماره مدل	انرژی جذب شده در حالت عددی (ژول)		انرژی جذب شده در حالت تجربی (ژول)	
	کل	در $x=۳/۱۵$ میلی‌متر	کل	در $x=۲/۸۸$ میلی‌متر
1HQ6	۲۴/۵	۲۰/۸	۲۵/۳	۱۷/۱
1HQ8	۲۴/۳	۲۲/۸	۲۱/۹	۱۷/۹
1HR12	۲۴/۷	۲۱/۳	۲۵/۶	۱۶/۷
1HR16	۲۴/۶	۲۴/۶	۲۲/۲	۲۲/۲

با توجه به جدول ۶ مشاهده می‌شود که نمونه 1HR16 دارای بیشترین میزان جذب انرژی در فاصله تعادلی (در $x=۳/۱۵$ میلی‌متر در حالت عددی و در $x=۲/۸۸$ میلی‌متر در حالت تجربی) می‌باشد. همچنین نمونه 1HQ6 نیز دارای کمترین مقدار انرژی جذب شده در فاصله تعادلی در حالت عددی و نمونه 1HR12 دارای کمترین مقدار در حالت تجربی است.

با توجه به این نکته که نمونه‌های 1HQ6 و 1HQ8 دارای خانه‌های مربعی شکل و نمونه‌های 1HR12 و 1HR16 نیز دارای خانه‌های مستطیلی هستند، می‌توان به مقایسه جداگانه این نمونه‌ها نیز پرداخت. مقدار جذب انرژی در فاصله تعادلی در حالت تجربی برای نمونه 1HQ8، ۵٪ بیشتر از نمونه 1HQ6 می‌باشد و نمونه 1HR16 نیز ۳۳٪ انرژی بیشتری نسبت به نمونه 1HR12 جذب می‌کند. در حالت عددی نیز نمونه‌های 1HQ8 و 1HR16 مقدار جذب انرژی بیشتری دارند.



شکل ۴۰ نمودار انرژی تعادلی نمونه‌ها در حالت عددی و تجربی

از سویی دیگر همانطور که گفته شد، نمونه‌های 1HR16 و 1HR12 در حقیقت به ترتیب همان نمونه‌های 1HQ8 و 1HQ6 هستند که در داخل هر یک از خانه‌های مربعی شکل آن‌ها یک تقویت‌کننده افقی ایجاد شده و آن‌ها را تبدیل به خانه‌های مستطیلی کرده است. پس می‌توان به مقایسه این نمونه‌ها به صورت دو به دو نیز پرداخت. در اینجا مشاهده می‌شود که میزان

جذب انرژی در حالت تجربی برای نمونه 1HR16، ۲۵٪ بیشتر از نمونه 1HQ8 می‌باشد و در حالت عددی نیز نمونه 1HR16 انرژی بیشتری جذب می‌کند. همچنین میزان جذب انرژی در حالت تجربی برای نمونه 1HR12 ۲٪ کمتر از نمونه 1HQ6 است اما در حالت عددی مقدار جذب انرژی نمونه 1HR12 بیشتر از نمونه 1HQ6 بوده است که این اختلاف می‌تواند به دلیل وجود ایرادات فیزیکی در قطعات ساخته شده باشد. در شکل ۴۰ نمودار انرژی تعادلی هر ۴ نمونه در حالت تجربی و عددی نمایش داده شده است.

۴-۳-۲ میانگین نیروی لهیدگی (MCF)

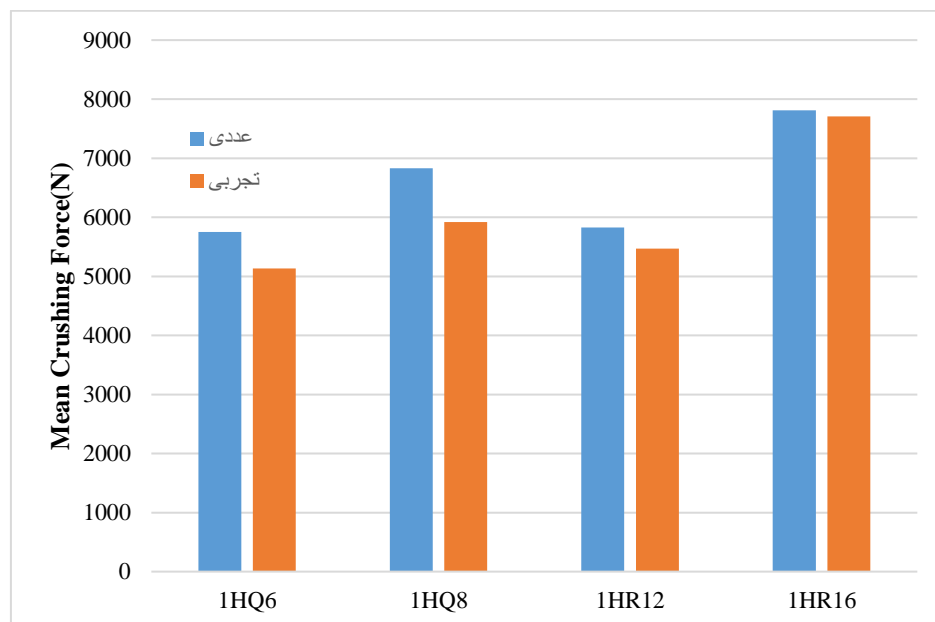
در جدول ۷ میانگین نیروی لهیدگی برای هر ۴ نمونه در حالت عددی و تجربی نشان داده شده است.

جدول ۷ میانگین نیروی لهیدگی برای هر ۴ نمونه در حالت عددی و تجربی

میانگین نیروی لهیدگی (MCF)		
شماره مدل	تجربی	عددی
1HQ6	۵۱۳۱/۸	۵۷۵۱/۱
1HQ8	۵۹۱۸/۹	۶۸۲۸/۹
1HR12	۵۴۷۰	۵۸۲۵/۴
1HR16	۷۷۰۸/۳	۷۸۰۹/۵

با توجه به جدول ۷ مشاهده می‌شود که هم در حالت عددی و هم تجربی نمونه 1HR16 دارای بالاترین مقدار و نمونه 1HQ6 نیز دارای کمترین مقدار میانگین نیروی لهیدگی هستند. همچنین در حالت تجربی میانگین نیروی تخریب نمونه 1HQ8، ۱۵٪ بیشتر از نمونه 1HQ6 است و در نمونه‌های خانه‌مستطیلی نیز میانگین نیروی تخریب برای نمونه 1HR16 ۴۱٪ بیشتر از نمونه 1HR12 می‌باشد.

همچنین در قسمت مقایسه نمونه‌های خانه‌مستطیلی با نمونه‌های خانه‌مربعی، میانگین نیروی لهیدگی در حالت تجربی برای نمونه 1HR12 حدود ۶/۵٪ بیشتر از نمونه 1HQ6 و برای نمونه 1HR16، ۳۰٪ بیشتر از نمونه 1HQ8 می‌باشد. شکل ۴۱ نیز نمودار میانگین نیروی لهیدگی هر ۴ نمونه را در حالت عددی و تجربی نمایش می‌دهد.



شکل ۴۱ نمودار میانگین نیروی لهیدگی نمونه‌ها در حالت عددی و تجربی

۴-۳-۳ بازده نیروی لهیدگی (CFE)

در جدول ۸ بازده نیروی لهیدگی برای هر ۴ نمونه در حالت عددی و تجربی نشان داده شده است.

جدول ۸ بازده نیروی لهیدگی برای هر ۴ نمونه در حالت عددی و تجربی

بازده نیروی لهیدگی (CFE)		
شماره مدل	تجربی	عددی
1HQ6	۰/۳۶	۰/۴۰
1HQ8	۰/۴۶	۰/۴۷
1HR12	۰/۴۳	۰/۴۳
1HR16	۰/۶۳	۰/۶۰

میزان بازده نیروی لهیدگی برای یک جاذب انرژی ایده آل برابر با ۱ می‌باشد. با توجه به جدول ۸ مشاهده می‌شود که کمترین میزان بازده هم در حالت تجربی و هم عددی مربوط به نمونه 1HQ6 و بالاترین میزان بازده نیز مختص نمونه 1HR16 می‌باشد. بین دو نمونه 1HQ8 و 1HQ6، نمونه 1HQ8 در هر دو حالت بازده بالاتری دارد و جاذب انرژی ایده‌آل‌تری می‌باشد. همچنین در بین نمونه‌های 1HR12 و 1HR16 باز هم نمونه 1HR16 دارای بازده بسیار بالاتری می‌باشد که نشان از بهتر بودن این نوع جاذب انرژی نسبت به بقیه است. شکل ۴۲ نمودار بازده نیروی لهیدگی برای هر ۴ نمونه را نشان می‌دهد.



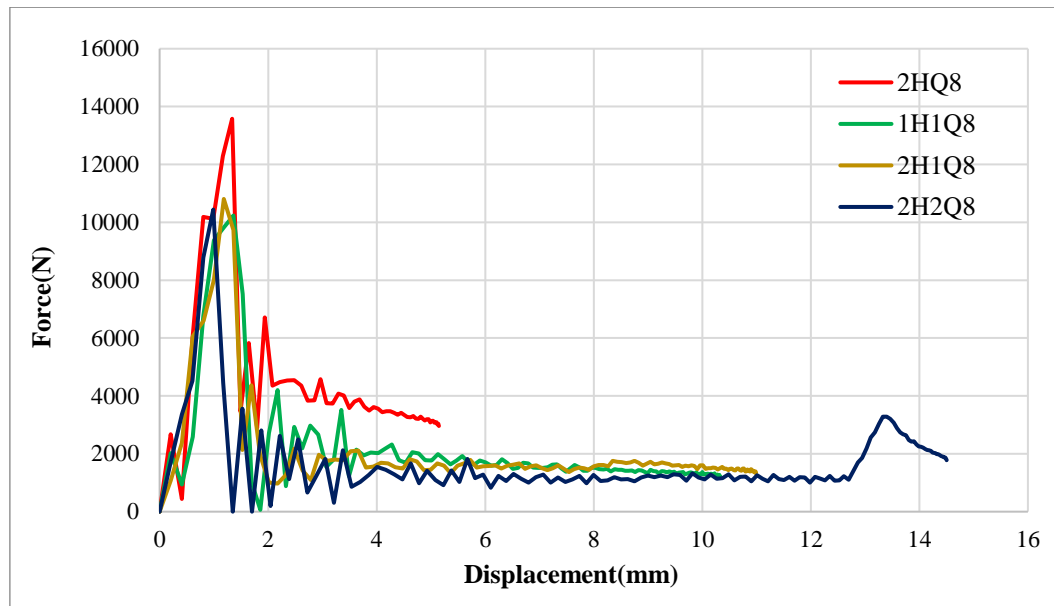
شکل ۴۲ نمودار بازده نیروی لهیدگی نمونه‌ها در حالت عددی و تجربی

۴-۴ نتایج شبیه‌سازی نمونه‌های ساخته نشده

پس از ارائه و صحت‌سنجی نتایج مربوط به نمونه‌های موجود در تست تجربی، حال نوبت به ارائه نتایج شبیه‌سازی‌های نمونه‌های ساخته نشده می‌رسد.

تصویر نمونه‌های مدل شده در نرم‌افزار آباکوس و کد اختصاصی هر نمونه در جدول به نمایش در آمده است. همچنین در شکل ۴۳، نمودار نیرو جابه‌جایی هر ۴ نمونه باقی مانده نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۴۳، مشاهده می‌شود که میزان جابه‌جایی نمونه 2HQ8 برابر با ۵/۱۴ میلی‌متر است که کمترین میزان جابه‌جایی در بین این ۴ نمونه است. نمونه 2H2Q8 نیز بیشترین میزان جابه‌جایی را دارد که برابر با ۱۴/۵ میلی‌متر می‌باشد. همچنین ماکزیمم نیروی نمونه 2HQ8 برابر با ۱۳۵۷۸ نیوتون است که در بین این نمونه‌ها بیشترین مقدار است. نمونه 1HQ8 نیز دارای کمترین میزان ماکزیمم نیرو است که این عدد برابر با ۱۰۲۳۴ نیوتون می‌باشد. در جدول ۹ ماکزیمم جابه‌جایی و ماکزیمم نیروی هر نمونه نمایش داده شده است.



شکل ۴۳ نمودار نیرو و جابه‌جایی ۴ نمونه ساخته نشده

جدول ۹ مقادیر ماکزیمم نیرو و ماکزیمم جابه‌جایی هر نمونه

	شماره مدل			
	2HQ8	1H1Q8	2H1Q8	2H2Q8
ماکزیمم جابه‌جایی (mm)	۵/۱۴	۱۰/۳۱	۱۰/۹۸	۱۴/۵
ماکزیمم نیرو (N)	۱۳۵۷۸	۱۰۲۳۴	۱۰۸۰۷	۱۰۴۳۹

۳-۸- مقایسه نهایی همه نمونه‌ها

پس از صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی‌ها، می‌توان برای مقایسه همه نمونه‌ها با یکدیگر از نتایج تحلیل‌های عددی استفاده کرد.

۳-۸-۱- بررسی و مقایسه پارامترهای مختلف جذب انرژی

در این بخش به بررسی و مقایسه انرژی جذب شده، میانگین نیروی لهیدگی و بازده نیروی لهیدگی برای همه نمونه‌ها پرداخته شده است.

۳-۸-۱-۱- انرژی جذب شده بر اثر ضربه

برای انجام مقایسه بهتر بین این ۸ نمونه، باید به این نکته توجه داشت که میزان تغییر طول در مقدار انرژی جذب شده، عاملی تاثیرگذار است لذا باید این پارامتر در شرایط تعادلی برای هر ۸ نمونه موجود مقایسه شود. جهت انجام این کار، با لحاظ کمترین میزان تغییر طول که متعلق به نمونه 1HR16 است، میزان تغییر طولی که در آن انرژی جذب شده اندازه‌گیری می‌گردد، برابر با ۳/۱۵ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. در جدول ۱۰ میزان انرژی جذب شده برای هر نمونه در این طول نمایش داده شده است.

در این شبیه‌سازیها، ضربه با انرژی ۲۵ ژول وارد شده است و با توجه به مقادیر موجود در جدول ۴-۹ می‌توان مشاهده کرد که میزان انرژی جذب شده کل، در همه‌ی سازه‌ها تقریباً بیش از ۹۵ درصد انرژی وارده است. همچنین با توجه به مقادیر انرژی جذب در فاصله $x=3/15$ میلی‌متر که در شرایط تعادلی برای هر ۸ نمونه است، می‌توان مشاهده کرد که نمونه 1HR16 بهترین نمونه از لحاظ جذب انرژی می‌باشد.

جدول ۱۰ مقادیر انرژی جذب شده برای هر ۵ نمونه

شماره مدل	کل	در $X=3/15$ میلی متر
2HQ8	۲۴/۵	۱۸/۱
1H1Q8	۲۴/۱	۱۲/۳
2H1Q8	۲۳/۹	۱۱/۵
2H2Q8	۲۴/۷	۹/۳
1HQ6	۲۴/۵	۲۰/۸
1HQ8	۲۴/۳	۲۲/۸
1HR12	۲۴/۷	۲۱/۳
1HR16	۲۴/۶	۲۴/۶

با توجه به جدول ۱۰، مشخص است که با اضافه شدن دو ستون در نمونه 2HQ8 نسبت به نمونه 1HQ8 و ثابت نگه داشتن وزن، میزان جذب انرژی ۲۱٪ کاهش یافته است. همچنین با دولایه کردن خانه‌ها در نمونه 2H2Q8 نسبت به نمونه 1H1Q8 و ثابت نگه داشتن وزن، باز هم مشاهده می‌شود که میزان جذب انرژی ۲۵٪ کاهش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود که میزان جذب انرژی نمونه 1H1Q8 که از اضافه شدن دو ستون افقی به نمونه 1HQ8 تشکیل شده است ۴۶٪ کاهش پیدا کرده است.

۳-۱-۸-۲ میانگین نیروی لهیدگی

جدول ۱۱ میانگین نیروی لهیدگی برای هر نمونه را نشان می‌دهد.

جدول ۱۱ میانگین نیروی لهیدگی نمونه‌ها

شماره مدل	نیروی میانگین لهیدگی (نیوتون)
2HQ8	۴۷۸۲/۴
1H1Q8	۲۳۳۸/۹
2H1Q8	۲۱۸۴/۷
2H2Q8	۱۷۰۳/۷
1HQ6	۵۷۵۱/۱
1HQ8	۶۸۲۸/۹
1HR12	۵۸۲۵/۴
1HR16	۷۸۰۹/۵

با توجه به مقادیر موجود در جدول ۱۱ مشاهده می‌شود که نمونه 1HR16 دارای بیشترین مقدار و نمونه 2H2Q8 دارای کمترین مقدار نیروی میانگین لهیدگی است. همچنین با اضافه شدن دو ستون در نمونه 2HQ8 نسبت به نمونه 1HQ8 و ثابت نگه داشتن وزن، میزان نیروی میانگین لهیدگی ۳۰٪ کاهش یافته است. با دولایه کردن خانه‌ها در نمونه 2H2Q8 نسبت به نمونه 1H1Q8 و ثابت نگه داشتن وزن نیز میزان نیروی میانگین لهیدگی ۲۷٪ کاهش یافته است. همچنین با اضافه شدن دو ستون افقی در بالا و پایین به نمونه 1HQ8 و تبدیل آن به نمونه 1H1Q8 نیروی میانگین لهیدگی به اندازه ۶۶٪ کاهش یافته است.

۳-۱-۸-۳ بازده نیروی لهیدگی

در جدول ۱۲ مقادیر بازده نیروی لهیدگی برای هر نمونه ارائه شده است.

میزان راندمان لهیدگی برای یک جاذب انرژی ایده‌آل ۱ (۱۰۰٪) می‌باشد اما دستیابی به این عدد بسیار مشکل است. در نتیجه با توجه به مقادیر موجود در جدول ۱۲ مشاهده می‌شود که نمونه 1HR16 دارای بهترین بازده نیروی لهیدگی در بین همه نمونه‌ها می‌باشد. همچنین نمونه 2H2Q8 دارای کمترین میزان بازده نیروی لهیدگی است.

جدول ۱۲ مقادیر بازده نیروی لهیدگی برای هر نمونه

شماره مدل	بازده نیروی لهیدگی
2HQ8	۰/۳۵
1H1Q8	۰/۲۲
2H1Q8	۰/۲۰
2H2Q8	۰/۱۶
1HQ6	۰/۴۰
1HQ8	۰/۴۷
1HR12	۰/۴۳
1HR16	۰/۶۰

با توجه به نتایج عددی، تجربی و تفسیر آن‌ها به وضوح مشخص است که نمونه 1HR16 بهترین نمونه برای استفاده به عنوان جاذب انرژی می‌باشد. همچنین مشاهده شد که با افزایش تعداد خانه‌ها در هر ردیف خواص و پارامترهای جذب انرژی بهبود پیدا می‌کنند و در کل نمونه‌های خانه مستطیلی نیز جاذب‌های انرژی بهتری نسبت به نمونه‌های خانه‌مربعی نظیرشان هستند.

۴- نتیجه‌گیری

هدف از انجام این مطالعه، بررسی عددی و تجربی تخریب سازه‌های چهارگوش چند سلولی جدار نازک ساخته شده توسط پرینتر سه بعدی در اثر ضربه جانبی بود. در ادامه خلاصه‌ای از نتایج شبیه‌سازی‌های عددی و تست‌های تجربی ارائه شده است.

- به طور کلی و با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌ها و تست‌های تجربی، با افزایش تعداد خانه‌های هر نمونه و کاهش ضخامت دیواره نمونه‌ها به منظور ثابت نگه داشتن وزن، میزان جذب انرژی، میانگین نیروی لهیدگی و بازده نیروی لهیدگی افزایش می‌یابد. همچنین میزان تغییر طول و لهیدگی هر نمونه با افزایش تعداد خانه‌ها کاهش می‌یابد.
- با توجه به این موضوع که نمونه‌های خانه مستطیلی از اضافه شدن یک تقویت کننده افقی به نمونه‌های خانه‌مربعی ایجاد شده‌اند، مشاهده می‌شود که میزان جذب انرژی در فاصله تعادلی، میانگین نیروی لهیدگی و بازده نیروی لهیدگی نمونه‌های مستطیلی نظیر هر نمونه مربعی، افزایش یافته است.
- با افزایش تعداد خانه‌های مربعی از ۶ عدد به ۸ عدد، میزان جذب انرژی ۵٪، میانگین نیروی لهیدگی ۱۵٪ و بازده نیروی لهیدگی ۳۰٪ افزایش یافته است.
- با افزایش تعداد خانه‌های مستطیلی از ۱۲ عدد به ۱۶ عدد، میزان جذب انرژی ۱۶٪، میانگین نیروی لهیدگی ۳۵٪ و بازده نیروی لهیدگی ۴۷٪ افزایش یافته است.
- با تبدیل نمونه ۶ خانه مربعی به نمونه ۱۲ خانه مستطیلی، میانگین نیروی لهیدگی حدود ۷٪ و بازده نیروی لهیدگی ۲۰٪ افزایش می‌یابد.
- با تبدیل نمونه ۸ خانه مربعی به نمونه ۱۶ خانه مستطیلی، میانگین نیروی لهیدگی ۳۰٪ و بازده نیروی لهیدگی ۳۷٪ افزایش می‌یابد.
- با اضافه کردن لایه‌های درونی به نمونه‌ها، مقادیر پارامترهای جذب انرژی کاهش می‌یابد.
- هرچه میزان لهیدگی (تغییر طول) نمونه تحت ضربه کمتر باشد، ماکزیمم نیروی لهیدگی و مقاومت نمونه در برابر ضربه بیشتر است. با توجه به این نکات و نتایج، بدیهی است که نمونه 1HR16 بهترین جاذب انرژی در بین این نمونه‌ها می‌باشد.

Authorship Contribution Statement

Dr. Pooya Pirali

Biography: Pooya Pirali is currently an Assistant Professor with the Department of Mechanical Engineerin, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran. His field of research is Impact mechanics.

Contribution Statement: Conceptualization, Methodology, Validation, Investigation, Software, Visualization

Mohsen Heydari Beni

Biography: Mohsen Heydari Beni is currently a Ph. D student at Malek Ashtar University of Technology and his main reaserch interests are composite structures, plates and shell analysis and nanomechanics.

Contribution Statement: Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Validation, Data Curation, Project administration, Writing- Reviewing and Editing, Resources.

Behnam Hajimousaei

Biography: Behnam Hajimousaei received his M.Sc in Mechanical Engineering from University of Malek Ashtar. His field of research is mechanical analysis of composite materials.

Contribution Statement: Statement: Investigation, Visualization, Formal analysis, Validation, Writing- Original draft preparation.

Prof. Jafar Eskandari Jam

Biography: Jafar Eskandari Jam is Professor of Mechanical engineering at Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran. His current research focuses on composite structures, plates and shell analysis and nanomechanics.

Contribution Statement: Investigation, Visualization, Formal analysis, Validation, Writing- Original draft preparation.

۵- مراجع

- [1] Nia AA, Hamedani JH. Comparative analysis of energy absorption and deformations of thin walled tubes with various section geometries. *Thin-Walled Structures*. 2010;48(12):946-54.
- [2] Graciano C, Martínez Ga, Smith D. Experimental investigation on the axial collapse of expanded metal tubes. *Thin-Walled Structures*. 2009;47(8-9):953-61.
- [3] Kadkhodayan M, Galehdari A, Hadidi Moud S. Analytical and numerical study of energy absorption of graded honeycomb structure under in-plane impact. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;14(16):261-71.
- [4] Ebrahimkhani M, Liaghat G, Ahmadi H. Simulation of crushing performance of Composite Energy Absorber under impact loading using Continuum Damage Mechanics approach. *Modares Mechanical Engineering*. 2018;17(12):505-13.
- [5] Banhart J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in materials science*. 2001;46(6):559-632.
- [6] Zhang D, Lu G, Ruan D, Fei Q. Energy absorption in the axial crushing of hierarchical circular tubes. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020;171:105403.
- [7] Li J, Zhang Y, Kang Y, Zhang F. Characterization of energy absorption for side hierarchical structures under axial and oblique loading conditions. *Thin-Walled Structures*. 2021;165:107999.
- [8] San Ha N, Pham TM, Hao H, Lu G. Energy absorption characteristics of bio-inspired hierarchical multi-cell square tubes under axial crushing. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2021;201:106464.

- [9] Tabacu S, Ducu C. Experimental testing and numerical analysis of FDM multi-cell inserts and hybrid structures. *Thin-Walled Structures*. 2018;129:197-212.
- [10] Luo Y, Fan H. Investigation of lateral crushing behaviors of hierarchical quadrangular thin-walled tubular structures. *Thin-Walled Structures*. 2018;125:100-106.
- [11] Zhang X, Cheng G, Zhang H. Numerical investigations on a new type of energy-absorbing structure based on free inversion of tubes. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2009;51(1):64-76.