



Development of a novel multi-cellular origami metastructure and investigation into numerical and experimental energy absorption behaviour

Mohammad Mazaheri, Mohammad Khalajzade, Masoud Asgari * 

Faculty of Mechanical Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT: Nowadays, the use of additive manufacturing provides a unique opportunity to create complex structures. One such structure that is currently garnering attention in various fields, such as energy absorption, is origami structures. In this paper, novel multi-cellular origami structures are introduced to improve energy absorption performance under quasi-static compression loading. The control of these structures is determined by two key parameters: the number of layers and the ratio between the length of the top side and the bottom side. The effects of these structures on crashworthiness were simulated using Abaqus software and validated through experimental tests with models built using additive manufacturing. Additionally, a simple structure was designed and tested to facilitate a comparison between origami and non-origami structures. The results of this study showed that geometric parameters play an important role in increasing energy absorption behaviour, with origami structures exhibiting a 97 percent increase in specific energy absorption (SEA) compared to non-origami structures. Finally, based on the complex proportional assessment method, the best structure was determined among those designed according to energy absorption criteria.

Review History:

Received: Jan. 16, 2024

Revised: Jul. 21, 2024

Accepted: Oct. 06, 2024

Available Online: Oct. 12, 2024

Keywords:

Origami

Origami Structures

Energy Absorption

Additive Manufacturing

Multicellular Origami Metastructure

1- Introduction

Nowadays, a novel Japanese art form called origami has been developed for various applications in different fields [1, 2]. One of the most interesting applications is the use of origami structures as crash boxes to absorb energy during accidents [3].

Since there are few studies combining multi-cellular and origami-based structures, this paper introduces a novel multi-cellular origami metastructure. Based on the geometric parameters of this structure, five different samples were designed. These samples were manufactured using the FDM method with ABS filament. Experimental tests were conducted, and the structures were also simulated using Abaqus software under quasi-static compression tests. Finally, the COPRAS method was employed to determine the best structure among those studied in this paper. Beside it, a simple tube is built for comparison between origami and non-origami structures.

2- Materials and Models

Structures introduced in this paper are controlled using two parameters (e) and (n). (e) represents the ratio of the size of the top side to the bottom side, and (n) represents the number of layers. To investigate the effect of these parameters on crashworthiness, Table 1 summarizes the structures formed

by these geometric features. As shown in Table 1, e was set to three levels and n to two levels.

Figure 1 shows the structures manufactured using the FDM technique, and table 2 presents information about these structures.

3- Results and discussion

The validation was done using data obtained from tests and FE results. The Force-Displacement diagram of $e1$ shown in figure 2 and figure 3 presents all the crashworthiness parameters extracted using the F-D diagram, such as EA, SEA, IPF and CFE [4].

Table 1. Geometric parameter values for origami tabular structures

Parameter	Levels	Values
e	3	0.6, 0.8, 1
n	2	5, 10

*Corresponding author's email: asgari@kntu.ac.ir



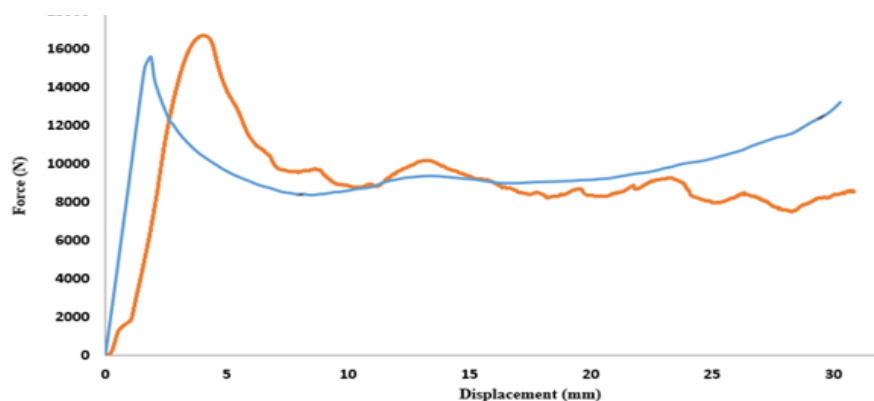


Fig. 1. The Force-Displacement diagram of sample e1

Table 2. Mass of the origami models

Structure name	e1	e0.6n5	e0.6n10	e0.8n5	e0.8n10
Mass (Measured) (g)	24.36	18.63	19.39	21.05	20.88
Mass (Software) (g)	26.78	20.71	21.79	23.66	24.01
Error (%)	9.03	10.04	11.01	11.03	13.03

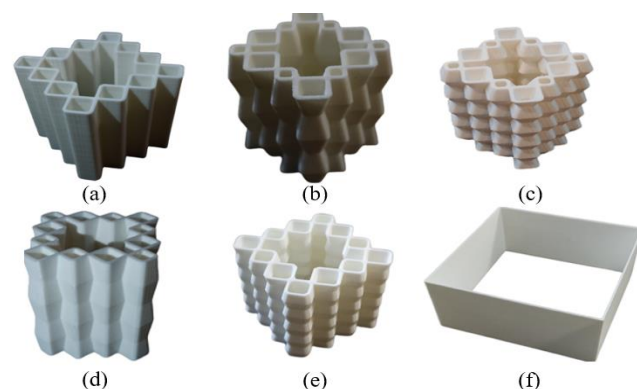


Fig. 2. Samples made by 3D printing method: a) Sample e1, b) Sample e0.6n5, c) Sample e0.6n10, d) Sample e0.8n5, e) Sample e0.8n10, f) Non-origami Sample

To compare the non-origami and origami structures, a non-origami structure was also manufactured. This structure was tested using the same method. The results showed that after 7mm of displacement, the non-origami structure showed damage, while origami structures withstood up to 30mm displacement. From the perspective of energy absorption characteristics, the origami structures have a 97% higher SEA than the non-origami structures.

To find the best origami structure among all those studied, we used Minitab and the design of experiments (DOE) to determine which parameter had the most significant effect on crashworthiness. The impact of geometric parameters is shown in Figure 4. As shown, the impact of parameter ‘e’ on energy absorption is much greater than that of parameter ‘n’. However, to find the best structure, we implemented the COPRAS method.

Based on the result of COPRAS method, the best structures are e1, e0.8n5, e0.8n10, e0.6n10, and e0.6n5, respectively.

4- Conclusions

In this study, an attempt was made to present a new origami model based on ancient art and use it in one of the most important components for protecting vehicle passengers during collisions. For this purpose, 6 samples, including 5 origami models and one non-origami model, were utilized and tested in both experimental and numerical simulations.

The results of this study show that origami structures have approximately a 97% increase in energy absorption compared to a simple tube, which is a highly critical factor in energy absorption. None of the origami structures experienced buckling during the tests and were compressed up to 80% without failure, which is a significant improvement compared to the simple tube that failed after less than 7 mm of displacement.

The results indicate that geometric parameters play an effective role in energy absorption, and by changing these parameters, significant variations in energy absorption can be observed. The parametric study results showed that

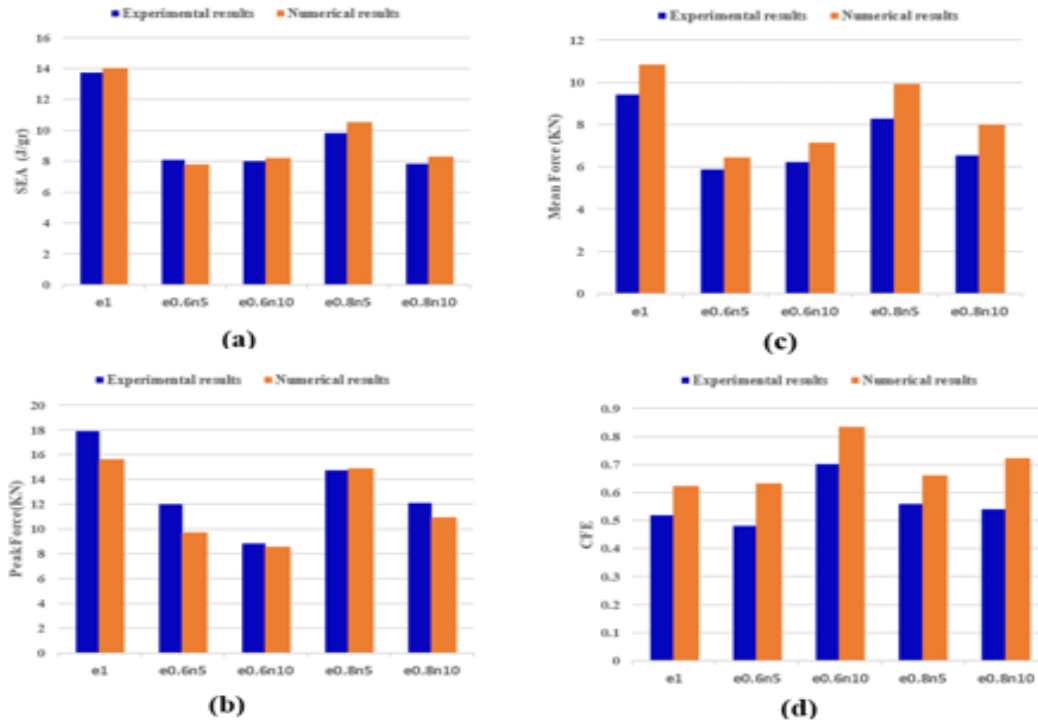


Fig. 3. Energy absorption parameters of origami samples; a)SEA b)Peak Force c)Mean Force d)CFE

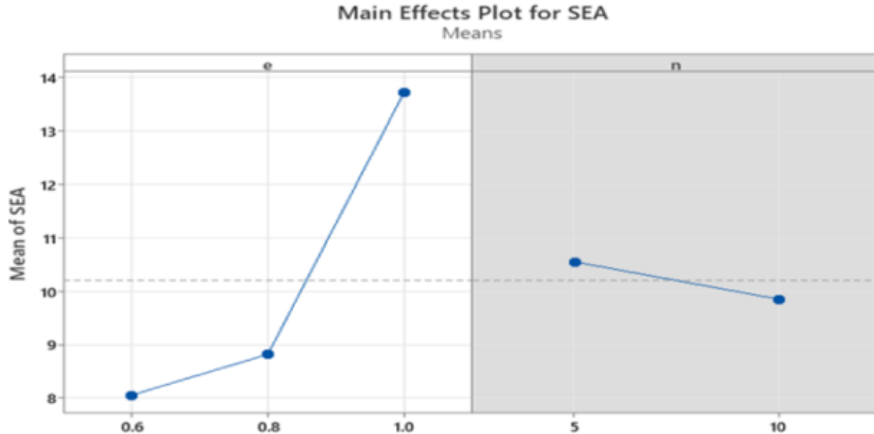


Fig. 4. The result of parametric study

increasing “e” can lead to higher energy absorption while increasing the value of “n” can reduce energy absorption. Since finding the optimal structure for energy absorption solely based on the results of the design experiments and individual comparison of each energy absorption criterion, such as specific energy absorption (SEA), was impossible, the COPRAS method successfully identified the best structure for energy absorption.

References

- [1] C.-Y. Park, Y.-A. Lee, J. Jang, M.-W. Han, Origami and Kirigami Structure for Impact Energy Absorption: Its Application to Drone Guards, Sensors, 23(4) (2023) 2150.
- [2] W. Wei, F. Zhang, Y. Xing, H. Wang, R. Liu, Research on mechanical properties of origami aluminum honeycomb for automobile energy absorbing box, Materials, 16(1) (2022) 141.

- [3] A. Mortazavi Moghaddam, A. Kheradpisheh, M. Asgari, An integrated energy absorbing module for battery protection of electric vehicle under lateral pole impact, *International journal of crashworthiness*, 28(3) (2023) 321-333.
- [4] A. Tafazoli, M. Asgari, A. Ghaznavi, Numerical and Experimental Study Of Energy Absorption of Multi-Layer Aluminum-Composite Conical Frustum Structures under Axial Loading, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 54(8) (2022) 1851-1866.(in Persian).



توسعه فراسازه چندسلولی اورینگامی جدید و بررسی رفتار عددی و تجربی رفتار جذب انرژی

محمد مظاهری، محمد خلیج زاده، مسعود عسگری* 

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۶
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۳۱
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۵
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۷/۲۱

کلمات کلیدی:

اورینگامی
سازه‌های اورینگامی
جذب انرژی
ساخت افزودنی
فراسازه چندسلولی اورینگامی

خلاصه: امروزه استفاده از ساخت افزودنی، امکان ایجاد فراسازه‌های با هندسه پیچیده را فراهم کرده است. یکی از سازه‌هایی که امروزه در زمینه‌های مختلف از جمله جذب انرژی مورد توجه قرار گرفته است، سازه‌های اورینگامی می‌باشد. در پژوهش حاضر، به منظور بهبود خواص جذب انرژی تحت فشار محوری شبه استاتیک، فراسازه چند سلولی اورینگامی نوینی معرفی شده است. این سازه‌ها با دو پارامتر تعداد لایه و نسبت دو ضلع بالا و پایین از یکدیگر متمایز شده‌اند. به منظور استخراج خواص جذب انرژی این سازه‌ها شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام شد و این نتایج با آزمایش تجربی مدل‌های ساخته شده به روش ساخت افزودنی صحت‌گذاری شدند. همچنین برای مقایسه میان سازه‌های اورینگامی و غیر اورینگامی یک سازه ساده نیز طراحی و مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد پارامترهای هندسی نقش مهمی در افزایش قابلیت جذب انرژی دارند و سازه‌های اورینگامی به میزان ۹۷ درصد افزایش جذب انرژی را نسبت به سازه غیر اورینگامی داشتند. در کنار این موارد، بر اساس روش ارزیابی تناسبی پیچیده بهترین سازه از میان سازه‌های طراحی شده بر مبنای معیارهای جذب انرژی مشخص گردید.

۱- مقدمه

با روند رو به رشد تولید خودرو، اهمیت حفظ جان سرنشینان خودرو و به طور کلی ایمنی در خودرو نیز افزایش یافته است. از این بین یکی از موارد مهم برای کاهش آسیب‌های ناشی از تصادف، ایمنی پیشگیرانه می‌باشد [۱]. برای این منظور، استفاده از جعبه‌های تصادف^۱ این سال‌ها مورد توجه قرار گرفته است. با بکارگیری جعبه‌های تصادف در خودروها، در هنگام تصادف این جعبه‌ها می‌توانند با جذب انرژی، آسیب را به حداقل برسانند [۲]. موضوع حائز اهمیت در این سازه‌ها می‌تواند به چندین دسته تقسیم گردد. به عنوان مثال، یکی از مواردی که عده‌ای از دانشمندان به آن پرداخته‌اند جنس این سازه‌ها می‌باشد. مرتضوی مقدم و همکاران [۳] بر روی جعبه‌های انرژی فولادی تمرکز کردند و برای محافظت از باتری خودروهای برقی در هنگام وقوع تصادف، یک سازه جدید معرفی شد. از طرفی گروه دیگری از دانشمندان بر روی آلومینیوم‌ها به دلیل سبک وزن بودن آنها تمرکز کردند [۴-۷]. پس از

آن تفضلی و عسگری [۸] مقایسه‌ای بر آلومینیوم و ترکیب آن با کامپوزیت انجام دادند و نشان داده شد اضافه کردن یک پوسته کامپوزیتی به آلومینیوم می‌تواند ضعف‌های آلومینیوم را جبران کند. به طور کلی کامپوزیت‌ها به عنوان ترکیب با مواد دیگر می‌توانند خواص مکانیکی را بهبود ببخشند [۹]. فرامواد دسته دیگری هستند که به دلیل داشتن خواص مکانیکی قابل تنظیم برای ساخت این جاذب‌ها مناسب می‌باشند. ساخت افزودنی روشی است که امروزه برای تولید جاذب‌های فرامواد استفاده می‌گردد و به دلیل اینکه می‌توان سازه‌های با پیچیدگی بالا نیز تولید کرد این روش مورد توجه دانشمندان مختلف قرار گرفته است [۱۰، ۱۱].

هندسه از دیگر مواردی است که برای افزایش قابلیت جذب انرژی به آن توجه شده است. در همین راستا، لوله‌های جدارنازک از جمله هندسه‌هایی هستند که مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱۲]. همچنین سازه‌های چند سلولی نیز از جمله هندسه‌هایی هستند که توسط دانشمندان مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۳، ۱۴]. از این گذشته مقایسه‌ای میان برخی هندسه‌ها انجام شده است و مشخص شده است که لوله‌های الهام گرفته از اورینگامی بهتر از

1 Crash box

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: asgari@kntu.ac.ir



انجام گرفته است، همچنین سازه‌های پیشنهادی جدیدی به طور پیوسته توسط دانشمندان مختلف ارائه گردیده است، در این پژوهش با تکیه بر تاثیر پارامترهای هندسی بر روی جذب انرژی سازه‌ای با الهام از هنر اوریگامی و سازه‌های چند سلولی مطرح شد و براساس مشخصه‌های هندسی این سازه، پنج سازه متمایز طراحی گردید. همچنین این سازه‌های طراحی شده به روش ساخت افزودنی ساخته شد. در قسمت شبیه‌سازی المان محدود، با بهره‌گیری از اطلاعات حاصل از آزمایش ماده پلیمری اکریلونیتریل بوتادین استایرن^۱، این سازه‌ها شبیه‌سازی شده و سپس آزمایش تجربی بروی سازه‌های ساخته‌شده با سرعت یک میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت. بنابر نتایج حاصله و محاسبه مشخصه‌های جذب انرژی مشخص شد قابلیت جذب انرژی ویژه در این سازه‌ها در حدود دو برابر یک سازه ساده و غیر اوریگامی بوده است. در ادامه مطالعه پارامتری بر روی سازه‌ها انجام گرفت و تاثیر پارامترهای هندسی مورد ارزیابی قرار گرفت. در پایان روش ارزیابی تناسبی پیچیده استفاده گردید و بهترین سازه از میان سازه‌های مختلف مشخص شد.

۲- معرفی سازه‌ها و خواص آن

در پژوهش پیش‌رو با الهام‌گیری از الگوهای اوریگامی به منظور مطالعه رفتار این سازه‌ها در بحث جذب انرژی، چندین سازه در نظر گرفته شده است.

۲-۱- معرفی هندسه

به لحاظ هندسی مشخصه اصلی یک سازه اوریگامی نحوه تا کردن آن تا رسیدن به مدل نهایی می‌باشد و این الگوها وجه تمایز میان سازه‌های اوریگامی می‌باشد. شکل ۱، یک نمونه سلول واحد طراحی شده بر اساس هنر اوریگامی را نشان می‌دهد. به طور کلی شکل ۱ اساس تمامی سازه‌های اوریگامی این مطالعه را نشان می‌دهد. شکل ۱-الف الگوی باز شده این طراحی می‌باشد و لازم به ذکر است ضخامت تمامی این سلول‌ها برابر ۱/۲ میلی‌متر می‌باشد. همچنین شکل ۱-ب مدل تا شده این سلول می‌باشد.

به منظور مطالعه ویژگی‌های هندسی در سازه‌های اوریگامی استفاده شده در این پژوهش، از دو ویژگی هندسی e و π استفاده شده است که در شکل ۲-الف نشان داده شده است. به عنوان مثال برای یک سازه، اگر e که نسبت اندازه لبه کوتاه به لبه بزرگ سلول می‌باشد برابر 0.6 و π که تعداد آرایه سطری مطابق شکل ۲-ب می‌باشد برابر پنج در نظر گرفته شود، شکل ۲-پ بدست می‌آید که یک سازه اوریگامی می‌باشد و در این پژوهش مورد مطالعه قرار می‌گیرد. همچنین در این پژوهش ارتفاع کل سازه‌های

لوله‌های ساده عمل می‌کنند [۱۵-۱۷]. واژه اوریگامی یک واژه با ریشه ژاپنی می‌باشد که از ترکیب دو لغت "اوری" به معنای تا کردن و "گامی" به معنای کاغذ می‌باشد. اوریگامی به لحاظ شیوه اجرا به سه دسته اوریگامی، کیریگامی و اوریگامی مدولار تقسیم بندی می‌گردد. این سازه‌ها اکنون به عنوان یک منبع الهام بخش برای مهندسين در سایر شاخه‌های مختلف از جمله خودرو [۱۸] و دیگر شاخه‌ها [۱۹-۲۳] مورد توجه قرار گرفته است. سازه‌های اوریگامی به دلیل داشتن خواص مناسب هندسی باعث جلوگیری از بروز اثر برازیر^۱ در سازه‌ها می‌گردد. این اثر در هنگام خمش در سازه رخ می‌دهد و منجر به کاهش سطح مقطع عرضی شده و به کاهش انرژی جذب شده مخصوص و افزایش یکنواختی بار می‌گردد. شیژائو و همکارانش [۱۶] در سال ۲۰۲۰ به بررسی عددی و تجربی سازه‌های اوریگامی جاذب انرژی پرداختند و مشخص شد یک سازه اوریگامی به سبب کاهش بار بیشینه و افزایش بار میانگین می‌تواند یک گزینه مناسب برای جاذب‌های انرژی در تصادف باشد. در تحقیق دیگری یائو و همکارانش [۲۴] با بررسی هشتاد و پنج نمونه مختلف سازه ساده و اوریگامی اولاً نشان دادند که سازه اوریگامی در جذب انرژی بهتر عمل می‌کند و در ادامه مشخص کردند پارامترهایی نظیر مدول، زاویه و تعداد اضلاع می‌تواند بر روی جذب انرژی تاثیر زیادی بگذارند.

یکی دیگر از عوامل مهم در جذب انرژی و جعبه‌های تصادف زاویه نیروی برخورد می‌باشد. صدیقی و همکاران [۲۵] بر روی این مورد تحقیق کردند و نشان دادند بهترین حالتی که یک جعبه انرژی می‌تواند خواص جذب انرژی را از خود نشان دهد حالت بارگذاری عمودی می‌باشد و با افزایش زاویه رفته رفته این خواص جذب انرژی کاهش می‌یابد.

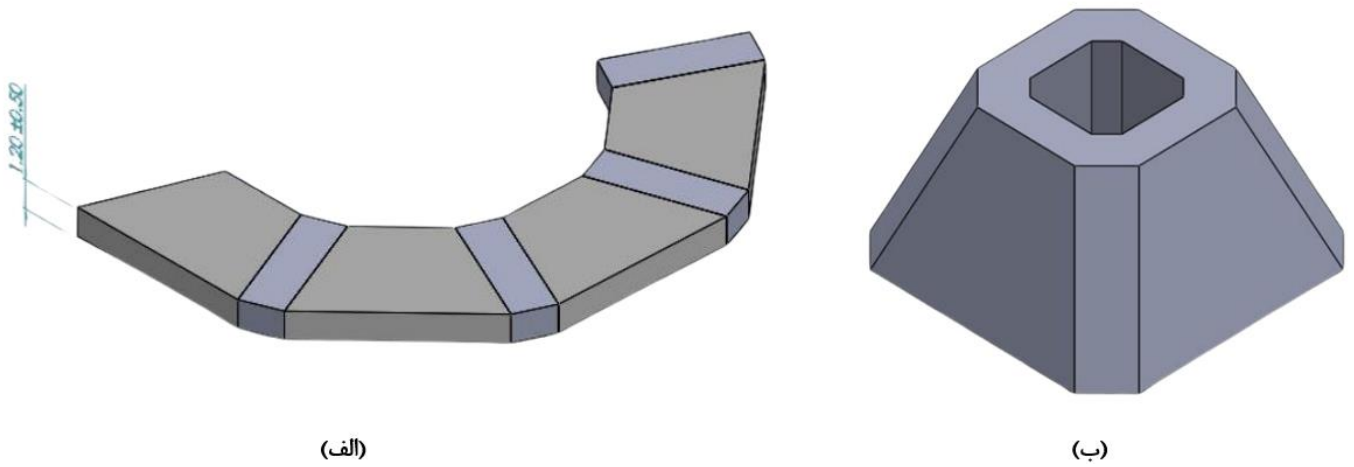
یکی از ابزارهای مهمی که می‌تواند به بهبود جذب انرژی و یافتن بهترین مدل‌ها کمک کند بهینه‌سازی می‌باشد به علاوه با رشد استفاده از ساخت افزودنی بحث بهینه‌سازی توپولوژی نیز مورد توجه قرار گرفته است [۲۶] برخی دیگر از مقالات با استفاده از شبکه‌های عصبی به دنبال پیش‌بینی خواص جذب انرژی مدل [۲۷] و بهینه‌سازی جذب انرژی مدل‌ها [۲۸] بوده‌اند. به طور کلی بهینه‌سازی یکی از ابزارهای مهمی است که مورد توجه قرار گرفته است [۲۹]. در همین حال برخی از مطالعات [۲۴، ۳۰] نشان دادند که مطالعه پارامتری و طبقه‌بندی به سازه‌ها با روش‌هایی مانند ارزیابی تناسبی پیچیده^۲ می‌تواند اطلاعات مفیدی را از سازه‌ها پیدا کند.

از آنجایی که مطالعه کمی روی ترکیب سازه‌های چند سلولی و اوریگامی

1 Brazier effect

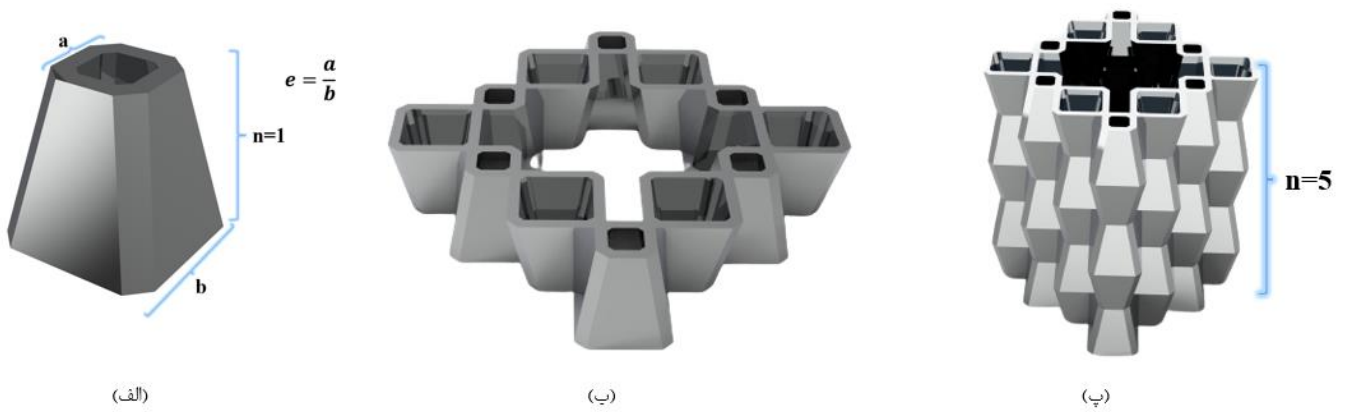
2 Complex proportional assessment (COPRAS)

3 Acrylonitrile butadiene styrene (ABS)



شکل ۱. الف) یک نمونه باز شده سلول اورینگامی ، ب) یک سلول واحد اورینگامی

Fig. 1. a) An unfolded sample of an origami cell ,b) A unit cell of an origami



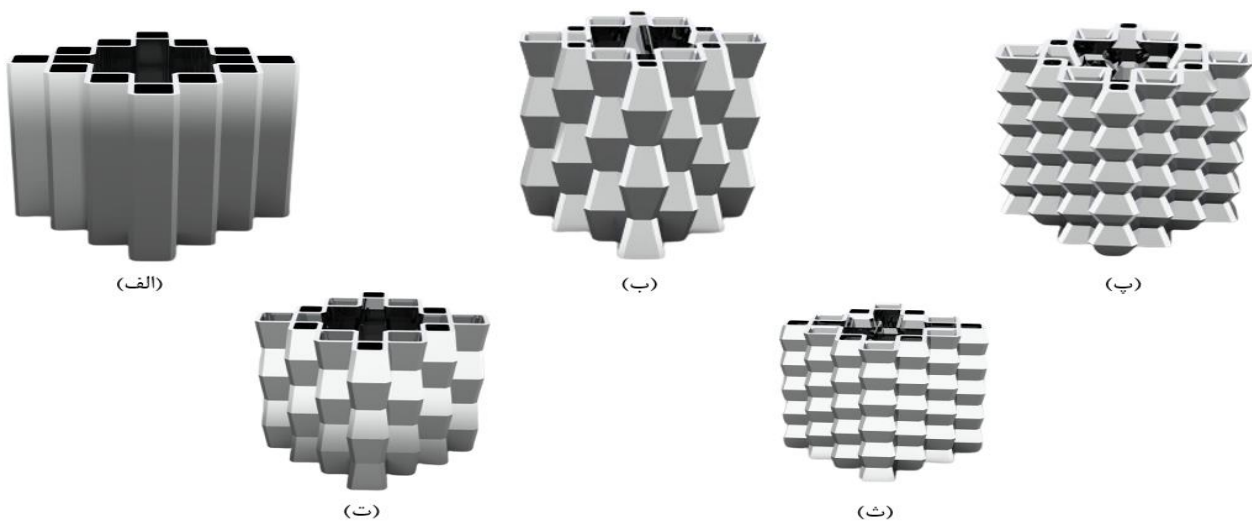
شکل ۲. الف) مشخصات یک سلول از الگوی اورینگامی، ب) یک آرایه سطری تکرار شده از الگوی الف، پ) یک نمونه سازی اورینگامی با ۵ آرایه سطری

Fig. 2. a) Characteristics of an origami cell, b) A repeated row array of the pattern from part (a), c) an origami sample with 5 row arrays

جدول ۱. مقادیر پارامترهای هندسی برای لوله‌های اورینگامی

Table 1. Geometric parameter values for origami tubular structures

ویژگی	تعداد سطح	مقادیر مورد آزمایش
e	۳	۰/۶ و ۰/۸ و ۱
n	۲	۵ و ۱۰



شکل ۳. الف) نمونه e1، ب) نمونه e0.6n5، پ) نمونه e0.6n10، ت) نمونه e0.8n5، ث) نمونه e0.8n10

Fig. 3. a) Sample e1, b) Sample e0.6n5, c) Sample e0.6n10, d) Sample e0.8n5, e) Sample e0.8n10

۲-۲- خواص سازه

فیلامنت استفاده شده ماده پلیمری ABS می‌باشد و میان مواد مطرح در روش پرینت سه بعدی به روش مدل‌سازی رسوب ذوبی^۱ (FDM) خواص مطلوب‌تری جهت بررسی جذب انرژی در آزمون فشار دارد [۳۱]. جدول ۲ خواص مکانیکی مربوط به این مواد را نشان می‌دهد. استخراج این خواص با استفاده از آزمون فشار که در شکل ۴-الف نمایش داده شده است و آزمون کشش که در شکل ۴-ب به آن اشاره شده است، انجام شد. به علت نزدیکی نتایج این آزمایش‌ها با پژوهش‌های گذشته [۳۲] از انجام مجدد برای تکرار

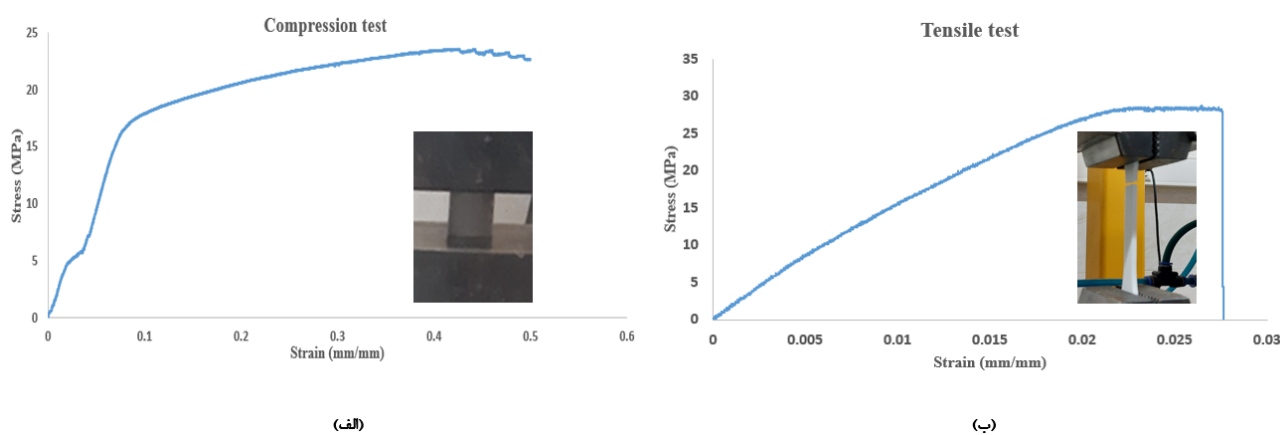
طراحی شده برابر ۵۰ میلی‌متر معین شد. نام‌گذاری سازه با این الگو با همین دو ویژگی انجام می‌گردد. به عنوان مثال همین سازه یاد شده با e0.6n5 نمایش داده می‌شود. سایر مقادیر و نسبت‌های این دو ویژگی در جدول ۱ نشان داده شده است. از آنجایی که طول همه سازه‌های طراحی شده برابر ۵ سانتی‌متر می‌باشد لذا با تغییر n از پنج به ده ارتفاع سلول در شکل ۲-الف تغییر می‌کند؛ پس بدیهی است که با این تفسیر دو مدل e1n10 و e1n5 کاملاً یکسان بوده و در نتیجه تنها یک سازه با نام e1 برای آنها معرفی شد. پنج مدل اورینگامی طراحی شده برای این پژوهش با توجه به مقادیر موجود در جدول ۱ در شکل ۳ نمایش داده شده است.

1 Fused deposition modeling (FDM)

جدول ۲. خواص مکانیکی ماده ABS

Table 2. Mechanical properties of printed ABS filament

نسبت پواسون [۳۳]	تنش تسلیم (MPa)	مدول یانگ (MPa)	چگالی (g/cm ³) [۳۴]
۰/۳۵	۱۶/۶۵	۱۰۰۴/۲	۱/۰۴۰



شکل ۴. الف) نمودار آزمون تنش-کرنش نمونه تحت فشار، ب) نمودار آزمون تنش-کرنش نمونه تحت کشش

Fig. 4. a) Stress-strain curve of the sample under compression, b) Stress-strain curve of the sample under tension

نشان می‌دهد، با این حال نمی‌تواند به عنوان یک معیار قابل ارزیابی برای مقایسه نمونه‌ها انتخاب شود. به همین دلیل از معیاری به نام جذب انرژی ویژه^۱ استفاده می‌گردد که رابطه (۲) آن را نشان می‌دهد [۳۵].

$$E_{absorption} = \int_0^x F dx \quad (1)$$

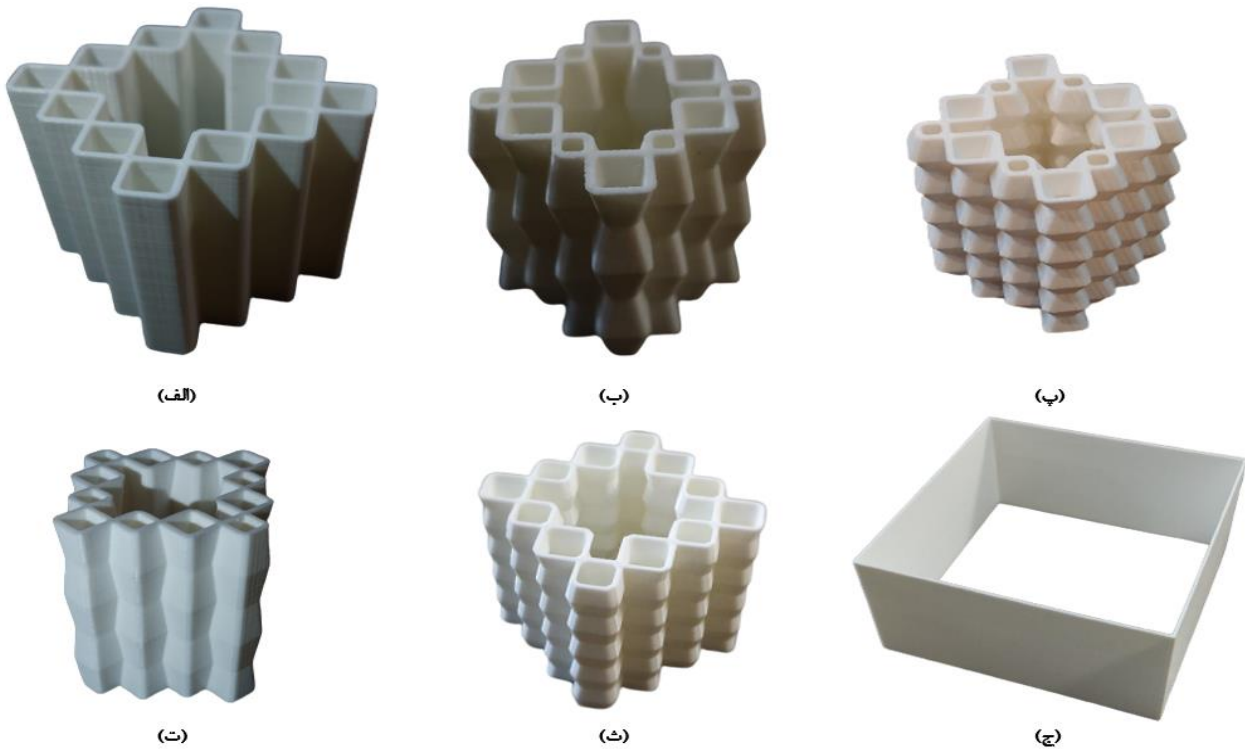
$$SEA = \frac{E_{absorption}}{Mass} \quad (2)$$

پذیری صرف نظر گردیده است و به نتایج قبلی بسنده شده است. لازم به ذکر است در این پژوهش از داده‌های آزمون فشار در مطالعات عددی استفاده شده است.

۲-۳- ویژگی‌های جذب انرژی

به هدف مطالعه خواص جذب انرژی در سازه، سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی، میزان انرژی در تغییر شکل را نشان می‌دهد که رابطه (۱) به آن اشاره می‌کند. در این رابطه، F میزان نیرویی است که در مکان x در حین جابجایی ثبت می‌گردد. اگرچه این رابطه یک ویژگی مهم در جذب انرژی را

1 Specific energy absorption (SEA)



شکل ۵. نمونه‌های ساخته شده به روش پرینت سه بعدی: الف) نمونه e1n5، ب) نمونه e0.6n5، پ) نمونه e0.6n10، ت) نمونه e0.8n5، ث) نمونه e0.8n10، ج) نمونه غیر اورینگامی

Fig. 5. Samples made by 3D printing method: a) Sample e1n5, b) Sample e0.6n5, c) Sample e0.6n10, d) Sample e0.8n5, e) Sample e0.8n10, f) Non-origami Sample

عددی، سازه به میزان هشتاد درصد طول اولیه خود تحت فشار محوری قرار می‌گیرد و می‌توان چنین بیان کرد که از آنجا که ارتفاع تمامی سازه‌های این مطالعه برابر پنج سانتی متر می‌باشند لذا در این آزمایش‌ها مدل‌ها به میزان چهار سانتی‌متر تحت فشار محور قرار می‌گیرند.

۲-۴- ساخت

نمونه‌های حاضر به دلیل دارا بودن پیچیدگی هندسی، به روش ساخت افزودنی ساخته شده است. این سازه‌ها با استفاده از دستگاه پرینت سه بعدی VANDAR 350 DE-HC ساخته شده و حداکثر سرعت پرینت این دستگاه برابر شصت میلی‌متر بر ثانیه با دقت یک صدم می‌باشد نمونه‌ها در این پژوهش همگی با سرعت شصت میلی‌متر بر ثانیه با حجم پرشدگی صد در صد ساخته شدند. همچنین قطر رشته برابر ۱,۷۵ سانتی‌متر می‌باشد. به علاوه به منظور مقایسه میان سازه‌های اورینگامی و غیر اورینگامی یک لوله جدارنازک نیز به همین روش ساخته شد. شکل ۵ نمونه‌های ساخته شده به روش پرینت سه بعدی را نشان می‌دهد.

در رابطه (۲)، $mass$ ، جرم سازه مورد آزمایش می‌باشد. کارایی نیروی فشار^۱ یک معیار دیگر در بررسی جاذب‌های انرژی می‌باشد که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است و در رابطه (۳) به آن اشاره گردیده است [۳۶].

$$CFE = \frac{F_{mean}}{IPF} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، F_{mean} ، نیروی میانگین و برابر انرژی جذب شده بر واحد مسافت له شده می‌باشد و رابطه (۴) به آن اشاره دارد. همچنین IPF ، نیروی حداکثر مورد نیاز برای آغاز مرحله تغییر شکل در سازه می‌باشد.

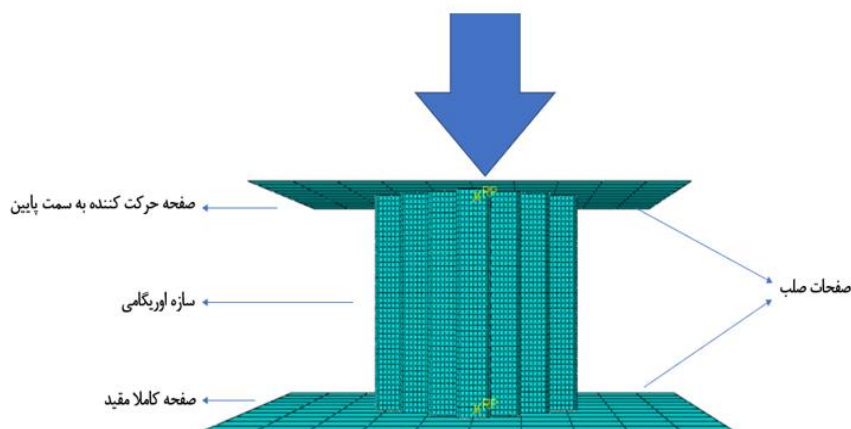
$$F_{mean} = \frac{E_{absorption}}{x} \quad (4)$$

لازم به ذکر است که در این پژوهش، در تمامی آزمایش‌های تجربی و

1 Crash Force Efficiency (CFE)



(الف)



(ب)

شکل ۶. نحوه قرارگیری مدل برای آزمایش شبه استاتیک (الف) آزمایش تجربی، (ب) آزمایش المان محدود

Fig. 6. Display of model positioning for quasi-static testing a) Experimental test, b) Finite element analysis test

مدل سازی از حلگر صریح استفاده شده است. و بارگذاری به صورت جابجایی و با نرخ ثابت تعریف گردید. همچنین آزمون همگرایی شبکه انجام شد و نتایج آن در شکل ۷ آمده است. مطابق این نتیجه شبکه 0.8 میلی متری مورد استفاده قرار می گیرد که بر این اساس برای سازه های معرفی شده یکصد و بیست هزار المان را تولید می کند. در ادامه در محیط اندرکنش نرم افزار، قیدهای تماسی بین سطوح تعریف شد و ضریب اصطکاک میان سطوح صلب و سازه اورینگامی برابر 0.25 و میان سطوح خود سازه نیز 0.2 تعریف گردید. [۳۷].

جدول ۳ جرم سازه های ساخته شده و طراحی شده جهت شبیه سازی را نشان می دهد. علت تفاوت های میان جرم سازه ساخته شده با جرم مدل ها در نرم افزار اشکالات ساخت می باشد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج عددی و تجربی نمونه ها

در این بخش به بررسی خواص جذب انرژی مدل های معرفی شده پرداخته می شود. در ابتدا به بررسی نمودار نیرو-جابجایی و روند تخریب ۵ سازه اورینگامی معرفی شده در این پژوهش پرداخته می گردد. همانگونه که در شکل ۸ تا شکل ۱۲ مشاهده می شود، روند فشرده شدن در این سازه ها

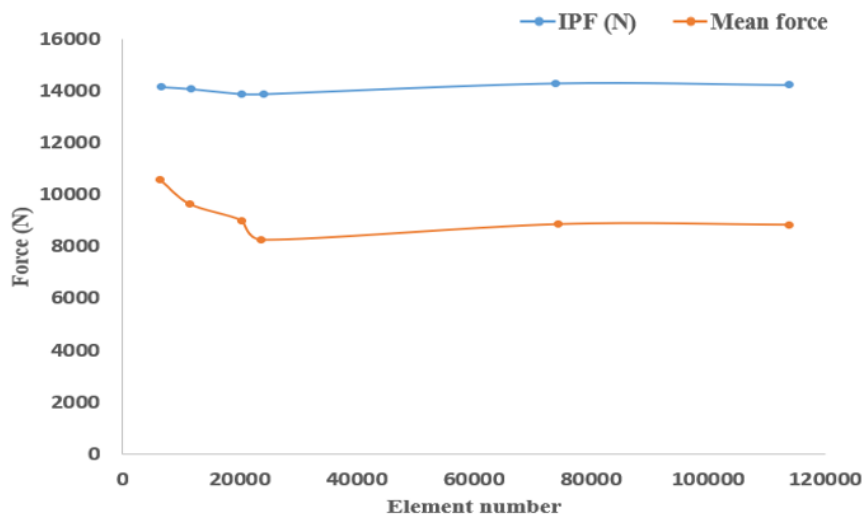
۲-۵- آزمایش تجربی

به منظور بررسی جذب انرژی، آزمایش تجربی به وسیله آزمایش فشار محوری تحت سرعت ثابت یک میلی متر بر دقیقه صورت گرفته است لازم به ذکر است آزمون فشار نمونه برای استخراج خواص در شکل ۴-ب نیز با همین سرعت انجام گرفته است. با این دلیل سرعت پایین می توان این آزمایش ها را شبه استاتیک در نظر گرفت. این آزمایش با دستگاه آزمون فشار، کشش و خمش یونیورسال کوپا انجام شد. شکل ۶-الف نحوه قرارگیری نمونه ها در دستگاه آزمایش را نشان می دهد.

۲-۶- مدل سازی المان محدود

به منظور شبیه سازی شبه استاتیک سازه های اورینگامی از نرم افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شده است. شکل ۶-ب تصویری گویا از اجزای بکار رفته در این مدل سازی را نشان می دهد.

مطابق شکل ۶-ب سازه های آزمایش میان دو صفحه صلب قرار گرفته اند و صفحه پایینی به طور کامل مقید شده است. و صفحه بالا در جهت پایین به آرامی حرکت کرده و فرآیند خرد شدن محوری انجام می شود. به منظور انجام



شکل ۷.۷. آزمون حساسیت شبکه

Fig. 7. analysis Mesh sensitivity

جدول ۳. جرم مدل‌های اوریگامی

Table 3. Mass of the origami models

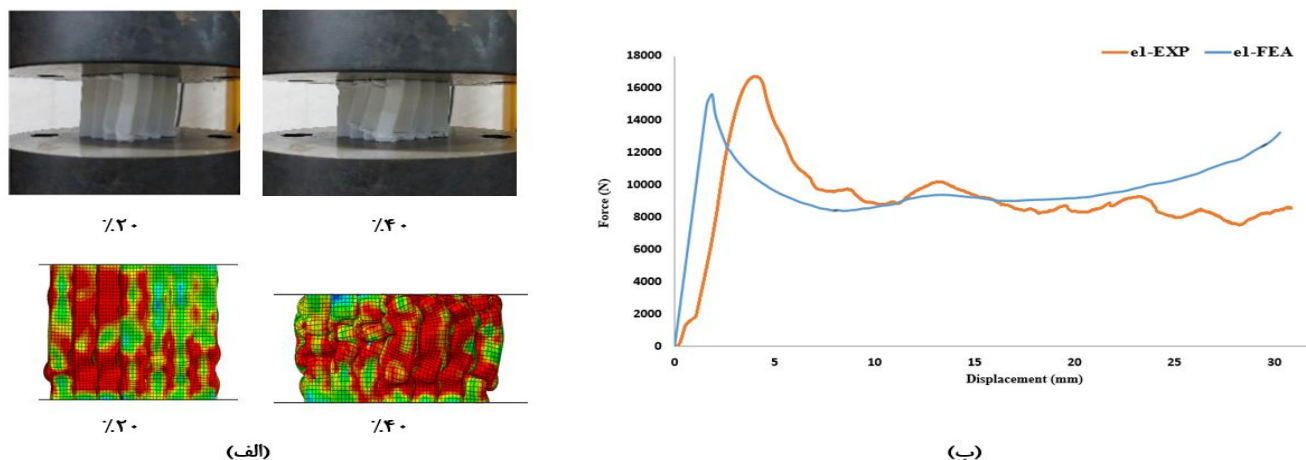
e1	e0.6n5	e0.6n10	e0.8n5	e0.8n10	e0.8n10	نمونه
۲۴/۳۶	۱۸/۶۳	۱۹/۳۹	۲۱/۰۵	۲۰/۸۸	۲۰/۸۸	جرم مدل ساخته شده (g)
۲۶/۷۸	۲۰/۷۱	۲۱/۷۹	۲۳/۶۶	۲۴/۰۱	۲۴/۰۱	جرم مدل در نرم‌افزار (g)
۹/۰۳	۱۰/۰۴	۱۱/۰۱	۱۱/۰۳	۱۳/۰۳	۱۳/۰۳	اختلاف (%)

و به همین دلیل در این پژوهش سعی شد تا این قسمت‌ها حذف شوند و نتایج تا بیست و پنج میلی‌متر فشرده شدن بررسی گردد تا به میزان موثرتری نتایج پارامترهای جذب انرژی بررسی گردد. همانگونه که در جداول ۴ تا ۹ مشاهده می‌گردد، عمده خطا میان نتایج تجربی و عددی برای هر سازه در جذب انرژی کل می‌باشد اما همانطور که در جدول ۳ نیز بیان گردید به دلیل اشکالات ساخت، جرم سازه در نرم‌افزار و واقعیت از هم متفاوت است؛ این موضوع جایی بیشتر خود را نشان می‌دهد که درصد خطا در انرژی جذب شده ویژه بسیار کم و در حد کمتر از ۶ درصد می‌باشد که این نشان می‌دهد اگر تفاوت جرم دو سازه کمتر می‌شد عمدتاً خطای کمتری نیز میان جذب انرژی

میان آزمایش تجربی و عددی تشابه قابل قبولی دارد که در ادامه بیشتر مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه در شکل ۱۳ نمودار نیرو-جابجایی و روند تخریب لوله ساده غیر اوریگامی به منظور مقایسه میان سازه‌های اوریگامی و غیر اوریگامی نشان داده‌است؛ همانگونه که می‌توان دید این نمونه غیر اوریگامی پس از حدود ۶ میلی‌متر به طور کلی دچار شکست می‌شود.

همانگونه که در بخش‌های قبل بیان گردید، نمونه‌های حاضر در این پژوهش به میزان چهار سانتی‌متر تحت فشار محوری قرار می‌گیرند. با این حال در مراحل انتهایی بسیار فشرده شده و به اصلاح متراکم^۱ خواهند شد

1 Densification



شکل ۸. الف) روند خرد شدن نمونه e1 ب) نمودار نیرو-جابجایی نمونه e1

Fig. 8. a) Crushing process of sample e1, b) Force-displacement diagram of sample e1

جدول ۴. نتایج تجربی و عددی معیارهای جذب انرژی نمونه e1

Table 4. Numerical and experimental results of sample e1

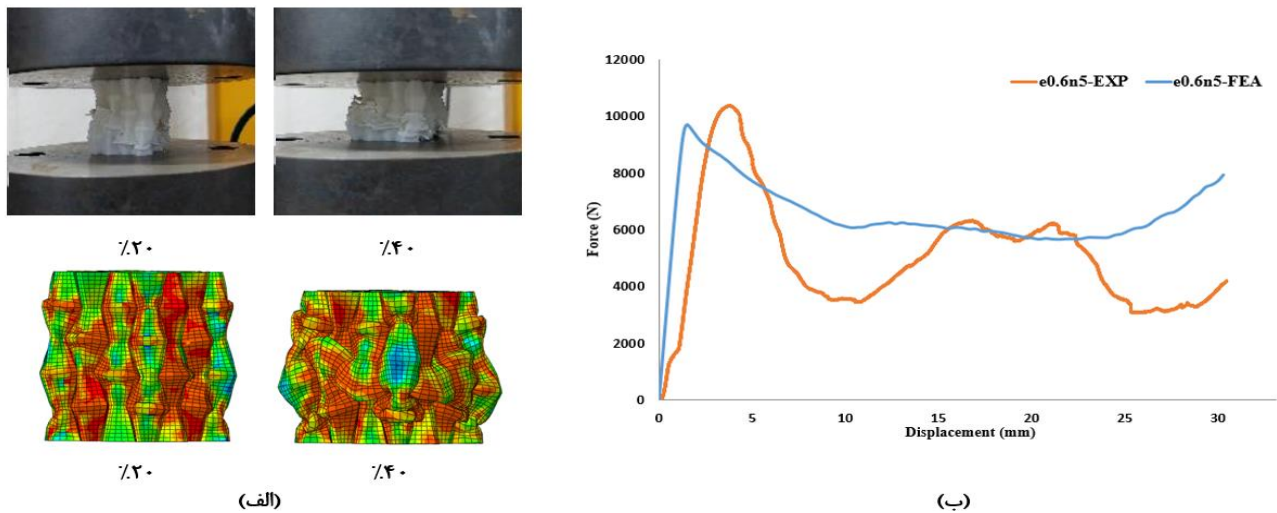
کارایی نیروی فشار	نیروی میانگین (KN)	اوج نیروی اولیه (KN)	انرژی جذب شده ویژه (J/gr)	انرژی جذب شده (J)	
۰/۶۹	۱۰/۷۶	۱۵/۵۸	۱۴/۰۲	۳۷۶/۷۵	نتایج شبیه‌سازی
۰/۵۳	۸/۹۶	۱۶/۷۲	۱۳/۳۲	۳۱۳/۷۸	نتایج آزمایشگاهی
۲۳/۱۸	۱۶/۷۲	۶/۸۱	۴/۹۹	۱۶/۷۱	خطا %

سازه در مراحل پایانی فشرده‌سازی مقادیر تجربی و عددی در این مراحل از یکدیگر فاصله گرفته و به همین دلیل نیز نتایج تا بیست و پنج میلی‌متر ابتدایی در نظر گرفته شد. شکل ۸-الف روند تغییر شکل سازه را نشان می‌دهد که می‌توان دید روند تغییر شکل در نتایج عددی و آزمایشگاهی به یکدیگر نزدیک است.

مطابق آنچه برای نمونه e1 بیان گردید، این نمونه نیز در مراحل پایانی به دلیل متراکم شدن، نتایج عددی و تجربی از یکدیگر فاصله دارند. به علاوه خطای بالا پس از قله نمودار تا پانزده میلی‌متری سازه دلایل مختلفی می‌تواند داشته باشد. محتمل‌ترین دلیل برای این تفاوت می‌تواند لغزش بیش از حد نمونه بین دو فک بالایی و پایینی دستگاه آزمون فشار دارد. به علاوه

کل مشاهده می‌شد. در کنار این بحث زمانی که نیروی بیشینه اولیه میان دو آزمایش تجربی و المان محدود بررسی می‌گردد، خطای کمی مشاهده می‌شود. به طور کلی در مقایسه میان آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی خطا وجود دارد و این خطا می‌تواند به دلایل مختلفی از جمله خطا حین ساخت نمونه‌ها، زاویه پرینت و یا وجود هوا در لایه‌های پرینت باشد که از جمله موارد غیر قابل اجتناب می‌باشد.

همانگونه که از شکل ۸-ب مشاهده می‌گردد نمودار نیرو-جابجایی حکایت از تطابق قابل قبول نتایج در نیروی حداکثر اولیه و ناحیه فلاتی دارد. جدول ۴ مقادیر اندازه‌گیری شده از این نمودار برای نمونه e1 را نشان می‌دهد. با این حال چنانچه قبلاً نیز بیان گردید به دلیل متراکم شدن



شکل ۹. الف) روند خرد شدن نمونه e0.6n5 (ب) نمودار نیرو-جابجایی نمونه e0.6n5

Fig. 9. a) Crushing process of sample e0.6n5, b) Force-displacement diagram of sample e0.6n5

جدول ۵. نتایج تجربی و عددی نمونه e0.6n5

Table 5. Numerical and experimental results of sample e0.6n5

کارایی نیروی فشار	نیروی میانگین (KN)	اوج نیروی اولیه (KN)	انرژی جذب شده ویژه (J/gr)	انرژی جذب شده (J)	
۰/۶۶	۶/۴۳	۹/۶۹	۷/۷۶	۱۶۰/۸۲	نتایج شبیه‌سازی
۰/۵۲	۵/۴۰	۱۰/۳۶	۷/۶۷	۱۳۵/۰۸	نتایج آزمایشگاهی
۲۱	۱۶/۰۱	۶/۴۶	۱/۱۵	۱۶/۰۰	خطا %

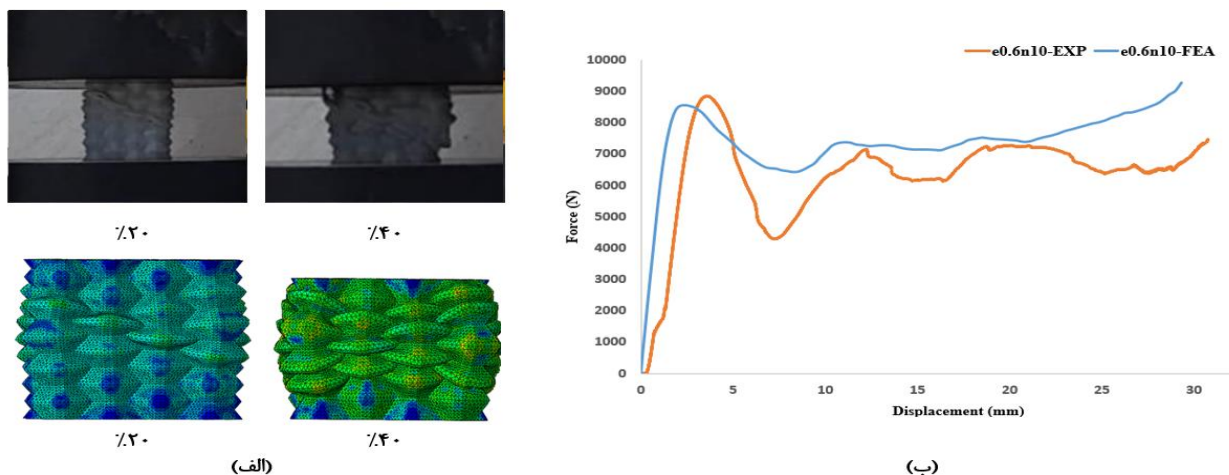
e0.8n10 را نشان می‌دهد.

همانطور که قبلاً نیز بیان گردید به منظور انجام مقایسه میان سازه‌های اورینگامی و غیر اورینگامی یک نمونه ساده طراحی و ساخته شد. شکل ۱۳-ب نمودار نیرو جابجایی این سازه را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است به دلیل اینکه این سازه صرفاً برای انجام یک مقایسه طراحی شده است از ارائه نتایج شبیه‌سازی عددی صرف نظر شده است. با این حال نتایج آزمایش تجربی این سازه در جدول ۹ آورده شده است.

از دقت در نتایج حاصل از شکل ۸ تا شکل ۱۳ همانند مطالعات دیگر، سازه‌های اورینگامی در این پژوهش در مقایسه با سازه جدارنازک ساده جذب انرژی بسیار بالاتری دارند همچنین سازه‌های دیگر نیز بسیار به هندسه

مطابق شکل ۹-الف همانطور که مشاهده می‌گردد روند تخریب تطابق قابل قبولی دارد. جدول ۵ نتایج آزمون تجربی و عددی را نشان می‌دهد.

چنانچه از شکل ۱۰-ب مشخص می‌باشد نیروی حداکثر اولیه و ناحیه فلاتی در این سازه تطابق قابل قبولی دارد. به علاوه مطابق شکل ۱۰-الف نیز روند تخریب در دو آزمایش در ابتدای فشردگی شباهت دارند. جدول ۶ نتایج عددی و تجربی سازه e0.6n10 را نشان می‌دهد. در مورد روند تخریب در سازه‌های بعدی نیز می‌توان نتایج مشابهی را بیان کرد. همچنین مطابق دلیلی که برای عدم تطابق در بازه پنج تا پانزده میلی‌متری سازه e0.6n5 می‌توان برای سازه e0.8n10 نیز همین علت را بیان کرد. جدول ۷ و جدول ۸ به ترتیب نتایج عددی و تجربی سازه‌های e0.8n5 و



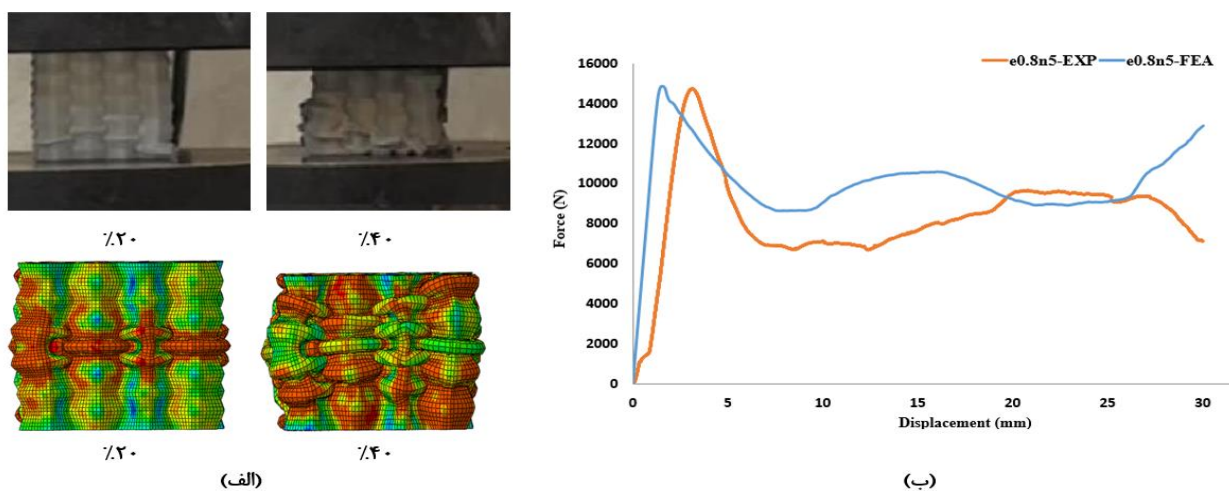
شکل ۱۰. الف) روند خردشدن نمونه e0.6n10 (ب) نمودار نیرو-جابجایی نمونه e0.6n10

Fig. 10. a) Crushing process of sample e0.6n10, b) Force-displacement diagram of sample e0.6n10

جدول ۶. نتایج تجربی و عددی نمونه e0.6n10

Table 6. Numerical and experimental results of sample e0.6n10

کارایی نیروی فشار	نیروی میانگین (KN)	اوج نیروی اولیه (KN)	انرژی جذب شده ویژه (J/gr)	انرژی جذب شده (J)	
۰/۸۳	۷/۱۲	۸/۵۵	۸/۱۷	۱۷۸/۰۵	نتایج شبیه سازی
۰/۷۰	۶/۲۲	۸/۸۴	۸/۰۲	۱۵۵/۶۸	نتایج آزمایشگاهی
۱۵/۶۶	۱۲/۶۴	۳/۲۸	۱/۸۳	۱۲/۵۶	خطا %



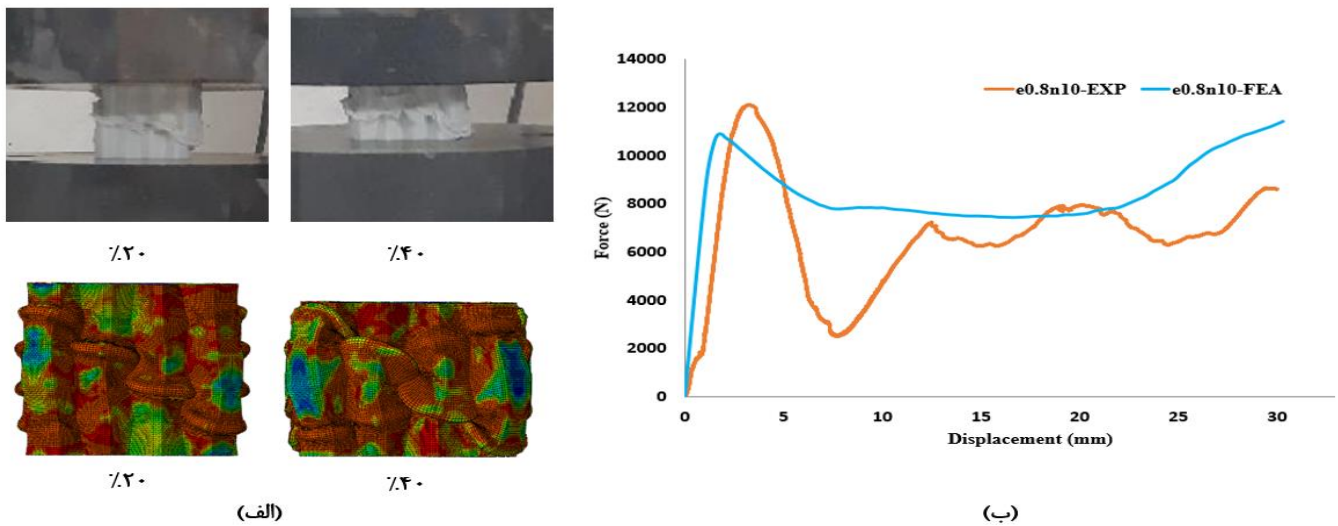
شکل ۱۱. الف) روند تخریب نمونه e0.8n5 (ب) نمودار نیرو-جابجایی نمونه e0.8n5

Fig. 11. a) Crushing process of sample e0.8n5 b) Force-displacement diagram of sample e0.8n5

جدول ۷. نتایج تجربی و عددی نمونه e0.8n5

Table 7. Numerical and experimental results of sample e0.8n5

کارایی نیروی فشار	نیروی میانگین (KN)	اوج نیروی اولیه (KN)	انرژی جذب شده ویژه (J/gr)	انرژی جذب شده (J)	
۰/۶۶	۹/۹۰	۱۴/۸۶	۱۰/۴۶	۲۴۷/۳۸	نتایج شبیه‌سازی
۰/۵۶	۸/۲۸	۱۴/۷۳	۹/۸۳	۲۰۷/۰۸	نتایج آزمایشگاهی
۱۵/۱۵	۱۶/۳۶	۰/۸۷	۶/۰۲	۱۶/۲۹	خطا %



شکل ۱۲. الف) روند تخریب نمونه e0.8n10 (ب) نمودار نیرو-جابجایی نمونه e0.8n10

Fig. 12. a) Crushing process of sample e0.8n10 b) Force-displacement diagram of sample e0.8n10

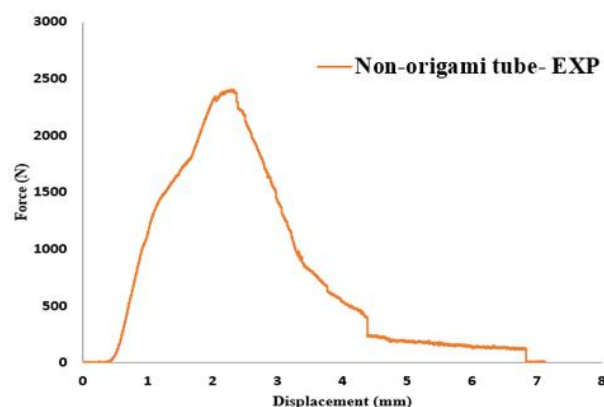
جدول ۸. نتایج تجربی و عددی نمونه e0.8n10

Table 8. Numerical and experimental results of sample e0.8n10

کارایی نیروی فشار	نیروی میانگین (KN)	اوج نیروی اولیه (KN)	انرژی جذب شده ویژه (J/gr)	انرژی جذب شده (J)	
۰/۷۲	۷/۹۵	۱۰/۹۰	۸/۲۸	۱۹۸/۷۷	نتایج شبیه‌سازی
۰/۵۳	۶/۵۳	۱۲/۱۰	۷/۸۲	۱۶۳/۴۸	نتایج آزمایشگاهی
۲۶/۳۸	۱۷/۸۶	۹/۹۱	۵/۵۵	۱۷/۷۹	خطا %



(الف)



(ب)

شکل ۱۳. الف) روند خرد شدن سازه غیر اوریگامی ب) نمودار نیرو-جابجایی سازه غیر اوریگامی

Fig. 13. a) The crushing process of non-origami sample b) Force-displacement diagram of non-origami sample

جدول ۹. نتایج تجربی و عددی نمونه غیر اوریگامی

Table 9. Numerical and experimental results of non-origami sample

کارایی نیروی فشار	نیروی میانگین (KN)	اوج نیروی اولیه (KN)	انرژی جذب شده ویژه (J/gr)	انرژی جذب شده (J)	نتایج شبیه سازی
۰/۳۱	۰/۷۹	۲/۴۸	۰/۳۶	۵/۵۴	

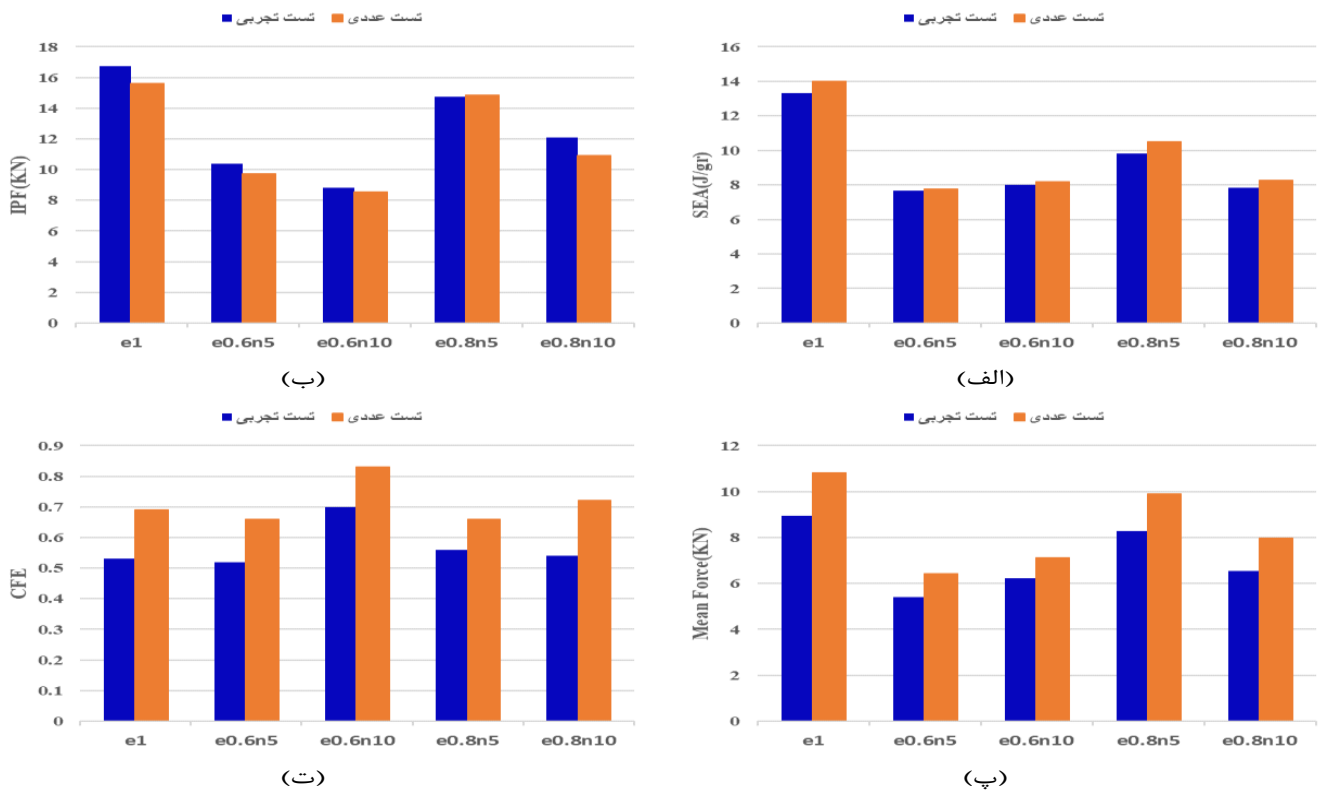
این منظور می‌توان از روش طراحی آزمایش‌ها استفاده کرد. اگرچه تاثیر این پارامترها بر روی جذب انرژی غیرخطی می‌باشد و باید از رگرسیون غیر خطی استفاده شود اما در این مطالعه صرفاً به مطالعه روند رفتاری این سازه‌ها بسنده می‌گردد لذا از یک مدل خطی برای آن استفاده می‌شود. برای انجام این کار از نرم‌افزار مینی‌تب استفاده می‌گردد بدین صورت که مطابق جدول ۱ پارامتر e در سه سطح و پارامتر n در دو سطح مورد آزمایش قرار می‌گیرد. در ابتدا به منظور مطالعه‌ای بر روند تغییرات e در جذب انرژی ویژه همانگونه که در شکل ۱۵ مشاهده می‌گردد، با افزایش مقدار e جذب انرژی بیشتری کسب می‌گردد. به عبارتی دیگر هرچه اندازه چین‌خوردگی عرضی در مدل کمتر باشد جذب انرژی در مدل بیشتر خواهد بود. همچنین با مطالعه روند جذب انرژی با تغییرات n مشاهده می‌گردد هرچه تعداد چین‌خوردگی‌ها نیز کمتر باشد جذب انرژی بالاتر خواهد بود. در ادامه از سایر قسمت‌های

وابسته هستند و با تغییر پارامترهای هندسی جذب انرژی تغییر می‌یابد [۳۸، ۳۹].

در ادامه در شکل ۱۴ نمودارهای مربوط به پارامترهای جذب انرژی برای هر نمونه را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌گردد نمونه $e1$ در جذب انرژی ویژه بهترین مقدار را در مقایسه با بقیه نمونه‌ها کسب کرده است. با این حال این شکل معیار مناسبی برای تشخیص بهترین نمونه در جذب انرژی را نشان نمی‌دهد و تنها مقدار هر پارامتر را نشان خواهد داد.

۳-۲- مطالعه پارامتری

همانطور که از نتیجه‌های آزمایش سازه‌های پیشنهادی در قسمت قبل مشخص شد، اثر ویژگی‌های هندسی معرفی شده تاثیر زیادی بر جذب انرژی دارند. در این بخش به بررسی تاثیر دو پارامتر e و n پرداخته می‌شود. برای



شکل ۱۴. ویژگیهای جذب انرژی نمونه های اورینگامی؛ الف)SEA ب)Peak Force پ) Mean Force ت)CFE

Fig. 14. Energy absorption parameters of origami samples; a)SEA b)Peak Force c)Mean Force d)CFE

انرژی جذب شده ویژه، نیروی میانگین و انرژی بیشینه اولیه انتخاب می گردد و بر اساس آن ماتریس تصمیم مطابق رابطه (۵) تشکیل می گردد [۴۱].

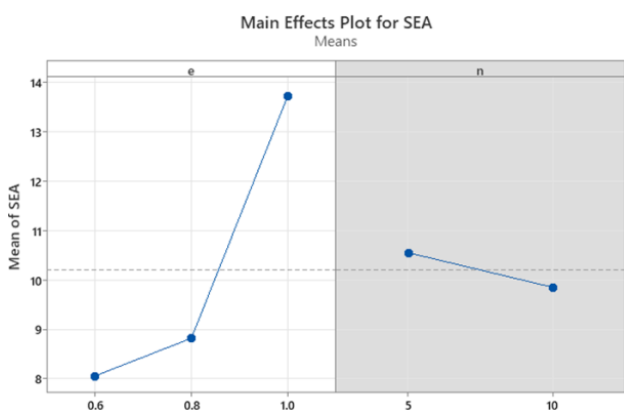
$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

با این حال رابطه (۵) نیازمند نرمال سازی می باشد تا بی مقیاس سازی انجام شود. در روش ارزیابی تناسبی پیچیده نرمال سازی به روش خطی مطابق رابطه زیر صورت می گیرد.

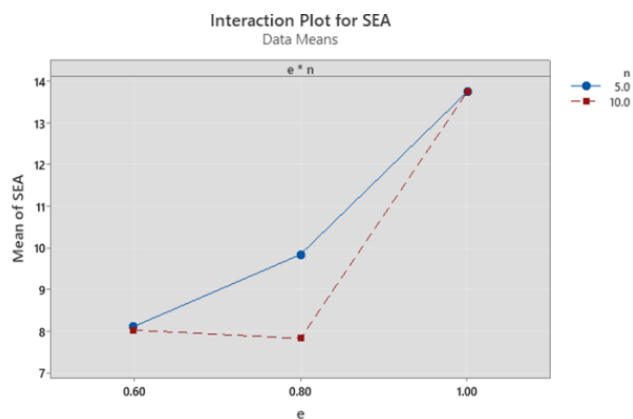
$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum x_{ij}} \quad (6)$$

شکل ۱۵ می توان استنباط کرد که سایر پارامترهای جذب انرژی نیز همین روند را تکرار می کنند و هرچه اندازه چین های عرضی کمتر شود سایر این ویژگی های جذب انرژی روند صعودی دارند. باز همانگونه که در شکل های ۱۵-ب و ۱۵-ت و ۱۵-ج مشاهده می شود تنها در جذب انرژی میانگین اندرکنشی میان دو پارامتر Π و e وجود دارد. روند رفتاری نمودارهای شکل ۱۵ به خوبی با روند رفتاری مطالعات گذشته مطابقت دارد [۳۶].

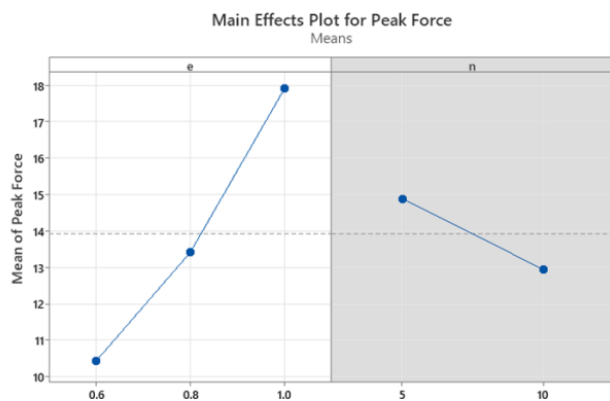
با این تفاسیر اگرچه می توان درک کرد که روند جذب انرژی چگونه در هر مدل افزایش می یابد با این حال می توان با استفاده از روش ارزیابی تناسبی پیچیده (کوپراس) بهترین سازه از میان این ۵ سازه اورینگامی را یافت [۴۰]. در حقیقت این روش یک روش ساده و کاربردی برای ارزیابی و انتخاب بهترین گزینه از میان چندین گزینه مختلف بکار می رود، بدین صورت که ابتدا چندین معیار که در این مطالعه معیارهای جذب انرژی یعنی



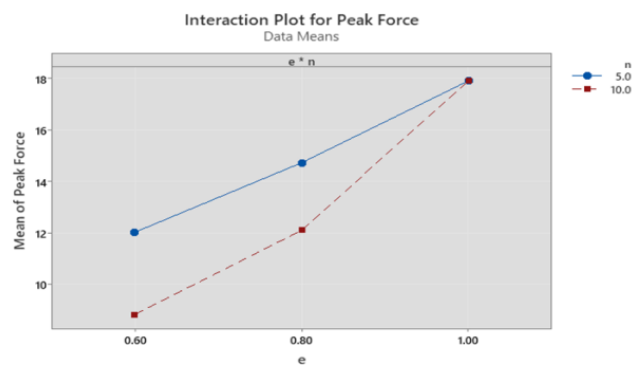
(ا)



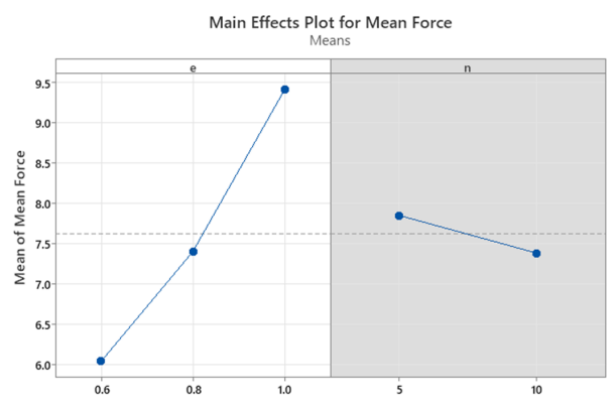
(ب)



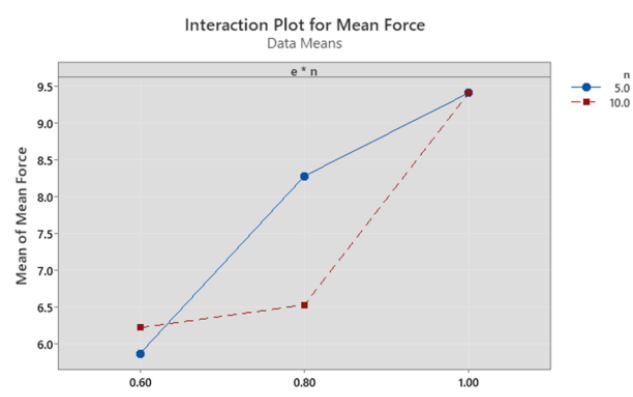
(پ)



(ت)



(ث)



(ج)

شکل ۱۵. نتایج مطالعه پارامتری؛ الف) انرژی جذب شده ویژه، ب) اندرکنش دو ویژگی در جذب انرژی ویژه، پ) حداکثر نیروی اولیه، ت) اندرکنش دو ویژگی در حداکثر نیرو اولیه، ث) نیروی میانگین، ج) اندرکنش دو ویژگی در نیرو میانگین

Fig. 15. The results of parametric study; a)SEA, b)Interaction between parameters for SEA, c)IPF, d) Interaction between parameters for IPF, e)Mean Force, f)Interaction between parameters for Mean Force

جدول ۱۰. ارزیابی تناسبی پیچیده برای سازه‌های اوریگامی

Table 10. Complex proportional assessment (COPRAS) for the origami samples

رتبه	U _i		Q _i		C _i		B _i		نام نمونه اوریگامی	
	تجربی	عددی	تجربی	عددی	تجربی	عددی	تجربی	عددی		
۱	۱	۱	۱	۰/۲۰۲۵	۰/۱۹۶۶	۰/۰۷۸۶۲	۰/۰۷۹۹۳	۰/۱۹۶۳	۰/۱۹۰۱	e1
۵	۵	۰/۵۷۲۹	۰/۵۸۷۶	۰/۱۱۶۰	۰/۱۱۵۵	۰/۰۴۸۹۰	۰/۰۴۹۵۲	۰/۱۱۲۲	۰/۱۱۱۵	e0.6n5
۴	۴	۰/۶۱۲۷	۰/۶۳۵۲	۰/۱۲۴۰	۰/۱۲۴۸	۰/۰۴۳۱۵	۰/۰۴۲۲۶	۰/۱۲۰۷	۰/۱۲۱۵	e0.6n10
۲	۲	۰/۷۳۵۵	۰/۸۱۴۵	۰/۱۴۸۹	۰/۱۶۰۱	۰/۰۷۴۳۳	۰/۰۷۰۴۱	۰/۱۴۳۱	۰/۱۵۴۵	e0.8n5
۳	۳	۰/۶۵۲۲	۰/۶۴۶۳	۰/۱۳۲۰	۰/۱۳۷۰	۰/۰۵۵۰۰	۰/۰۵۷۸۸	۰/۱۲۷۷	۰/۱۲۲۴	e0.8n10

۰/۳ و ۰/۴ و پارامتر نیروی بیشینه اولیه به عنوان پارامتر مضر با وزن ۰/۳ استفاده شده‌است. در ادامه Q_i به عنوان رابطه‌ای برای بیان توصیف مقادیر حاصل از دو رابطه (۸) و (۹) به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$Q_i = B_i + \frac{\min(C_i) \times \sum(C_i)}{C_i \times \sum \frac{\min(C_i)}{C_i}} \quad (10)$$

پس از آن در رابطه (۱۰) برای بدست آوردن ترتیب از بهترین به بدترین مدل در جذب انرژی می‌توان نوشت:

$$U_i = \frac{Q_i}{Q_{\max}} \quad (11)$$

همانطور که از جدول ۱۰ مشخص می‌باشد، نمونه e1 بهترین سازه برای جذب انرژی می‌باشد. همچنین نکته حائز اهمیت در جدول ۱۰ مربوط به دو نمونه e0.6n5 و e0.6n10 می‌باشد. اگر براساس نتایج مربوط به مطالعه پارامتری بررسی گردد قاعدتا باید نمونه e0.6n5 جذب انرژی

مطابق رابطه (۶) کافی است جمع اعداد مربوط به هر معیار محاسبه گردد سپس مقدار هر درایه از بر مجموع اعداد آن معیار تقسیم گردد و در نتیجه ماتریس زیر تشکیل می‌گردد.

$$N = \begin{bmatrix} n_{11} & \dots & n_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ n_{m1} & \dots & n_{mn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

همچنین می‌توان برای هر معیار وزنی نیز در نظر گرفت. پس از آن روابط (۸) و (۹) مطابق زیر تعریف می‌گردد.

$$B_i = \text{beneficial normalized data}(i) * \text{weight}(i) + \text{beneficial normalized data}(j) * \text{weight}(j) + \dots \quad (8)$$

$$C_i = \text{non-beneficial normalized data}(i) * \text{weight}(i) + \text{non-beneficial normalized data}(j) * \text{weight}(j) + \dots \quad (9)$$

برای استفاده از این دو رابطه (۸) و (۹) دو پارامتر شامل انرژی جذب شده ویژه، انرژی جذب شده میانگین به عنوان پارامترهای مفید با وزن‌های

۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
e	نسبت اندازه طول لبه بالایی سلول به اندازه طول لبه پایینی سلول
n	تعداد تکرار الگوی سطری
SEA	انرژی جذب شده مخصوص
E _{absorption}	انرژی جذب شده کل
F	گرددنیرویوی که در هر لحظه جابجایی ثبت می
Mass	جرم سازه‌های اوریگامی در پژوهش حاضر
CFE	کارایی نیروی فشار
F _{mean}	نیروی میانگین
IPF	حداکثر نیروی اولیه

منابع

- [1] S. Evtukov, E. Golov, T. Sazonova, Prospects of scientific research in the field of active and passive safety of vehicles, in: MATEC Web of Conferences, EDP Sciences, 2018, pp. 04018.
- [2] A. Mortazavi Moghaddam, A. Kheradpisheh, M. Asgari, An integrated energy absorbing module for battery protection of electric vehicle under lateral pole impact, International journal of crashworthiness, 28(3) (2023) 321-333.
- [3] A. Mortazavi Moghaddam, A. Kheradpisheh, M. Asgari, A basic design for automotive crash boxes using an efficient corrugated conical tube, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 235(7) (2021) 1835-1848.
- [4] A. Sadighi, A. Eyvazian, M. Asgari, A.M. Hamouda, A novel axially half corrugated thin-walled tube for energy absorption under axial loading, Thin-Walled Structures,

بالاتری نسبت به $e0.6n10$ داشته باشد اما در روش ارزیابی تناسبی پیچیده، نتایج دیگری مشاهده می‌شود. دلیل این تفاوت را می‌توان در شکل ۱۵-ج یافت که اندرکنش میان e و n در محدوده $e=0.6$ مشاهده می‌گردد. به منظور تحلیل خطا بر روی نتایج تجربی و عددی در این پژوهش، در جدول ۱۰ نتایج هر دو روش مورد بررسی قرار گرفته است. نتیجه حاکی از تطابق کامل میان مقادیر تجربی و عددی می‌باشد و مبین این موضوع است که خطای میان نتایج تجربی و عددی در محدوده مجاز بوده است و نتیجه کلی میان دو روش یکسان می‌باشد.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش سعی شد با مطالعه یک هنر باستانی یک مدل اوریگامی جدیدی ارائه شود و در یکی از مهمترین قسمت‌ها برای محافظت از سرنشینان خودرو در تصادف‌ها استفاده شود. برای این هدف ۶ نمونه شامل ۵ مدل اوریگامی و یک مدل غیر اوریگامی بکار گرفته شد و در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی، آزمایش شدند.

- نتایج این پژوهش نشان می‌دهند که سازه‌های اوریگامی در مقایسه با تیوب ساده در حدود ۹۷ درصد افزایش جذب انرژی دارند که در جذب انرژی فاکتور بسیار تعیین کننده می‌باشد
- هیچ کدام از سازه‌های اوریگامی درحین آزمایش دچار واماندگی نشده و تا میزان ۸۰ درصد کامل فشرده شده که در مقایسه با لوله ساده که در جابجایی کمتر از ۷ میلی متر دچار شکست بسیار وضعیت مناسبی دارند.
- نتایج نشان می‌دهد که پارامترهای هندسی در جذب انرژی موثر هستند و با تغییر این پارامترها می‌توان تغییر قابل توجهی را در جذب انرژی شاهد بود.
- نتایج مطالعه پارامتریک نشان داد با افزایش e می‌توان جذب انرژی بالاتری را شاهد بود. در مقابل افزایش مقدار n می‌تواند جذب انرژی را کاهش دهد.
- به دلیل غیر ممکن بودن پیدا شدن بهینه‌ترین سازه در جذب انرژی با نتایج طراحی آزمایش‌ها و مقایسه جداگانه براساس محاسبه هر کدام از معیارهای جذب انرژی مانند انرژی جذب شده ویژه، روش کوپراس به خوبی توانست بهترین سازه برای جذب انرژی را پیدا کند.

- [14] A.M. Pir Mohammad, Soban, Studying the collapse behavior of multi-cell conical structures and their optimization using artificial neural network, *Mechanics of Structures and Fluids*, 7(2) (2017) 111-127.
- [15] A. Dimas, T. Dirgantara, L. Gunawan, A. Jusuf, I.S. Putra, The effects of spot weld pitch to the axial crushing characteristics of top-hat crash box, *Applied Mechanics and Materials*, 660 (2014) 578-582.
- [16] S. Ming, Z. Song, T. Li, K. Du, C. Zhou, B. Wang, The energy absorption of thin-walled tubes designed by origami approach applied to the ends, *Materials & Design*, 192 (2020) 108725.
- [17] Y. Li, Z. You, Origami concave tubes for energy absorption, *International Journal of Solids and Structures*, 169 (2019) 21-40.
- [18] W. Wei, F. Zhang, Y. Xing, H. Wang, R. Liu, Research on mechanical properties of origami aluminum honeycomb for automobile energy absorbing box, *Materials*, 16(1) (2022) 141.
- [19] H. Buri, Y. Weinand, ORIGAMI-folded plate structures, architecture, in, Miyazaki, Japan, 2008.
- [20] M. Tsiamis, A. Oliva, M. Calvano, Algorithmic design and analysis of architectural origami, *Nexus Network Journal*, 20(1) (2018) 59-73.
- [21] N. Turner, B. Goodwine, M. Sen, A review of origami applications in mechanical engineering, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 230(14) (2016) 2345-2362.
- [22] S. Wang, Y. Peng, T. Wang, X. Chen, L. Hou, H. Zhang, The origami inspired optimization design to improve the crashworthiness of a multi-cell thin-walled structure for high speed train, *International Journal of Mechanical Sciences*, 159 (2019) 345-358.
- [23] C.-Y. Park, Y.-A. Lee, J. Jang, M.-W. Han, Origami and Kirigami Structure for Impact Energy Absorption: Its Application to Drone Guards, *Sensors*, 23(4) (2023) 2150.
- [24] S. Yao, H. Zhu, M. Liu, Z. Li, P. Xu, Energy absorption of origami tubes with polygonal cross-sections, *Thin-Walled Structures*, 145 (2019) 106418.
- [5] P. Woelke, N. Abboud, D. Tennant, E. Hansen, C. McArthur, Ship impact study: Analytical approaches and finite element modeling, *Shock and Vibration*, 19 (2012) 515-525.
- [6] X. Xiang, D. Shao, T. Pang, T.T. Ngo, N.S. Ha, S. Zhang, Energy absorption of multilayer aluminum foam-filled structures under lateral compression loading, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 31(3) (2024) 659-675.
- [7] E. Demirci, A.R. Yıldız, An investigation of the crash performance of magnesium, aluminum and advanced high strength steels and different cross-sections for vehicle thin-walled energy absorbers, *Materials testing*, 60(7-8) (2018) 661-668.
- [8] A. Tafazoli, M.A. , Aidin Ghaznavi, numerical and experimental study of energy absorption of multi-layer aluminum-composite conical frustum structures under axial loading, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 54(8) (2022) 1851-1866.(in persian)
- [9] G. Sun, D. Chen, G. Zhu, Q. Li, Lightweight hybrid materials and structures for energy absorption: A state-of-the-art review and outlook, *Thin-Walled Structures*, 172 (2022) 108760.
- [10] M.A. Hedyeh MojaveryAgah Developing a new functionally graded lattice structure based on an elliptic unit cell for additive manufacturing and investigation of its properties, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 55(4) (2023) 475-494.(in persian)
- [11] N. Mohtadifar, M. Asgari, New Additively Manufactured Cellular Lattice Structure; Theory and Experiment, *Modares Mechanical Engineering*, 20(7) (2020) 1895-1910.(in persian)
- [12] G. Sun, T. Pang, C. Xu, G. Zheng, J. Song, Energy absorption mechanics for variable thickness thin-walled structures, *Thin-Walled Structures*, 118 (2017) 214-228.
- [13] Y. Chen, H. Huang, X. Deng, S. Qin, Energy absorption characteristics analysis of multicellular columns based on the origami centripetal folding method, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, (2023) 1-22.

- Effect of vertical strut arrangements on compression characteristics of 3D printed polymer lattice structures: experimental and computational study, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28 (2019) 709-716.
- [34] Y. Xia, K. Xu, G. Zheng, R. Zou, B. Li, P. Hu, Investigation on the elasto-plastic constitutive equation of parts fabricated by fused deposition modeling, *Rapid Prototyping Journal*, 25(3) (2019) 592-601.
- [35] W. Zhang, S. Yin, T. Yu, J. Xu, Crushing resistance and energy absorption of pomelo peel inspired hierarchical honeycomb, *International Journal of Impact Engineering*, 125 (2019) 163-172.
- [36] S. Ming, C. Zhou, T. Li, Z. Song, B. Wang, Energy absorption of thin-walled square tubes designed by kirigami approach, *International Journal of Mechanical Sciences*, 157 (2019) 150-164.
- [37] A. Alomarah, S.H. Masood, I. Sbarski, B. Faisal, Z. Gao, D. Ruan, Compressive properties of 3D printed auxetic structures: experimental and numerical studies, *Virtual and Physical Prototyping*, 15(1) (2020) 1-21.
- [38] Q. Wang, S. Li, Z. Liu, G. Wu, J. Lei, Z. Wang, Geometric design and energy absorption of a new deployable cylinder tube, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 29(13) (2022) 1911-1924.
- [39] J. Li, Y. Chen, X. Feng, J. Feng, P. Sareh, Computational modeling and energy absorption behavior of thin-walled tubes with the Kresling origami pattern, *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 62(2) (2021) 71-81.
- [40] J. Zhou, S. Liu, Z. Guo, S. Xu, J. Song, M. Zou, Study on the energy absorption performance of bionic tube inspired by yak horn, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 29(28) (2022) 7246-7258.
- [41] E.K. Zavadskas, A. Kaklauskas, F. Peldschus, Z. Turskis, Multi-attribute assessment of road design solutions by using the COPRAS method, *The Baltic journal of Road and Bridge engineering*, 2(4) (2007) 195-203.
- Walled Structures, 157 (2020) 107013.
- [25] A. Sadighi, M.B. Azimi, M. Asgari, A. Eyvazian, Crashworthiness of hybrid composite-metal tubes with lateral corrugations in axial and oblique loadings, *International journal of crashworthiness*, 27(6) (2022) 1813-1829.
- [26] M. Teimouri, M. Mahbod, M. Asgari, Topology-optimized hybrid solid-lattice structures for efficient mechanical performance, *Structures*, 29 (2021) 549-560.
- [27] Y. Wu, Z. Mao, Y. Feng, Energy absorption prediction for lattice structure based on D2 shape distribution and machine learning, *Composite Structures*, 319 (2023) 117136.
- [28] M. Aghamirzaie, A. Ghasemi-Ghalebahman, A. Najibi, Optimization of the octagonal origami tube energy absorption using the artificial neural network and heuristic method, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, (2023) 09544089231217977.
- [29] H. Mojavery Agah, M. Asgari, A nature-inspired gradable elliptic-cell lattice structure based on cypress wood texture; theoretical and experimental analysis for mechanical properties, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, (2023) 1-16.
- [30] A. Sadighi, H. Salaripoor, M. Asgari, Comprehensive study on the crashworthiness of a new developed axially-half corrugated aluminum tubes, *International journal of crashworthiness*, 27(3) (2022) 633-650.
- [31] S. Vyavahare, S. Kumar, Numerical and experimental investigation of FDM fabricated re-entrant auxetic structures of ABS and PLA materials under compressive loading, *Rapid Prototyping Journal*, 27(2) (2021) 223-244.
- [32] A. Iranmehr, A. Tafazoli, M. Asgari, Architected tunable twist-compression coupling metastructures based on a generative parametric design for energy absorption and effective mechanical properties, *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, (2024) 1-19.
- [33] A. Fadeel, A. Mian, M. Al Rifaie, R. Srinivasan,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Mazaheri, M. Khalajzade, M. Asgari, *Development of a novel multi-cellular origami metastructure and investigation into numerical and experimental energy absorption behaviour* Amirkabir J. Mech Eng., 56(5) (2024) 717-740.

DOI: [10.22060/mej.2024.22928.7694](https://doi.org/10.22060/mej.2024.22928.7694)

