



Investigation of Internal Cellular Structure Design in the Impact Performance of 3D-Printed Components

Hossein Kazemi ^a, Mohammad Kashfi ^{b*}, Leila Soleymani ^c, Sayed Hassan Nourbakhsh ^d

^a Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

^b Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ayatollah Boroujerdi University, Boroujerd, Iran.

^c Department of Thermal and Fluid Sciences, Faculty of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

^d Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

Original Article

Use your device to scan
and read the article online



Citation: Kazemi H, Kashfi M, Soleymani L, Nourbakhsh S H. Investigation of Internal Cellular Structure Design in the Impact Performance of 3D-Printed Components. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2024; 4(4): 623-644.

 <https://10.61186/masm.4.4.623>.

KEYWORDS

Charpy test,
Finite element analysis,
3D Printing,
Cellular shapes,
PLA filament.

ABSTRACT

Simultaneously optimizing impact strength while reducing material weight is a fundamental challenge across various industries. This study presents a novel approach to maximizing energy absorption in 3D-printed materials while minimizing mass and material consumption. To this end, in this study, the effects of three cellular geometries, i.e., circular, decagonal, and hexagonal, and two arrangements, i.e., linear and diagonal, were investigated on the 3D-printed samples made from PLA filament. It should be noted that both the experimental Charpy test and related finite element analysis (FEA) were employed to evaluate the mechanical performance of the samples in terms of energy absorption. The results revealed that the samples with hexagonal cells exhibited the best performance due to their superior stress distribution. These samples demonstrated up to a 62% increase in impact strength while achieving a 36% reduction in mass. Furthermore, analysis of the fracture behavior showed that samples with diagonally arranged cells extended the time until the final fracture by up to 575%. This improvement is attributed to the formation of additional plastic hinges during impact, along with the development of an inclined fracture path. Overall, these findings suggest that optimizing internal cellular design can significantly enhance impact resistance without increasing material usage. This advancement is crucial for developing lightweight, high-strength structures suitable for industrial and aerospace applications.

Extended Abstract

1. Introduction

Energy consumption is a crucial concern across various industries, making the weight of structural components a significant challenge for engineers and designers [1]. However, the goal of creating lightweight components should not compromise mechanical strength. Many industrial applications demand materials that are not only lightweight but also possess high mechanical robustness and exceptional resistance to impact and sudden stresses [2–4]. For instance, extensive studies have shown that reducing an aircraft's weight by just one kilogram can lead to significant fuel and energy savings. Yet, it is essential to carefully consider the mechanical strength and impact resistance of both structural and interior components to avoid catastrophic failures [5]. In many cases, weight reduction can compromise the mechanical properties of materials, which undermines the benefits of lightweight designs and can lead to considerable additional costs [1, 6].

* Corresponding author. Tel.: +989128458616

E-mail address: m.kashfi@abru.ac.ir

DOI: <https://10.61186/masm.4.4.623>.

Received: December 22, 2024; Received in revised form: February 10, 2025; Accepted: February 26, 2025.

@ Author



extensive research has been undertaken in recent years to improve the mechanical and impact resistance properties of materials while also focusing on weight reduction. Different approaches have been explored to achieve this goal, providing solutions that not only maintain or reduce the original weight of materials but also enhance their mechanical properties. One of the most widely adopted strategies involves incorporating reinforcing nanoparticles and microparticles into material matrices [7–11]. For instance, in the study conducted by Kazemi et al. [8], investigated the effects of composite nanoparticles, which consist of a silica core and a magnesium hydroxide shell, on the mechanical properties of polyester. Their findings showed that adding these nanoparticles at an optimal weight fraction led to significant improvements in the mechanical properties of the polyester: specifically, a 43% increase in flexural strength, a 47% increase in flexural modulus, and a 32% increase in Mode I fracture toughness.

Another promising approach that has garnered increasing attention is the use of sandwich structures [12–15]. Extensive studies have shown that sandwich structures, while reducing material use and overall weight, can achieve exceptional impact resistance and mechanical strength [16]. Keshfi et al. [15] investigated the energy absorption of 3D-printed sandwich specimens featuring honeycomb cores made from polylactic acid (PLA) filaments.

Additionally, various geometric and structural designs have been investigated to optimize the mechanical performance of materials. For instance, a study conducted by Abueidda et al. [17] explored the fabrication of polyamide-based structures with gyroid geometries using 3D printing technology to enhance their mechanical properties. The results indicated that employing these geometric configurations significantly improved the compressive strength of the material.

As evidenced by the aforementioned studies, the simultaneous optimization of impact strength and weight reduction remains a critical challenge across multiple industries, attracting significant research interest. However, despite advancements in this area, thorough investigations into how cellular structures can reduce weight and their effect on impact resistance are still limited. Therefore, this study aims to fill this gap by utilizing the advanced capabilities of 3D printing technology—an innovative and cost-effective manufacturing method that has become increasingly popular for producing industrial components [19]. In this study, 3D-printed specimens with cellular structures were designed to achieve a 36% reduction in weight. Specifically, three distinct cellular geometries—circular, decagonal, and hexagonal—along with two different arrangements (linear and diagonal) were employed to investigate their impact resistance. Notably, PLA is an environmentally friendly and biodegradable filament known for its excellent biocompatibility [20]. However, despite these promising qualities, PLA is inherently brittle and has limited impact strength [21]. This makes it an ideal candidate for exploring potential improvements in its impact resistance. To thoroughly evaluate the impact properties of the proposed cellular structures, we utilized a combination of experimental methods and finite element analysis (FEA), specifically based on the Charpy impact test. In addition, we conducted tensile tests on PLA specimens following relevant standards to obtain accurate mechanical property data, which ensured the precision of the FEA simulations.

2. Materials and design

This research examines the impact of cellular shapes and their arrangements on the impact strength of 3D printed samples. In addition to conducting experimental Charpy impact tests, finite element modeling was also used for this analysis. To obtain more accurate results from the finite element analyses, we aimed to determine the mechanical properties of the polylactic acid filament sourced from eSun Company. For this purpose, samples were prepared according to ISO 527 standards [22] using an FDM 3D printer. It is important to note that, considering the anisotropic properties of the filament and to enhance the accuracy of the experimental test simulation, the samples were printed at two raster angles (θ_R) of 0 and 90 degrees. Furthermore, to improve the reliability of the results, five samples from each group were tested (Figure 1).

After preparing the samples, we extracted the mechanical properties relevant to this test based on the tensile tests and engineering stress-strain curve (Figure 2). It is important to note that in this test, the load cell capacity was 100 kN, and the loading rate was set at 1 mm/min.

The goal of this research is to present an innovative approach to enhance the energy absorption of 3D printed samples made from polylactic acid polymer filament while also reducing their weight. This is achieved by creating cavities and various cellular shapes. Specifically, three cellular geometries—circular, decagonal, and hexagonal—have been chosen to facilitate the desired weight reduction. Additionally, this research investigates the effects of these cellular shapes' arrangement using linear and diagonal configurations (see Figure 3). It is important to note that the geometric dimensions of the cellular shapes in each arrangement are designed to achieve a weight reduction of 36 percent.

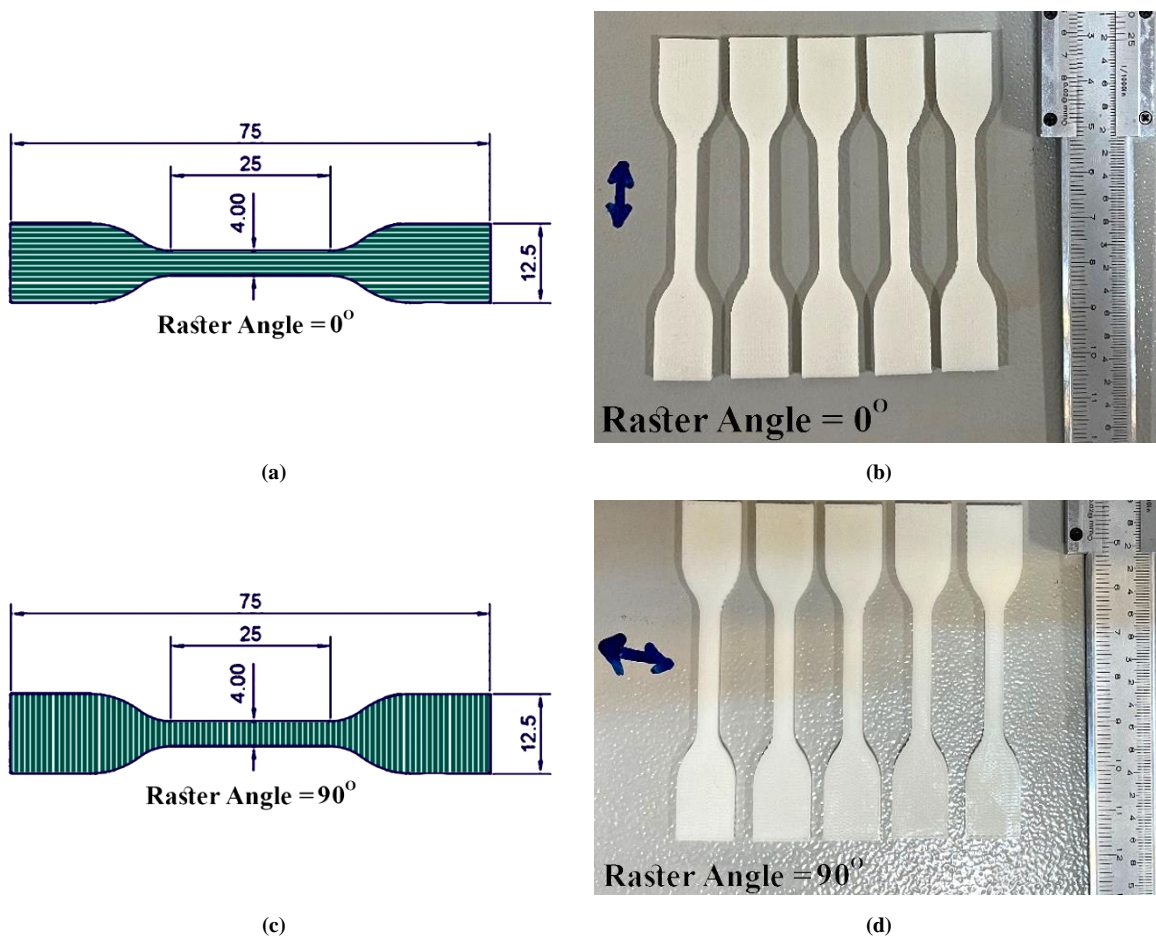


Figure 1. 3D-printed samples corresponding to the tensile test with raster angle: (a) 0, (b) 0, (c) 90, and (d) 90 degree

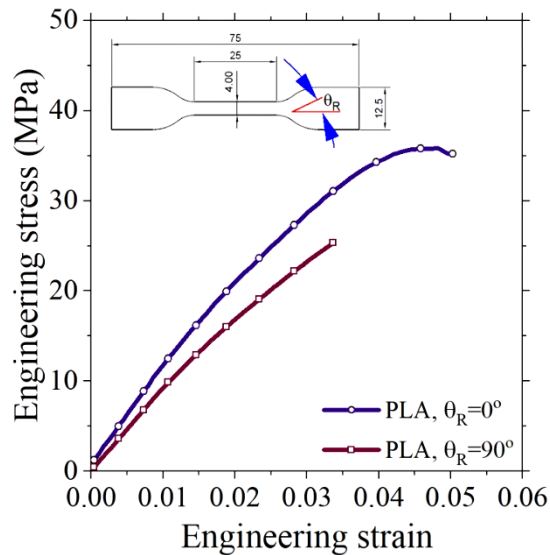


Figure 2. Stress-strain curves corresponding to the 3D-printed samples at raster angle of 0 and 90 degrees

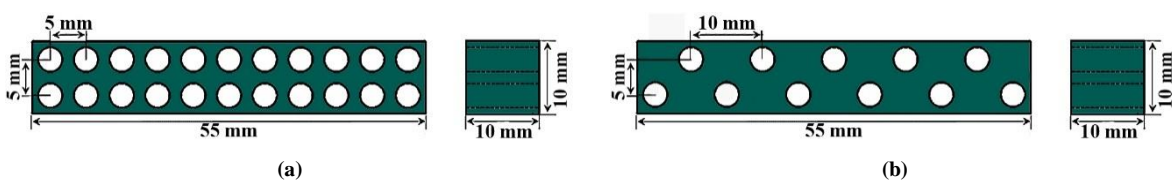


Figure 3. A schematic representation of the cellular arrangement in Charpy impact test specimens: (a) linear arrangement and (b) diagonal arrangement

To prepare the samples for the Charpy impact test, we designed three-dimensional models in accordance with ASTM E23 standards [23] using ANSYS DesignModeler software. Also, Ultimaker Cura software converted these models into geometric models (G-Code). It's important to note that during the 3D printing process, a layer thickness of 0.2 mm was set. Additional parameters for the 3D printing process are detailed in Table 1.







Table 1. Parameters utilized in 3D printing

3D Printing Parameter	Amount	3D Printing Parameter	Amount
Nozzle Diameter (mm)	0.4	Nozzle Temperature (°C)	205
Cooling Fan, (%)	100	Bed Temperature (°C)	40

In this section, as detailed in Table 2, we have assigned a specific identifier code to each examined sample. This approach is designed to maintain the integrity of the data and facilitate the identification of results associated with each sample. Each identifier code comprises three distinct components that sequentially represent the following:

- The type of cellular shapes present in the structure of the impact samples:
 - Circular cellular shape is denoted as “Ci”,
 - Decagonal cellular shape is indicated as “De”,
 - Hexagonal cellular shape is represented as “H”.
- The percentage of mass reduction is 36%.
- The arrangement and positioning of the cellular shapes within the sample structure:
 - Linear arrangement is denoted as “L”,
 - Diagonal arrangement is indicated as “D”.

Table 2. Presentation of the codes corresponding to the Charpy impact test specimens

Code of Specimen	Pure PLA	Ci-36%-L	De-36%-L	H-36%-L	Ci-36%-D	De-36%-D	H-36%-D
Mass Reduction	0	36%			36%		
Cellular Arrangement	-	Linearly (Figure 3a)			Diagonally (Figure 3b)		
Cellular Structure	-						

It is essential to highlight that this study validated the assumptions and results related to the simulation of the Charpy test for samples with a linear cellular arrangement based on experimental data. Following this, the numerical results for the absorbed energy of samples with a diagonal cellular arrangement were evaluated through finite element analyses. As illustrated in Figure 4, the modeling was divided into four distinct components across all samples: an impactor, a specimen, and two supports, with dimensions conforming to experimental specifications. In this simulation, the constraints and boundary conditions were set up so that both supports were fixed in all degrees of freedom while the impactor could move only in the Y direction. To achieve energy levels consistent with the experimental Charpy impact test, the density of the impactor was increased, and its speed was set to 5.43 m/s. Notably, the mechanical properties of both the impactor and supports were modeled using a linear elastic approach, whereas the sample was represented as orthotropic. Additionally, to analyze the failure of the samples, the maximum stress criterion was employed for all, based on the failure properties of polylactic acid filaments.

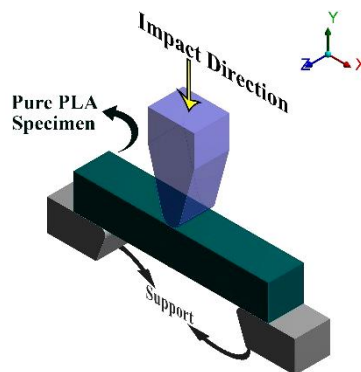


Figure 4. Three-dimensional models simulated corresponding to the specimens: (a) Pure PLA (Continued)

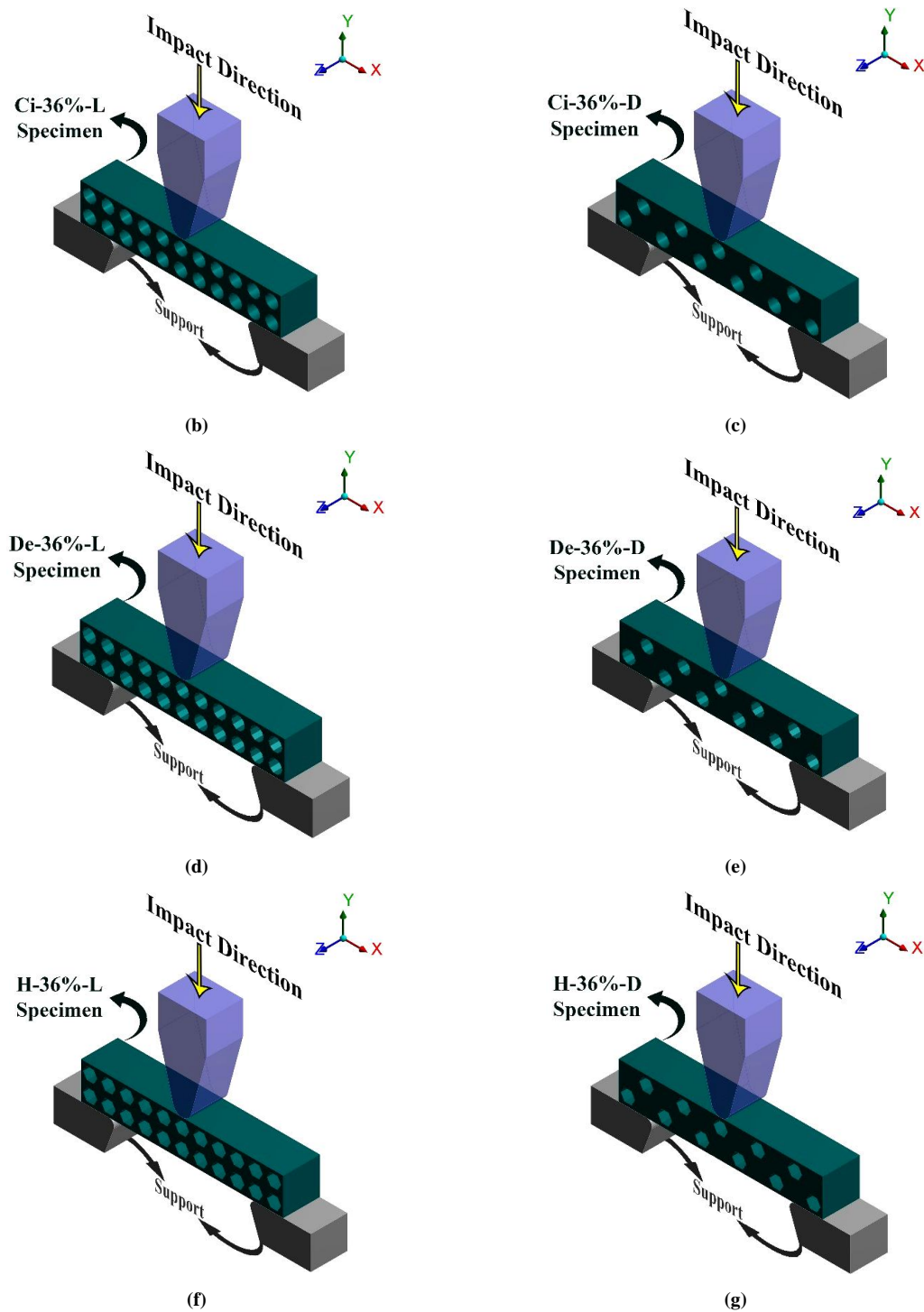


Figure 4. Three-dimensional models simulated corresponding to the specimens: (b) Ci-36%-L, (c) Ci-36%-D, (d) De-36%-L, (e) De-36%-D, (f) H-36%-L, and (g) H-36%-D

3. Result and discussion

As previously mentioned, this study evaluates the energy absorption of 3D-printed PLA filament samples through experimental methods and finite element analysis. To validate the FEA results, we first compared experimental impact test data from samples with linear cellular geometries to the corresponding FEA results. As depicted in Figure 5a, the assumptions and methodology employed in the FEA simulation demonstrate a strong correlation between the absorbed energy results, which are based on the specific density of the samples (E^*). It is worth mentioning that the average error between the experimental results and the FEA results for the linear cellular samples was approximately 11%. Furthermore, as illustrated in Figure 5b, both the experimental and FEA results demonstrate not only a strong alignment in energy absorption but also excellent convergence in predicting the direction and propagation of structural damage. In fact, both methods indicated that cracks and damage propagated

linearly from the sample's lower to upper section. This validation confirms the reliability of the finite element model utilized in this study, supporting its applicability for analyzing other configurations.

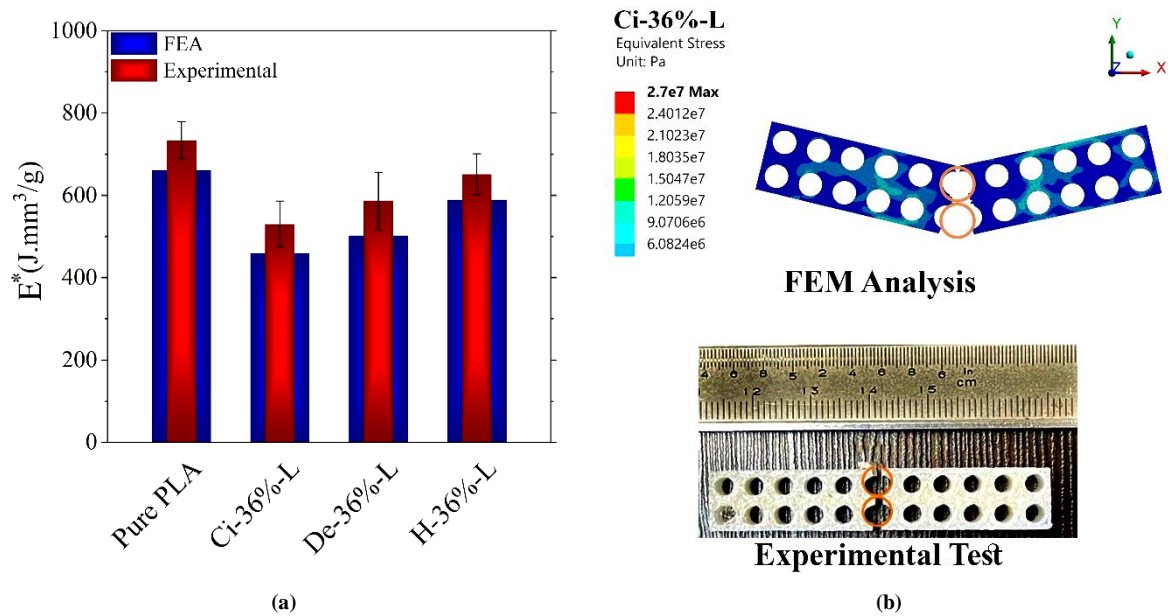


Figure 5. Validation of the finite element analysis corresponding to (a) results of specific absorbed energy and (b) failure mode identification

After validating the experimental and FEA results, a detailed analysis was conducted to explore how cellular geometry and arrangement influence the impact behavior of 3D-printed PLA samples. As illustrated in Figure 6, significant differences in impact strength were observed among the tested samples, along with notable variations in failure behavior during the impact process. To gain a better understanding of this phenomenon, the effects of cellular geometry and arrangement were examined separately on impact performance. The results depicted in Figure 6 reveal that hexagonal cellular structures exhibited the highest energy absorption efficiency during Charpy impact tests, followed by decagonal and circular structures. This behavior can be attributed to the structural characteristics of each geometry. Despite having sharp corners, hexagonal cells effectively distributed stress uniformly, which enhanced their energy absorption capacity. In contrast, circular cells showed lower energy absorption due to sudden stress concentrations on the lateral surfaces of the holes, which accelerated crack propagation.

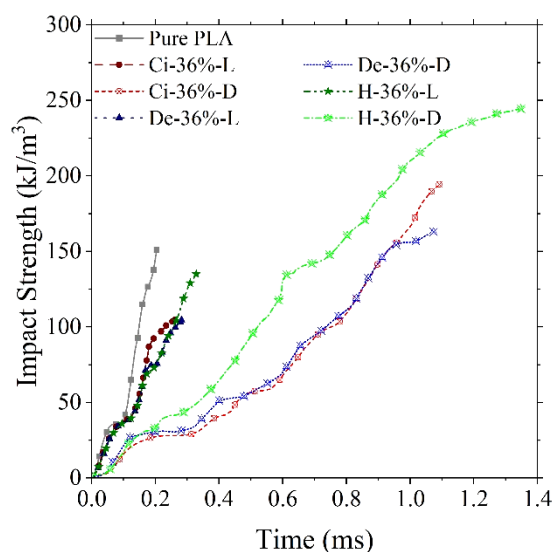


Figure 4. Diagram of impact strength variations up to the moment of fracture

In examining the impact of cellular arrangement, the results presented in Figure 6 show that samples with diagonal cellular arrangements demonstrated a significant increase in impact strength. Additionally, an analysis of energy absorption trends in both linear and diagonal cellular samples revealed that non-cellular samples, as well as those with linear arrangements, absorbed less total energy overall, despite exhibiting higher instantaneous

energy levels. This suggests that cracks in these samples propagated abruptly and instantaneously. In contrast, samples with diagonal cellular arrangements, while showing lower instantaneous energy levels, absorbed substantially more total energy. Notably, the De-36%-D sample showed the most significant improvement, underscoring the advantageous role of diagonal cellular arrangements in enhancing the impact resistance of 3D-printed PLA samples. It should be noted that, based on this observation, as shown in Table 3, diagonal samples exhibited final fracture times that were up to 575% longer, further emphasizing the significant effect of cellular arrangement on energy absorption.

Table 2. Comparison of fracture times corresponding to the Charpy impact test specimens

Code of Specimen	Pure PLA	Ci-36%-L	Ci-36%-D	De-36%-L	De-36%-D	H-36%-L	H-36%-D
Fracture Time (ms)	0.2	0.26	1.09	0.28	1.07	0.33	1.35

To provide a clear understanding of how cellular geometry and arrangement affect impact strength, Figure 7 illustrates the percentage variation in impact resistance across all tested samples. The results confirm that hexagonal cells and diagonal arrangements deliver the best mechanical performance. Notably, the H-36%-D sample showed a 62% increase in impact strength while having a 36% reduction in mass. This demonstrates the effectiveness of this configuration in optimizing structures that are both lightweight and durable. These findings highlight the potential of such cellular architectures to advance future research and improve design strategies in industries where the strength-to-weight ratio is critical.

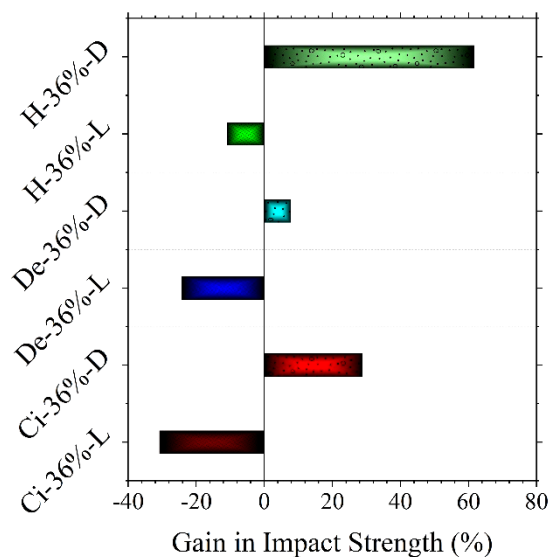


Figure 5. Variation of impact strength of samples with cellular structures compared to the Pure PLA (reference) sample

4. Conclusion

This study presents a novel approach to maximizing energy absorption in 3D-printed samples while minimizing mass and material use. To this end, the effects of three different cellular geometries—circular, decagonal, and hexagonal—along with two arrangements (linear and diagonal) were investigated on the impact strength of PLA 3D-printed samples. In other words, a significant aspect of this research is examining how cellular arrangement affects impact strength, providing valuable insights for optimizing lightweight, high-strength structures in engineering applications, such as the aerospace, automotive, and biomedical industries, where the strength-to-weight ratio is crucial. A dual-method analytical approach that combined experimental testing with finite element analysis was employed to achieve these objectives. Also, it should be mentioned that the tensile tests, following standardized procedures, were conducted to determine the mechanical properties of the PLA filament. Based on Charpy impact testing and the corresponding finite element simulations, the key findings of this study were summarized as follows:

- The strong correlation between the results of experimental Charpy impact tests and finite element simulations confirms the accuracy of the proposed analytical framework. This validation supports reliable design optimization for future structures.
- Hexagonal cellular structures demonstrated the highest energy absorption due to their superior stress distribution. In contrast, circular cells exhibited the lowest performance because of sudden stress concentrations at their edges.

- The introduction of plastic hinges in diagonally arranged structures changed the failure mechanism, reducing local stress concentrations and transforming brittle failure into a more gradual process.
- Final fracture time in diagonal samples increased by 575% due to the optimized crack propagation mechanism and enhanced energy absorption capacity.
- In diagonally arranged samples, cracks propagated at an inclined angle rather than vertically, which improved the structural resistance against sudden failure.
- The H-36%-D sample was identified as the optimal structure, featuring hexagonal cells arranged diagonally. This configuration achieved a 62% increase in impact strength while reducing the mass by 36%.

These findings show that optimizing the internal design and arrangement of cells can improve impact resistance while minimizing material usage and weight. It should be noted that future research could investigate the effects of alternative geometries, such as triangular and square cells, explore different mass reduction strategies, and examine the use of advanced and hybridized filaments. In fact, these approaches could lead to even more efficient structural designs for industrial applications



بررسی نقش طراحی داخلی ساختارهای سلولی در عملکرد ضربه‌ای قطعات چاپ سه‌بعدی شده

حسین کاظمی^{الف}، محمد کشفی^{ب*}، لیلا سلیمانی^ج، سید حسن نوربخش^د

^{الف} دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه جامدات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، hosseinkazemi1.abru@gmail.com

^ب دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت الله بروجردی، بروجرد، ایران، m.kashfi@abru.ac.ir

^ج دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه حرارت و سیالات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، soleymani.leila97@gmail.com

^د دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران، Nourbakhsh.SH@sku.ac.ir

چکیده	واژگان کلیدی
<p>بهینه‌سازی هم‌زمان استحکام ضربه‌ای و کاهش وزن مواد، یکی از چالش‌های اساسی در صنایع مختلف به شمار می‌آید. لذا در مطالعه‌ی حاضر، رویکردی نو به منظور افزایش حداکثری انرژی جذب‌شده و همچنین کاهش وزن و مواد مصرفی در نمونه‌های چاپ سه‌بعدی شده، در نظر گرفته شد. بدین منظور، تأثیر سه شکل سلولی (دایره‌ای، ده‌ضلعی و شش‌ضلعی) و دو جای‌گیری متفاوت از آن‌ها (خطی و مورب) در ساختار نمونه‌های چاپ سه‌بعدی شده از فیلامنت آلی پلی لاکتیک اسید، بر استحکام ضربه‌ای این مواد، مورد بررسی قرار گرفت. شایان‌ذکر است که در این مطالعه، دو رویکرد تحلیلی تجربی و المان محدود متناظر با آزمون ضربه شاریبی، به منظور ارزیابی عملکرد مکانیکی نمونه‌ها در جذب انرژی، مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که نمونه‌های دارای سلول‌های شش‌ضلعی، به دلیل توزیع مناسب‌تری از تنش در ساختار خود، بهترین عملکرد را ارائه می‌دهند. این نمونه‌ها، علی‌رغم ۳۶٪ کاهش در جرم خود، تا ۶۲٪ افزایش را در استحکام ضربه‌ای، از خود نشان دادند. مقایسه‌ی رفتار شکست نمونه‌ها نیز حاکی از آن بود که نمونه‌های دارای سلول‌های مورب، به دلیل ایجاد مفصل پلاستیک بیشتر در طول فرآیند ضربه و همچنین ایجاد راستای شکستی مورب، تا ۵۷۵٪ افزایش در زمان شکست نهایی، نشان می‌دهند. در نهایت یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که طراحی بهینه‌ی سلول‌های داخلی می‌تواند بدون افزایش مواد مصرفی (و حتی کاهش آن) و علی‌رغم کاهش جرم، استحکام ضربه‌ای را به‌طور چشمگیری بهبود داده و گامی مؤثر در توسعه‌ی ساختارهای سبک و مقاوم برای کاربردهای صنعتی و هوافضایی باشد.</p>	<p>آزمون ضربه شاریبی، تحلیل المان محدود، چاپ سه‌بعدی، شکل‌های سلولی، فیلامنت پلی لاکتیک اسید.</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۲</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۲۲</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۸</p>

۱- مقدمه

باتوجه به اهمیت انرژی مصرفی در صنایع مختلف، امروزه وزن قطعات یکی از چالش‌های اساسی برای مهندسان و طراحان محسوب می‌شود [۱]. با این حال، سعی بر استفاده از قطعاتی با وزن کم، نباید به قیمت افت استحکام مکانیکی این مواد تمام شود. چراکه در بسیاری از صنایع، قطعات مورد استفاده علاوه بر وزن کم، باید استحکام مکانیکی و مقاومت بالایی در برابر ضربه و تنش‌های ناگهانی داشته باشند [۲-۴]. به عنوان مثال، اگرچه مطالعات گسترده نشان می‌دهند که هر کیلوگرم کاهش وزن در یک هواپیما می‌تواند به صرفه‌جویی قابل توجهی در مصرف سوخت و انرژی منجر شود، اما استحکام مکانیکی و مقاومت در برابر

ضربه قطعات مورد استفاده در بدنه و اجزای داخلی هواپیما ممکن است با کاهش وزن آن‌ها به چالش کشیده شده و در نتیجه، خسارات جبران‌ناپذیری را ایجاد کند [۵]. چراکه به‌طور معمول، کاهش وزن قطعات می‌تواند به کاهش خواص مکانیکی آن‌ها منجر شود، که نه تنها مزایای سبکی را زیر سوال می‌برد بلکه ممکن است هزینه‌های بسیار زیادی را نیز به دنبال داشته باشد. [۶ و ۷]. به صورت کلی می‌توان بیان نمود که اگرچه استفاده از موادی با وزن کم و سبک، می‌تواند مزایای بسیار ارزشمندی را در زمینه‌ی کاهش مصرف انرژی ارائه نماید، اما باید راهکارهایی برای حفظ یا حتی بهبود استحکام مکانیکی آن‌ها نیز ارائه شود.

بنابراین، در سال‌های اخیر، مطالعات گسترده‌ای به منظور افزایش استحکام مکانیکی و ضربه‌ای مواد با در نظر گرفتن اهداف وزنی انجام شده است. این تحقیقات راه‌کارهای متنوعی را برای دستیابی به این هدف ارائه می‌دهند که می‌تواند علاوه بر حفظ تقریبی وزن اولیه‌ی مواد (یا حتی کاهش آن)، افزایش خواص مکانیکی این مواد را به دنبال داشته باشند. از جمله‌ی یکی از پرکاربردترین راه‌کارهای متناظر با این موضوع، می‌توان به استفاده از نانوذرات و میکروذرات تقویت‌کننده در ساختار مواد [۷-۱۱] اشاره نمود. به عنوان مثال، در خصوص استفاده از نانوذرات در ساختار مواد، به منظور افزایش خواص مکانیکی آن‌ها، می‌توان به مطالعه‌ی انجام شده توسط کاظمی و همکاران [۸] اشاره کرد. آن‌ها در مطالعه‌ی خود، تأثیر نانوذرات کامپوزیتی (از هسته‌ی سیلیکا و پوسته‌ی هیدروکسید منیزیم) و سنتز سبز شده‌ی را بر روی استحکام مکانیکی پلیمر پلی‌استر مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزودن این نوع از نانوذرات، در درصد وزنی بهینه، به ترتیب منجر به افزایش ۴۳، ۴۷ و ۳۲ درصدی در استحکام خمشی، مدول خمشی و چقرمگی شکست مواد اول متناظر با پلیمر پلی‌استر می‌گردد. در این زمینه ولاشجردی و همکاران [۱۰] نیز، بیان نمودند که استفاده از نانوذرات اکسیدگرافن در ساختار نمونه‌های چاپ سه‌بعدی شده از پلیمر پلی‌آمید، تأثیرات قابل توجهی را بر روی استحکام مکانیکی و ضربه‌ای نمونه‌های پلی‌آمیدی می‌گذارد.

یکی دیگر از راه‌کارهایی که امروزه، متناسب با این هدف، مورد توجه محققان قرار گرفته است، استفاده از ساختارهای ساندویچی می‌باشد [۱۲-۱۵]. چراکه مطالعات گسترده نشان داده است که ساختارهای ساندویچی، می‌توانند علی‌رغم کاهش جرم و مواد مصرفی در تولید قطعات، سطوح بالایی از استحکام ضربه‌ای و مکانیکی را از خود نشان دهند [۱۶]. در این خصوص، کشفی و همکاران [۱۵] در مطالعه‌ی انرژی جذب شده در نمونه‌های ساندویچی با هسته‌ی لانه زنبوری و چاپ سه‌بعدی شده از فیلامنت پلی‌لاکتیک اسید (PLA) را مورد بررسی قرار دادند. آکانفورا و همکاران [۱۲] در مطالعه‌ی خود، انرژی جذب شده در تیرهای ساندویچی متشکل از لایه‌ی داخلی و هسته‌ی لانه زنبوری چاپ سه‌بعدی شده از پلی‌پروپیلن و لایه‌ی خارجی متشکل از کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در این مطالعه بین نمودند که استفاده از این ساختار، علی‌رغم کاهش ۲۸ درصدی وزن قطعات، می‌تواند منجر به افزایش جذب انرژی تا ۴۴ درصد شود.

همچنین در این زمینه، هندسه‌ها و ساختارهای خاص دیگری نیز تا کنون مورد استفاده و مطالعه قرار گرفته‌اند. به عنوان مثال، در این زمینه می‌توان به مطالعه‌ی انجام شده توسط ابونده و همکاران [۱۷] اشاره نمود. آن‌ها در مطالعه‌ی خود، به منظور بهبود خواص مکانیکی قطعات ساخته شده از پلیمر پلی‌آمید، نمونه‌هایی از این ماده را با ساختارهای ژئروئیدی^۱ و بر مبنای چاپ سه‌بعدی آماده سازی نموده و بیان نمودند که با استفاده از این نوع از ساختارهای هندسی، می‌توان خواص فشاری این مواد را تا حد قابل توجهی افزایش داد. همچنین حبیب و همکاران [۱۸] نیز، تأثیر هندسه‌های مختلفی از سلول‌های لانه زنبوری را بر روی خواص فشاری قطعات ساخته شده از پلیمر پلی‌آمید و با استفاده از روش المان محدود، بررسی کردند. در این تحقیق، نه ساختار و هندسه‌ی مختلف از سلول‌های لانه زنبوری طراحی و تحت بارگذاری فشاری تک محوری قرار گرفتند. نتایج آن‌ها نشان داد که تغییر هندسه‌ی شکل‌های سلولی لانه زنبوری، می‌تواند تأثیر بسزایی را بر روی استحکام فشاری قطعات مورد بحث داشته باشد.

لذا همانطور که از مطالعات اشاره شده در بالا مشخص شد، پیدا کردن راهی برای بهینه‌سازی توأمان استحکام ضربه‌ای و کاهش وزن مواد به عنوان یکی از چالش‌های اساسی در صنایع مختلف به شمار می‌آید که توجه محققان بسیاری را به خود جلب نموده است. اما با این حال، تا کنون تحقیقات جامع و کاملی در خصوص استفاده از شکل‌های سلولی به عنوان روشی برای کاهش وزن و تأثیر آن بر خواص ضربه‌ای مواد انجام نشده است. از این رو، در مطالعه حاضر، با بهره‌مندی از قابلیت‌های گسترده‌ی چاپ سه‌بعدی، که در سال‌های اخیر به عنوان یکی از فناوری‌های نوآورانه و مقرون به صرفه به منظور تولید قطعات صنعتی به شمار

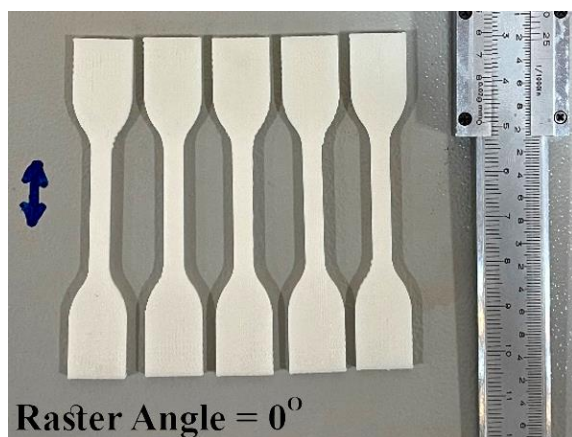
^۱ Gyroid-structure

می‌آید [۱۹ و ۲۰]، تلاش شده است تا نمونه‌هایی آماده شوند که با استفاده از شکل‌های سلولی در ساختارشان، وزن آن‌ها تا ۳۶ درصد کاهش یابد. برای این منظور، در نمونه‌های چاپ سه‌بعدی شده از فیلامنت آلی PLA، از سه شکل سلولی متفاوت (دایره‌ای^۲، ده‌ضلعی^۳ و شش‌ضلعی^۴) و دو آرایش مختلف (خطی^۵ و مورب^۶) استفاده شده است تا ضمن کاهش وزن ۳۶ درصدی، خواص و استحکام ضربه‌ای آن‌ها نیز مورد بررسی قرار گیرد. ذکر این نکته ضروری است که فیلامنت پلی لاکتیک اسید به عنوان ماده پایه در این پژوهش، که خواص زیستی برجسته‌ای را از خود ارائه می‌دهد [۲۱]، به دلیل شکنندگی ذاتی و استحکام ضربه‌ای ناچیز آن [۲۲]، می‌تواند گزینه‌ای مناسب به جهت سعی در بهبود خواص ضربه‌ای آن باشد. شایان‌ذکر است که در مطالعه‌ی حاضر و به‌منظور بررسی خواص ضربه‌ای مواد ذکر شده، از دو روش تحلیلی تجربی و المان محدود، بر پایه‌ی آزمون ضربه شارپی^۷، استفاده شده است. همچنین، برای ارزیابی خواص مکانیکی فیلامنت مورد استفاده، آزمون کشش نمونه‌های متناظر با استاندارد مربوطه انجام شده است تا با دستیابی به اطلاعات دقیق‌تری از خواص مکانیکی فیلامنت PLA، بتوان تحلیل‌های المان محدود را با دقت بیشتری انجام داد.

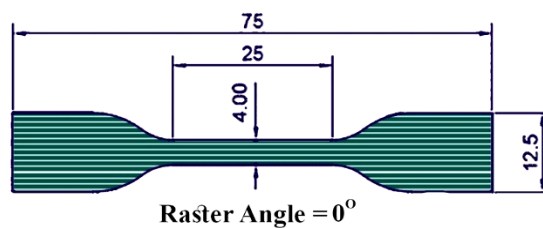
۲- مواد و روش

۲-۱- خواص مکانیکی

همانطور که در قبل نیز بیان شد، در این پژوهش و به‌منظور بررسی تأثیر شکل‌های سلولی و جای‌گیری آنها بر روی استحکام ضربه‌ای نمونه‌های چاپ سه‌بعدی شده، علاوه بر آزمون تجربی ضربه شارپی، از مدلسازی المان محدود متناظر با این آزمون نیز بهره گرفته شده است. لذا در ابتدا، برای دستیابی به نتایجی دقیق‌تر از تحلیل‌های المان محدود، سعی در تعیین خواص مکانیکی فیلامنت پلی لاکتیک اسید مورد استفاده، تهیه شده از شرکت ایسان^۸، شد. بدین منظور و برای تعیین خواص مکانیکی فیلامنت پلی لاکتیک اسید استفاده‌شده، نمونه‌هایی مطابق با استاندارد ISO 527 [۲۳] و با استفاده از چاپگر سه‌بعدی FDM^۹، آماده‌سازی شدند. لازم به توضیح است که به‌منظور تعیین خواص مکانیکی در راستاهای درون صفحه، زاویه‌ی چاپ (θ_R , Raster Angle) برای نمونه‌ها ۰ و ۹۰ درجه در نظر گرفته شد (شکل ۱). همچنین جهت رعایت تکرارپذیری نتایج تجربی، پنج نمونه از هر گروه آماده سازی شدند.



(ب)



(الف)

شکل ۱ نمونه‌های چاپ سه‌بعدی شده‌ی متناظر با آزمون کشش با زاویه‌ی چاپ فیلامنت: (الف) صفر، (ب) صفر

^۲ Circular

^۳ Decagonal

^۴ Hexagonal

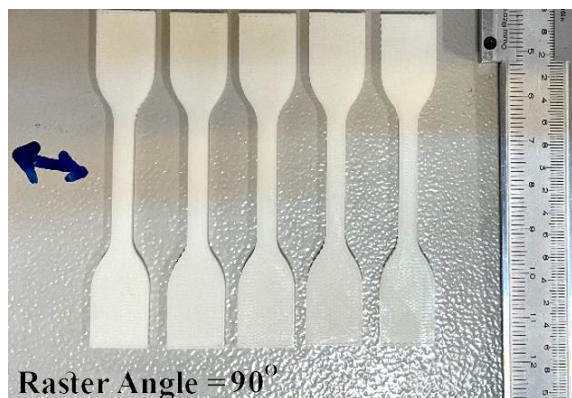
^۵ Linearly

^۶ Diagonally

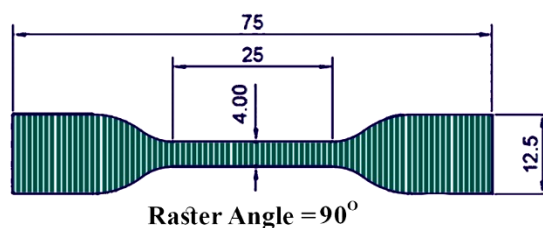
^۷ Charpy Impact Test

^۸ eSun

^۹ Fused Deposition Modeling



(د)



(ج)

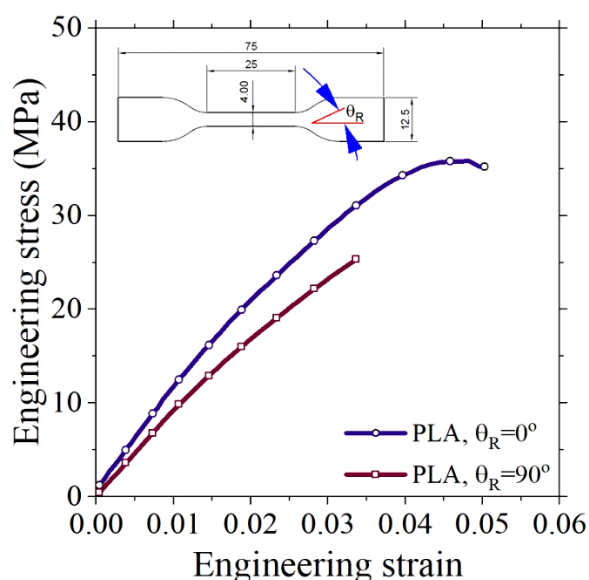
شکل ۲ نمونه‌های چاپ سه‌بعدی شده‌ی متناظر با آزمون کشش با زاویه‌ی چاپ فیلامنت: (ج) ۹۰ و (د) ۹۰ درجه

ذکر این نکته ضروری است که فرآیند چاپ سه‌بعدی نمونه‌های موردنظر، با ضخامت لایه‌گذاری ۰/۲ میلی‌متر و پارامترهای چاپ سه‌بعدی ارائه شده در جدول ۱، انجام شد.

جدول ۱ پارامترهای چاپ سه‌بعدی استفاده شده

مقدار	پارامتر چاپ سه‌بعدی	مقدار	پارامتر چاپ سه‌بعدی
۰/۴	قطر نازل، (mm)	۲۰۵	دمای نازل، (°C)
۱۰۰	سرعت فن خنک‌کننده، (%)	۴۰	دمای تخت، (°C)

پس از آماده‌سازی نمونه‌های آزمون کشش، خواص مکانیکی فیلامنت مورد استفاده در این پژوهش، متناظر با این آزمون و با استفاده از دستگاه کشش سنتام^{۱۰}، استخراج شد. لازم به ذکر است که در این آزمون، ظرفیت نیروسنج مورد استفاده و همچنین نرخ بارگذاری کششی، به ترتیب معادل با ۱۰۰ کلیونیوتن و ۱ میلی‌متر بر دقیقه بود. در این خصوص و مطابق با نتایج آزمون‌های کشش و همچنین منحنی تنش-کرنش مهندسی ارائه شده در شکل ۲، پارامترهای E_{11} ، E_{22} ، X_1 ، Y_1 و U_{12} متناظر با فیلامنت مورد استفاده، به ترتیب برابر با ۱/۴۱ گیگاپاسکال، ۰/۹۴ گیگاپاسکال، ۳۵/۲۰ مگاپاسکال، ۲۵/۳۰ مگاپاسکال و ۰/۴۳ گزارش می‌گردند.

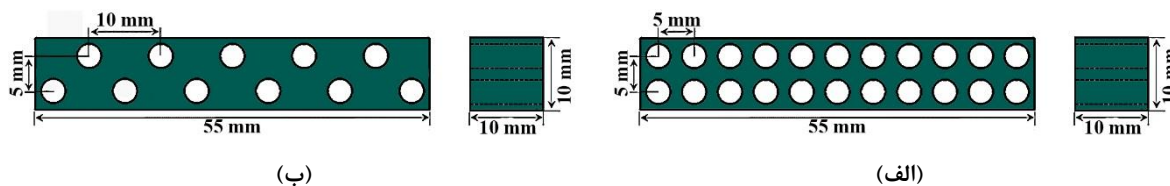


شکل ۳ منحنی تنش کرنش متناظر با نمونه‌های چاپ سه‌بعدی شده در دو زاویه‌ی چاپ ۰ و ۹۰ درجه

¹⁰ SANTAM

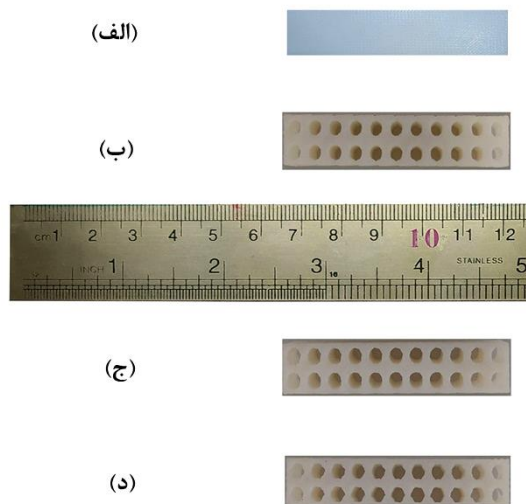
۲-۲- آماده سازی نمونه ها و آزمون ضربه

همان طور که پیش تر اشاره شد، هدف این پژوهش ارائه رویکردی نوین برای افزایش انرژی جذب شده در نمونه های چاپ سه بعدی از فیلامنت پلیمری پلی لاکتیک اسید و همچنین کاهش وزن آن ها از طریق ایجاد حفره ها و اشکال سلولی مختلف است. لذا بدین منظور سه شکل سلولی با هندسه های دایره ای، ده ضلعی و شش ضلعی انتخاب شده اند تا کاهش وزن مورد نظر محقق شود. علاوه بر موارد ذکر شده، در این پژوهش تأثیر جای گیری اشکال سلولی مذکور نیز، با دو چینش مختلف (یعنی خطی و مورب) مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۳). باید ذکر شود که ابعاد هندسی شکل های سلولی هر یک از گروه های چینشی به گونه ای طراحی شده اند که امکان کاهش ۳۶ درصدی وزن را فراهم سازند؛ به طوری که وزن نمونه های بدون اشکال سلولی از ۶/۸۷ گرم به ۴/۳۸ گرم در نمونه های با اشکال سلولی کاهش می یابد.



شکل ۴ شماتیک از جای گیری شکل های سلولی در نمونه های آزمون ضربه شاریپی: (الف) جای گیری خطی و (ب) جای گیری مورب

در ادامه و به منظور آماده سازی نمونه های آزمون ضربه شاریپی (شکل ۴)، مدل های سه بعدی مورد نظر، مطابق با استاندارد ASTM E23 [۲۴] در نرم افزار شبیه ساز انسیس^{۱۱} طراحی شده و سپس با استفاده از نرم افزار کیورا^{۱۲} به مدل هندسی (G-Code) تبدیل گردیدند. شایان ذکر است که ابعاد هندسی نمونه ها در طول، عرض و ضخامت به ترتیب ۵۵، ۱۰ و ۱۰ میلی متر تنظیم شد. در نهایت، چاپ سه بعدی نمونه های مورد نظر برای آزمون ضربه شاریپی با استفاده از پارامترهای چاپ مشخص شده در جدول ۱ و همچنین متناظر با مدل های هندسی طراحی شده، انجام شد. قابل ذکر است که در این پژوهش و به منظور حفظ تکرارپذیری نتایج، سه نمونه از هر یک از گروه هایی با چینش و جای گیری خطی، متعلق به اشکال سلولی دایره ای، ده ضلعی و شش ضلعی، تهیه گردید.



شکل ۵ نمونه های ضربه شاریپی: (الف) نمونه ی مرجع و نمونه های دارای شکل های سلولی خطی (ب) دایره ای، (ج) ده ضلعی و (د) شش ضلعی





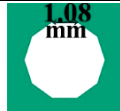

^{۱۱} ANSYS Design Modeler

^{۱۲} Ultimaker Cura

پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، آزمون ضربه شاریبی با استفاده از دستگاه ضربه شاریبی، ساخت شرکت سنتام^{۱۳} و با ظرفیت ۲۰۰ ژول، انجام شد. لازم به توضیح است که دستگاه آزمایش شاریبی مورد استفاده، مجهز به یک سیستم کالیبراسیون خودکار بود. در این راستا و به منظور کالیبره کردن دستگاه، پیش از انجام آزمایش‌ها و بدون وجود نمونه، پاندول ضربه‌زن رها شده و پس از ده چرخه‌ی کامل، سیستم به‌طور خودکار کالیبره و برای انجام آزمون ضربه، آماده گردید.

در این بخش و در جدول ۲، به‌منظور حفظ یکپارچگی مطالب و همچنین سهولت در تشخیص نتایج متناظر با هر یک از نمونه‌های مورد بررسی، برای هر یک از نمونه‌ها، کد معرف خاصی ارائه شده است. شایان‌ذکر است که هر یک از کدهای معرف از سه بخش تشکیل شده‌اند. به‌طوریکه هر بخش به ترتیب بیانگر نوع شکل‌های سلولی در ساختار نمونه‌های ضربه (یعنی شکل سلولی دایره‌ای با نماد "Ci"، شکل سلولی ده‌ضلعی با نماد "De" و شکل سلولی شش‌ضلعی با نماد "H")، درصد کاهش جرم (۳۶٪) و همچنین چینش و جای‌گیری شکل‌های سلولی در ساختار نمونه‌ها (یعنی جای‌گیری خطی با نماد "L" و جای‌گیری مورب با نماد "D") می‌باشد.

جدول ۲ معرفی کدهای متناظر با نمونه‌های آزمون ضربه شاریبی مورد بررسی

H-36%-D	De-36%-D	Ci-36%-D	H-36%-L	De-36%-L	Ci-36%-L	Pure PLA	کد نمونه
	٪۳۶			٪۳۶		۰	درصد کاهش جرم
		مورب (به شکل ۳-ب مراجعه شود)			خطی (به شکل ۳-الف مراجعه شود)	-	چینش سلول‌ها
						-	ساختار سلول‌ها

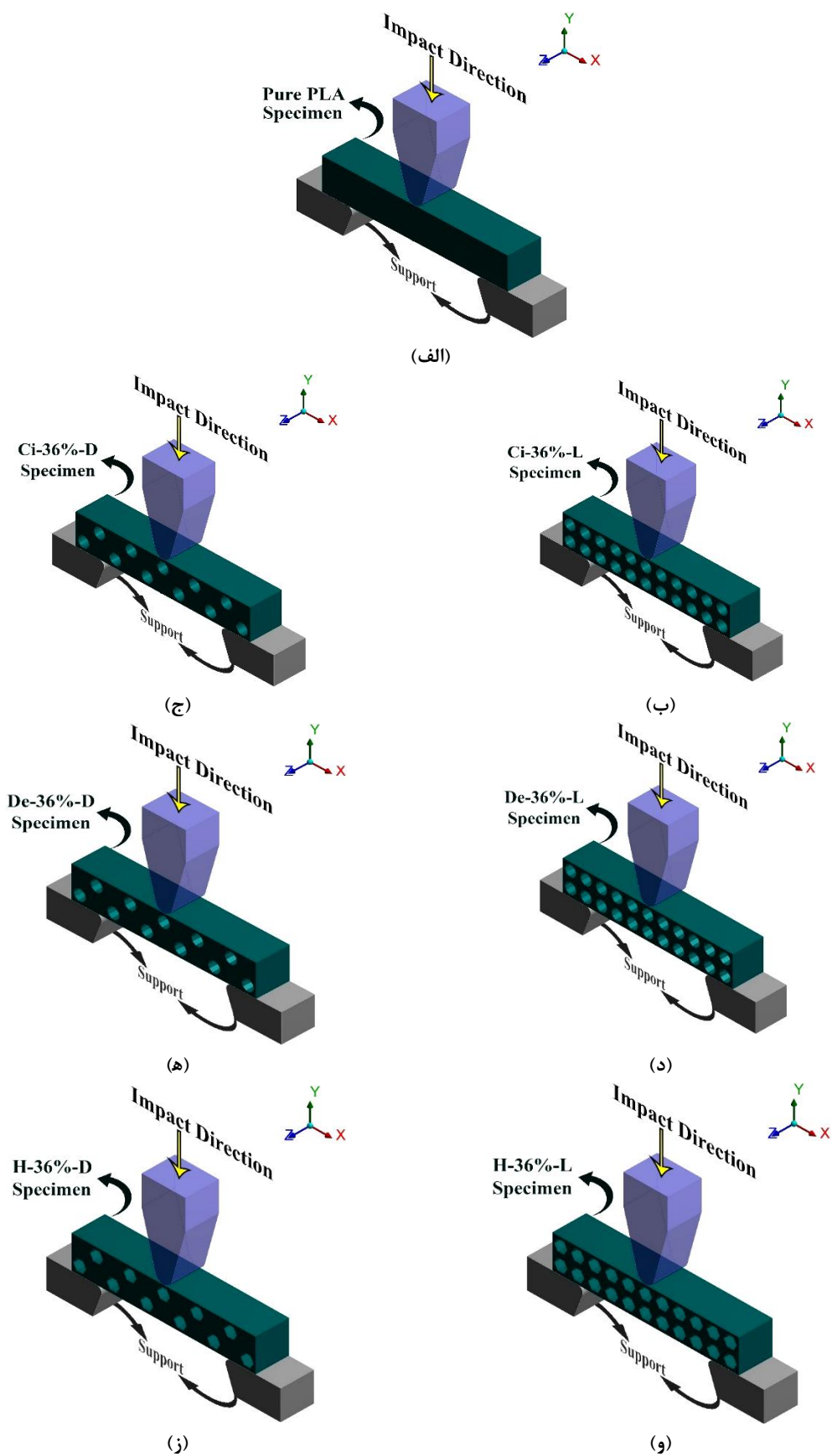
۲-۳- مدلسازی و تحلیل المان محدود

در این پژوهش علاوه بر آزمون‌های تجربی ضربه شاریبی، تحلیل المان محدود این آزمون نیز در نرم افزار انسیس با حل‌کننده‌ی دینامیکی^{۱۴} انجام شد. اشاره به این نکته ضروری است که در این مطالعه، اعتبارسنجی فرضیات و نتایج مربوط به شبیه‌سازی آزمون شاریبی برای نمونه‌هایی با جای‌گیری سلولی خطی، بر اساس نتایج تجربی انجام گرفت. پس از آن، نتایج عددی انرژی جذب شده برای نمونه‌هایی با جای‌گیری سلولی مورب از طریق تحلیل‌های المان محدود مورد بررسی قرار گرفت.

در این زمینه، همانطور که از شکل ۵ مشخص است، در تمامی نمونه‌ها، مدل‌سازی انجام شده به چهار قسمت مختلف تقسیم شد. این چهار قسمت شامل، یک ضربه‌زن، یک نمونه و دو تکیه‌گاه بود که ابعاد آن‌ها با مشخصات آزمایش تطابق داشته است. شایان‌ذکر است که در این شبیه‌سازی، قیود و شرایط مرزی به‌گونه‌ای سازماندهی شدند که هر دو تکیه‌گاه در تمام درجات آزادی، ثابت و ضربه‌زن فقط در راستای Y امکان حرکت داشته باشد. همچنین برای دستیابی به انرژی مورد نیاز و یکسان با آزمون تجربی ضربه شاریبی، چگالی ضربه‌زن افزایش یافته و سرعت آن نیز معادل با ۵/۴۳ متر بر ثانیه، تعیین شد. در نهایت نیز به‌منظور بهبود دقت مدل المان محدود شبیه‌سازی شده، تماس segment-to-segment بین ضربه‌زن و نمونه، و همچنین بین نمونه و هر دو تکیه‌گاه ایجاد و ضریب اصطکاک نیز ۰/۳ در نظر گرفته شد [۲۵ و ۲۶]. شایان‌ذکر است که خواص مکانیکی متناظر با مواد مورد استفاده در این شبیه‌سازی، برای ضربه‌زن و تکیه‌گاه‌ها، مدل الاستیک خطی و همچنین برای نمونه نیز مدل اورتوتروپ (متناظر با خواص مکانیکی ارائه شده در قبل) در نظر گرفته شد. همچنین به منظور تحلیل شکست نمونه‌ها، معیار تنش ماکسیمم برای تمامی آن‌ها و بر اساس خواص شکست فیلامنت PLA مورد استفاده، فعال گردید.

¹³ Santam Company

¹⁴ ANSYS Workbench Explicit Dynamic

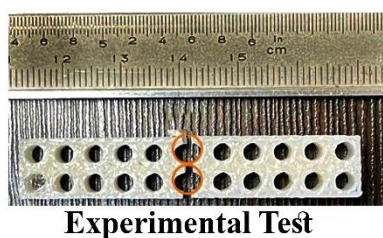
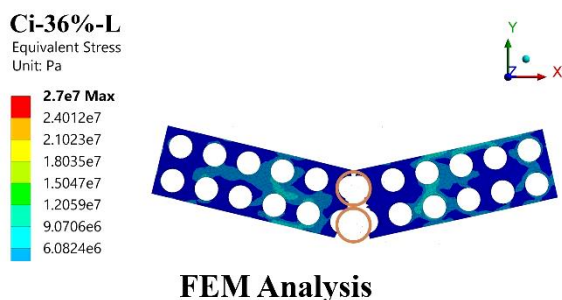


شکل ۶ مدل‌های سه‌بعدی شبیه‌سازی شده‌ی متناظر با نمونه‌های (الف) Pure PLA، (ب) Ci-36%-L، (ج) Ci-36%-D، (د) De-36%-L، (ه) De-36%-D، (و) H-36%-L و (ز) H-36%-D

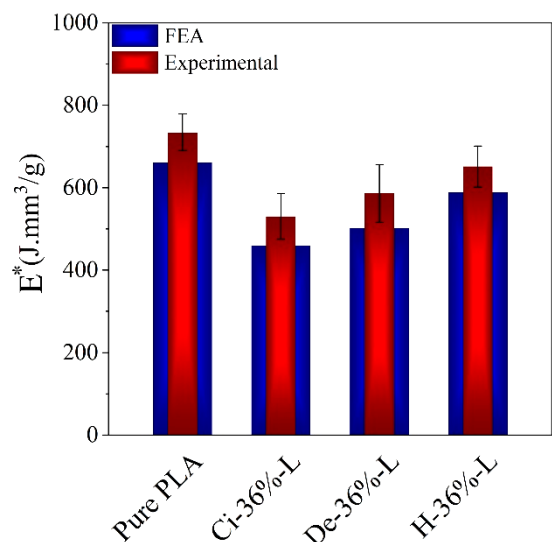
۳- نتایج و بحث

در این پژوهش، همان‌طور که اشاره شد، نتایج مربوط به انرژی جذب‌شده در نمونه‌های چاپ سه‌بعدی شده از فیلامنت پلی لاکتیک اسید، از هر دو روش تجربی و تحلیل المان محدود مورد بررسی قرار گرفته است. لذا با توجه به اهمیت اعتبارسنجی نتایج حاصل شده از تحلیل‌های المان محدود، در ابتدا، نتایج تجربی آزمون ضربه‌ای مربوط به نمونه‌های دارای شکل‌های سلولی با چینش و جای‌گیری خطی با نتایج به دست آمده از تحلیل المان محدود متناظر با این نمونه‌ها ارزیابی و مقایسه شدند. در این خصوص، همان‌طور که از شکل ۶-الف مشخص است، فرضیات و روش حاکم بر تحلیل المان محدود انجام شده، امکان انطباق مطلوب مقادیر انرژی جذب شده بر مبنای چگالی ویژه‌ی نمونه‌های مورد بررسی (E^*) را، از هر دو روش تجربی و عددی، فراهم نموده است. در این زمینه و با توجه به شکل ۶-الف، می‌توان بیان نمود که درصد خطا و اختلاف میان داده‌های تجربی و المان محدود در این پژوهش، به‌طور میانگین، معادل با ۱۱٪ بوده است. لازم به توضیح است که پارمتر E^* در این پژوهش، از تقسیم انرژی جذب شده بر چگالی ویژه‌ی نمونه‌ها ارائه شده است. چگالی ویژه نمونه‌ها (که از تقسیم جرم نمونه بر حجم اشغال شده توسط فیلامنت بیان می‌گردد) نیز، به ترتیب برای نمونه‌ی با/بدون شکل سلولی معادل با ۷۹۶ و ۱۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است.

همچنین مطابق با شکل ۶-ب ارائه شده، مشخص است که علاوه بر انطباق مناسب داده‌ی متناظر با انرژی جذب شده در هر دو روش تحلیلی تجربی و المان محدود؛ این دو روش تحلیلی، در تشخیص راستا و جهت گسترش آسیب در ساختار نمونه‌های مورد بحث نیز، هم‌گرایی مناسبی دارند. به‌طوریکه هر دو روش، راستای گسترش آسیب و ترک در این نمونه‌ها را به صورت خطی و گسترش‌یافته از بخش زیرین نمونه به سمت بخش بالای نمونه نشان می‌دهند. لذا با توجه به مطالب بیان شده در بالا، می‌توان بیان نمود که اعتبار سنجی مدل المان محدود به‌کار گرفته شده در این پژوهش، مورد تأیید بوده و امکان توسعه‌ی آن برای دیگر نمونه‌ها را فراهم می‌کند.



(ب)

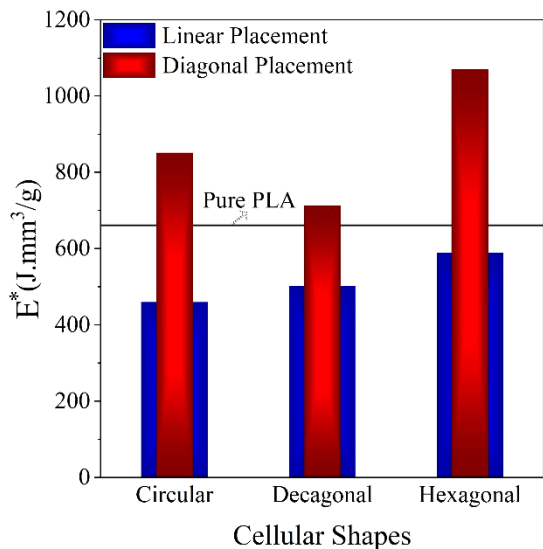


(الف)

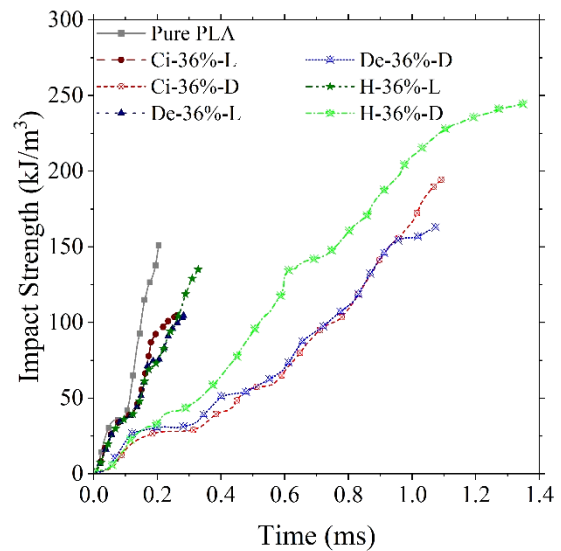
شکل ۷ اعتبارسنجی تحلیل المان محدود متناظر با: (الف) نتایج انرژی ویژه‌ی جذب شده و (ب) تشخیص راستای شکست

پس از اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از هر دو روش تحلیلی تجربی و المان محدود، می‌توان تحلیل جامع‌تری از تأثیر هندسه و جای‌گیری شکل‌های سلولی در ساختار نمونه‌های چاپ سه‌بعدی شده از فیلامنت PLA ارائه داد. در این خصوص، همان‌طور که از شکل ۷ مشخص است، تفاوت محسوسی در استحکام ضربه‌ای نمونه‌های مورد بررسی و همچنین روند تغییرات این خاصیت در طول فرآیند آسیب ضربه‌ای مشاهده می‌شود (شکل ۷-الف). در ادامه برای درک بهتر این موضوع، تأثیر هندسه‌ی شکل‌های سلولی و نحوه‌ی جای‌گیری آن‌ها بر روی رفتار جذب انرژی ضربه‌ای نمونه‌های مورد بررسی، به‌صورت تفکیک شده مورد مطالعه

قرار خواهد گرفت. در این راستا، همان‌طور که از نتایج ارائه‌شده در شکل ۷ مشخص است، بهترین عملکرد در طول فرآیند جذب انرژی در آزمون ضربه شاریبی، به ترتیب متعلق به ساختارهای سلولی شش‌ضلعی، ده‌ضلعی و دایره‌ای است که دلیل این امر به تفاوت‌های ساختاری این هندسه‌ها بازمی‌گردد. در واقع به‌منظور تحلیلی شفاف می‌توان بیان نمود که علی‌رغم وجود گوشه‌هایی با زاویه‌ی تندتر در ساختارهای سلولی شش‌ضلعی، به دلیل توزیع یکنواخت‌تر تنش در این نوع از ساختارهای لانه‌زنبوری، جذب انرژی بیشتری مشاهده می‌شود. اما در مقابل، در نمونه‌های دایره‌ای این ویژگی حاصل نشده و به دلیل ایجاد ناگهانی تمرکز تنش در سطوح جانبی حفره‌های دایره‌ای، ترک به‌صورت ناگهانی رشد کرده و در نهایت با سرعت بیشتری در ساختار نمونه‌های متناظر، گسترش می‌یابد. همچنین مطابق با نتایج ارائه شده، می‌توان بیان نمود که ساختارهای سلولی ده‌ضلعی که از لحاظ ساختاری، ویژگی‌هایی بین سلول‌های دایره‌ای و شش‌ضلعی دارند، مقدار انرژی جذب‌شده‌ی متوسطی را در مقایسه با دیگر نمونه‌ها نشان می‌دهند.



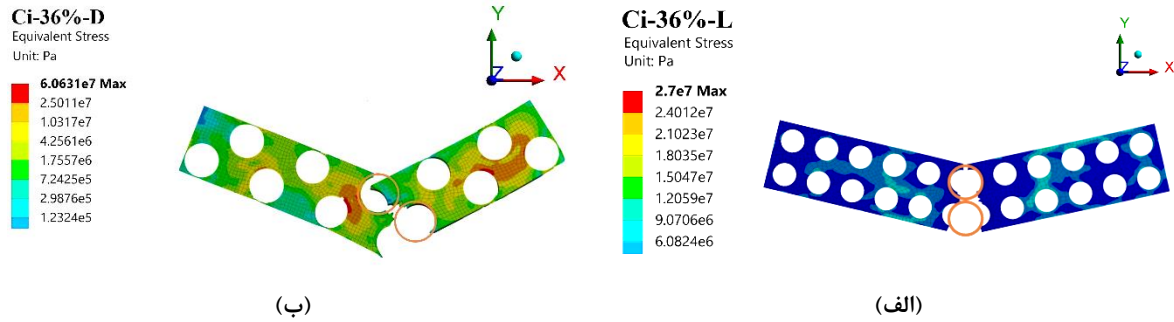
(ب)



(الف)

شکل ۸ (الف) نمودار تغییرات استحکام ضربه‌ای تا لحظه‌ی شکست و (ب) مقادیر انرژی ویژه‌ی جذب شده؛ برای نمونه‌های مورد بررسی در مورد تأثیر نحوه‌ی جای‌گیری سلول‌ها بر روی استحکام ضربه‌ای نمونه‌ها نیز، مقایسه‌ی نتایج ارائه‌شده در شکل ۷-ب نشان می‌دهد که نمونه‌هایی با ساختار سلولی و جای‌گیری مورب، افزایش چشمگیری در مقدار استحکام ضربه‌ای دارند. همچنین، مقایسه‌ی رفتار جذب انرژی در نمونه‌هایی با شکل‌های سلولی خطی و مورب (شکل ۷-الف) نشان می‌دهد که نمونه‌های بدون ساختار سلولی و حتی نمونه‌هایی با ساختارهای سلولی خطی، علی‌رغم نمایش مقدار بالاتری از سطوح انرژی لحظه‌ای، به‌صورت کلی انرژی جذب‌شده‌ی کمتری را ارائه می‌کنند. لازم به توضیح است که در این مورد می‌توان بیان نمود که این امر نشان از گسترش ناگهانی و لحظه‌ای ترک در ساختار این نمونه‌ها دارد. اما در مقابل، نمونه‌های دارای ساختارهای سلولی مورب، اگرچه سطوح انرژی لحظه‌ای پایین‌تری را نسبت به نمونه‌های با بدون ساختار خطی نشان می‌دهند، اما در مجموع مقدار انرژی جذب‌شده‌ی نهایی بیشتری را دارند. این ویژگی در نمونه‌ی De-36%-D بیشترین نمود را داشته و تأثیر مثبت این نوع از ساختارهای سلولی و نحوه‌ی جای‌گیری آن‌ها را در استحکام ضربه‌ای نمونه‌های چاپ سه‌بعدی شده از فیلامنت PLA تأیید می‌کند. شایان ذکر است که در نمونه‌های مورب، با ایجاد کرنش برشی، زمان رشد ترک و همچنین شکست نهایی نمونه افزایش می‌یابد و در نتیجه مجموع انرژی جذب‌شده مقدار بالاتری خواهد داشت. این موضوع را می‌توان با تصاویر ارائه‌شده در شکل ۸ و مقایسه‌ی رفتار شکست نمونه‌های خطی و مورب نیز مشاهده کرد. به‌عبارتی دیگر، همان‌طور که از شکل ۸ مشخص است، به دلیل ساختار

مورب و امکان بیشتر برای ایجاد مفصل پلاستیک^{۱۵} در این نمونه‌ها [۲۷]، راستای شکست برخلاف نمونه‌های خطی که عمود بر سطوح بیرونی است، تقریباً در زاویه‌ی ۴۵ درجه رخ داده است. لذا به‌صورت کلی، این امر می‌تواند منجر به رفتار تدریجی‌تر در فرآیند جذب انرژی و افزایش زمان شکست و انرژی جذب شده در این نمونه‌ها شده است (به شکل ۷ مراجعه شود).



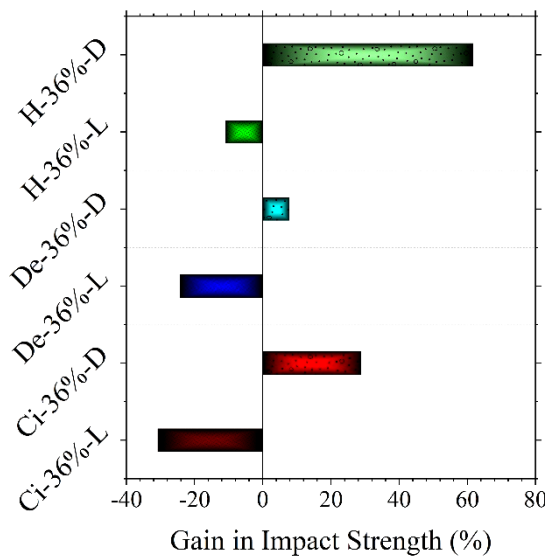
شکل ۹ تأثیر جای‌گیری شکل‌های سلولی بر روی راستای شکست نمونه‌های مورد بررسی: (الف) Ci-36%-L و (ب) Ci-36%-D

به‌عبارتی دیگر، به دلیل اینکه در نمونه‌های مورب، آسیب ضربه‌ای در زاویه گسترش می‌یابد، لذا فرآیند طول رشد ترک افزایش یافته و در نتیجه فرآیند شکست در مدت زمان بیشتری رخ می‌دهد. همچنین در این خصوص نیز، همانطور که از مقایسه‌ی داده‌های ارائه شده در جدول ۳ مشخص است، نمونه‌های دارای جای‌گیری مورب، تا ۵۷۵ درصد افزایش در زمان شکست نهایی قطعه را نشان می‌دهند که مصداق دیگری از تأثیر بسزای این نوع از جای‌گیری بر روی رفتار جذب انرژی این نوع از نمونه‌ها می‌باشد.

جدول ۳ مقایسه‌ی زمان شکست متناظر با نمونه‌های آزمون ضربه شاریبی

H-36%-D	H-36%-L	De-36%-D	De-36%-L	Ci-36%-D	Ci-36%-L	Pure PLA	کد نمونه
۱/۳۵	۰/۳۳	۱/۰۷	۰/۲۸	۱/۰۹	۰/۲۶	۰/۲	زمان شکست (ms)

در نهایت و به‌منظور درک جامع‌تر از تأثیر انواع ساختارهای سلولی و نحوه‌ی جای‌گیری آن‌ها بر روی استحکام ضربه‌ای نمونه‌های چاپ سه‌بعدی شده از فیلامنت PLA، در شکل ۹ تغییرات درصدی این خاصیت برای هر یک از نمونه‌های مورد بحث ارائه شده است.



شکل ۱۰ تغییرات استحکام ضربه‌ای نمونه‌های دارای ساختارهای سلولی در مقایسه با نمونه‌ی Pure PLA (مرجع)

¹⁵ Plastic Hinge

همانطور که از نتایج ارائه شده در شکل ۹ مشخص است، بهترین نوع شکل سلولی در این پژوهش، شکل سلولی شش ضلعی و همچنین بهترین نوع جای گیری نیز، جای گیری مورب می باشد. به گونه ای که در این بین، نمونه H-36%D علی رغم کاهش ۳۶ درصدی در جرم، افزایش ۶۲ درصدی را در استحکام ضربه ای از خود نشان داده است.

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه، رویکردی نو به منظور افزایش حداکثری انرژی جذب شده در نمونه های چاپ سه بعدی شده، در کنار کاهش جرم و مواد اولیه مصرفی متناظر با آنها، دنبال شد. بدین منظور تأثیر سه هندسه متفاوت از شکل های سلولی (دایره ای، ده ضلعی و شش ضلعی) و دو نحوه جای گیری متفاوت از آنها (خطی و مورب)، بر استحکام ضربه ای نمونه های چاپ سه بعدی شده از فیلامنت PLA مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که بررسی تأثیر الگوی جای گیری سلول ها، نوآوری مهمی در این پژوهش به شمار می رود که می تواند مبنایی برای بهینه سازی طراحی ساختارهای سبک و مقاوم در کاربردهای مختلف مهندسی، از جمله صنایع هوافضا، خودروسازی و پزشکی باشد، جایی که نسبت استحکام به وزن از اهمیت بالایی برخوردار است. بدین منظور و برای انجام این پژوهش، از دو رویکرد تحلیلی متفاوت (تجربی و المان محدود) استفاده شد. شایان ذکر است که به منظور دستیابی به خواص مکانیکی فیلامنت PLA مورد استفاده، آزمون های تجربی کشش نیز، مطابق با استاندارد متناظر با آن، انجام شد. در نهایت و پس از انجام آزمون تجربی ضربه شاریپی و همچنین تحلیل المان محدود این آزمون، نتایج کلیدی این پژوهش به صورت زیر ارائه می گردد:

- مطابقت بالای نتایج به دست آمده از آزمون تجربی ضربه شاریپی و تحلیل المان محدود متناظر با این آزمون، صحت تحلیل های ارائه شده را اثبات کرده و امکان دستیابی به چارچوبی قابل اتکا برای طراحی ساختارهای دیگر را فراهم کرد.
- نمونه هایی که دارای شکل های سلولی شش ضلعی بودند، به دلیل توزیع یکنواخت تر تنش، بالاترین میزان جذب انرژی را نشان دادند. این امر در حالی است که ساختارهای دایره ای، به دلیل امکان ایجاد تمرکز تنش ناگهانی در لبه ها، پایین ترین میزان را داشتند.
- امکان ایجاد مفصل پلاستیک (بیشتر) در ساختارهای مورب، مسیر شکست را تغییر داده و منجر به کاهش تمرکز تنش های موضعی شد که این موضوع، مکانیزم شکست را از یک پدیده ی ترد و ناگهانی به یک فرآیند تدریجی تر تبدیل کرد.
- زمان شکست نهایی در نمونه های مورب، به دلیل عملکرد بهینه ای این نوع آرایش در به تأخیر انداختن گسترش ترک و افزایش انرژی جذب شده، تا ۵۷۵ درصد افزایش داشته باشد.
- در نمونه های دارای چینش مورب، مسیر گسترش ترک به جای راستای عمودی، به صورت زاویه دار و تدریجی بوده و این امر باعث افزایش مقاومت ساختار در برابر شکست ناگهانی شد.
- نمونه ای دارای شکل های سلولی شش ضلعی و با جای گیری مورب (H-36%D)، به عنوان بهینه ترین نمونه و ساختار در بین تمامی نمونه های مورد بحث، شناخته شد. به طوریکه در این نمونه ها، با وجود کاهش ۳۶ درصدی جرم، افزایش ۶۲ درصدی در استحکام ضربه ای مشاهده شد.

لذا با توجه به نتایج تجربی و عددی این مطالعه، می توان بیان کرد که با تغییر طراحی سلول های داخلی و نحوه جای گیری آن ها، می توان با کاهش مواد مصرفی و وزن نمونه ها، عملکرد مکانیکی این نوع از ساختارها را در برابر ضربه، بهبود بخشید. شایان ذکر است که می توان با بررسی تأثیر هندسه هایی دیگر (همچون مثلثی و مربعی)، درصدهای کاهش وزنی متفاوت در ساختار نمونه ها و همچنین استفاده از فیلامنت هایی به روز و ترکیبی، مطالعه ای حاضر را گسترش داده و امکان دستیابی به طراحی های بهینه تری را، برای کاربردهای صنعتی، فراهم کرد.

Authorship Contribution Statement

Hossein Kazemi



Biography: MSc Student, Solid Mechanics Group, Faculty of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

Contribution Statement: Conceptualization, Formal analysis, Software, Validation, Investigation, Data curation, Visualization, Writing – original draft.

Dr. Mohammad Kashfi



Biography: Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Ayatollah Boroujerdi University, Boroujerd, Iran.

Contribution Statement: Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Visualization, Writing – review & editing, Supervision, Project administration.

Leila Soleymani



Biography: MSc Student, Thermal and Fluid Sciences Group, Faculty of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

Contribution Statement: Investigation, Writing – original draft, Writing – review & editing.

Dr. Sayed Hassan Nourbakhsh



Biography: Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

Contribution Statement: Conceptualization, Writing – review & editing.

۵- مراجع

- [1] Zhang Z, Mu Z, Wang Y, Song W, Yu H, Zhang S, et al. Lightweight Structural Biomaterials with Excellent Mechanical Performance: A Review. *Biomimetics*. 2023.
- [2] Soni R, Verma R, Kumar Garg R, Sharma V. A critical review of recent advances in the aerospace materials. *Materials Today: Proceedings*. 2024;113:180-4.
- [3] Siengchin S. A review on lightweight materials for defence applications: Present and future developments. *Defence Technology*. 2023;24:1-17.
- [4] Weberpals J-P, Schmidt PA, Böhm D, Müller S. Advantages and challenges of dissimilar materials in automotive lightweight construction. *High-Power Laser Materials Processing: Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications IV: SPIE*; 2015;9356:49-57.
- [5] Salamat-Talab M, Kazemi H, Safari M, Joudaki J. Aluminum-Based Fiber Metal Laminates in the Aircraft Industry. In: Gürgen S, editor. *Aluminum Technologies in Aerospace Applications*. Cham: Springer Nature Switzerland; 2025;93-125.
- [6] Zhang W, Xu J. Advanced lightweight materials for Automobiles: A review. *Materials & Design*. 2022;221:110994.

- [7] Akhavan-Safar A, Salamat-Talab M, Delzendehrooy F, Barbosa AQ, da Silva LFM. Mode II fracture energy of laminated composites enhanced with micro-cork particles. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2021;43:490.
- [8] Kazemi H, Salamat-Talab M, Ghanbari D. Enhancing Mechanical and Thermal Properties of Nanocomposites Using Novel Silica/Mg(OH)₂ Green Composite Nanoparticles. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*. 2025;35:356-73.
- [9] Karami Khorramabadi M, Hadipour F, Dousti B. Investigating the effect of nanocellulose and nanoparticles of rosemary extract on elastic and antibacterial properties of epoxy-based biocomposite. *Mechanic of Advanced and Smart Materials*. 2024;3:491-515. (in Persian)
- [10] Velashjerdi M, Soleymani M, moghadas zadeh y. Investigations of the Mechanical Properties of DLP 3D Printed Graphene/Poly-Amide Composites in different printing directions. *Mechanic of Advanced and Smart Materials*. 2024;4:189-206. (in Persian)
- [11] Yousefzadeh S, Kashfi M, Kahhal P, Ansari-asl A. An Experimental Investigation on Tensile and Impact Properties of Bagasse/Polypropylene Natural Composite. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*. 2019;52:2149-60.
- [12] Acanfora V, Sellitto A, Russo A, Zarrelli M, Riccio A. Experimental investigation on 3D printed lightweight sandwich structures for energy absorption aerospace applications. *Aerospace Science and Technology*. 2023;137:108276.
- [13] Türkoğlu İK, Kasim H, Yazici M. Experimental investigation of 3D-printed auxetic core sandwich structures under quasi-static and dynamic compression and bending loads. *International Journal of Protective Structures*. 2022:204141962210793.
- [14] Hosseini R, Yarmohammad Tooski M, khorshidvand AR, Khorsandijou SM. Experimental investigation of charpy impact in energy absorption of hybrid and non-hybrid sandwich structures reinforced with carbon nanofiber. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2022;9:1920-12. (in Persian)
- [15] Kashfi M, Amirhossein Adavi, Ramin Beyranvand, Alborz Mohebi, Majzoobi G. Experimental Investigation of Impact Energy Absorption in Sandwich Structures with 3D-Printed Core. 31st Annual International Conference of the Iranian Society of Mechanical Engineers. Tehran. 2023. (in Persian)
- [16] Hause TJ. Dynamic Response to Time-Dependent External Excitations. In: Hause TJ, editor. *Sandwich Structures: Theory and Responses*. Cham: Springer International Publishing; 2021.155-82.
- [17] Abueidda DW, Elhebeary M, Shiang C-S, Pang S, Abu Al-Rub RK, Jasiuk IM. Mechanical properties of 3D printed polymeric Gyroid cellular structures: Experimental and finite element study. *Materials & Design*. 2019;165:107597.
- [18] Habib FN, Iovenitti P, Masood SH, Nikzad M. Cell geometry effect on in-plane energy absorption of periodic honeycomb structures. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;94:2369-80.
- [19] Kumar S. Advantage and Disadvantage. In: Kumar S, editor. *Additive Manufacturing Advantage*. Cham: Springer Nature Switzerland; 2023.1-60.
- [20] Kazemi H, Salamat-Talab M. Enhancing Mode II Interlaminar Fracture Toughness in Glass/Epoxy Composites Using 3D-Printed Polyvinyl Alcohol Interlayer. *Mechanic of Advanced and Smart Materials*. 2024;4:256-71. (in Persian)
- [21] Raj SA, Muthukumaran E, Jayakrishna K. A Case Study of 3D Printed PLA and Its Mechanical Properties. *Materials Today: Proceedings*. 2018;5:11219-26.
- [22] Letcher T, Waytashek M. Material Property Testing of 3D-Printed Specimen in PLA on an Entry-Level 3D Printer. *ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. 2014.

- [23] 527-1 I. ISO 527, Plastics — Determination of tensile properties. 2019.
- [24] E23-24 A. ASTM E23-24, Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. 2024.
- [25] Ramadan M, Sabour H, El-Shenawy E. Tribological Properties of 3D Printed Polymers: PCL, ABS, PLA and Co Polyester. *Tribology in Industry*. 2023;45:161-7.
- [26] Kashfi M, Kazemi H, Nourbakhsh SH. Effect of cell shape and mass reduction on the impact strength of cellular 3D-printed parts. *Journal of Nanostructures*. 2024.
- [27] Choubini M, Liaghat G H, M. P. Investigation of energy absorption and deformation of thin walled tubes with circle and square section geometries under transverse impact loading. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15:75-83. (in Persian)