



## Numerical and Experimental Study Of Energy Absorption of Multi-Layer Aluminum-Composite Conical Frustum Structures under Axial Loading

A. Tafazoli<sup>1</sup>, M. Asgari<sup>1\*</sup>, A. Ghaznavi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Department of Renewable Energy Research, Niroo Research Institute, Tehran, Iran

**ABSTRACT:** Passive safety is the most important part of protecting the lives of occupants in accidents and collisions when it comes to vehicle safety. The crash box is one of the most basic passive safety components in the vehicle and is expected to be able to absorb kinetic energy in longitudinal crashes in order to minimize occupant injury in safe areas. Despite the use of a variety of geometric shapes and materials in the construction of crash boxes, conical structures and aluminum have attracted much attention. In this study, aluminum and aluminum-composite conical structures were investigated. Under quasi-static loading, experimental experiments and numerical simulations showed that the addition of composite to aluminum structures could triple the specific energy absorption of the structure on average. And the use of 0 and 90 directions of glass-epoxy fibers advances the process of structural destruction step by step and cross-sectional. The result is that the folds are regular and close together, which has positive effects on specific energy absorption, mean force, and stroke efficiency of the structure.

### Review History:

Received: Dec. 26, 2021

Revised: May, 14, 2022

Accepted: Jun. 13, 2022

Available Online: Jul. 05, 2022

### Keywords:

Energy absorption

Crash box

Conical frustum structures

Aluminum-composite

FML cone energy absorption

### 1- Introduction

Car safety is one of the most important pillars of the automotive industry. The crash box, as one of the passive safety items, must be able to absorb kinetic energy in longitudinal crashes and minimize damage to occupants in safe areas [1]. Factors affecting the behavior of the crash box are divided into three groups: geometric characteristics, structure material, and loading conditions of the structure. In the field of geometric characteristics, various types of thin-walled structures such as cylindrical, quadrilateral, polygonal, and conical cross-sections have been studied and compared to understand their plastic deformation behavior [2, 3]. Also, various design modes such as fillers [4], and composite and multicellular structures are other issues that have been raised in research [3, 5]. To improve the design and performance of crash boxes, many researchers have investigated the effect of crash box components and their essential role in enhancing the energy absorption performance of energy absorbers [6]. On the topic of crash box material, we can mention three groups of metal alloys, composites, and metal alloys-composites structures. Aluminum has recently attracted much attention in research due to its low weight and good impact resistance [7]. Despite extensive research on the efficiency of composite materials in crash boxes and the effects of the number of layers, fiber angle, and fiber length on energy

absorption [8, 9], the problem of composite fragility has led to the use of composite-metal materials in the application of crash boxes [7]. Combining metal alloys with composites has had better results than using each of them alone [7].

### 2- Methodology

The aluminum structure was made by the spinning method and mechanical properties of aluminum were obtained based on tensile test and standard pattern ASTM E8/E8M. Also, in order to manufacture the aluminum-composite structure with three layers of twill woven fibers weighing 165g/m<sup>2</sup> and epoxy resin EPL1012 as [0/90]<sub>3</sub> on the aluminum structure, the hand lay-up process was utilized. To create a good adhesion between aluminum and composite, a chromate-free primer was used as a substrate. Experimental tests on constructed samples and numerical analysis on corresponding simulated models provided energy absorption characteristics. Fig. 1 shows the structure. The geometric characteristics of the structures are given in Table 1.

### 3- Results and Discussion

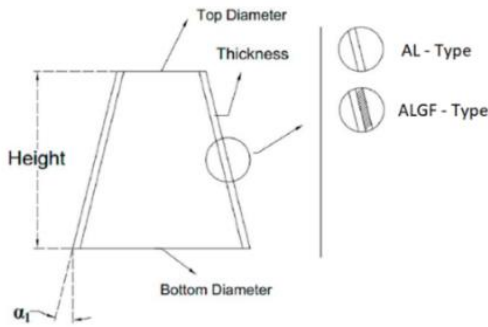
The results of experimental and numerical studies showed the improvement of energy absorption results by using composite. So that the aluminum structure could achieve a maximum force of 4.05 kN, an average force of 2.14 kN,

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

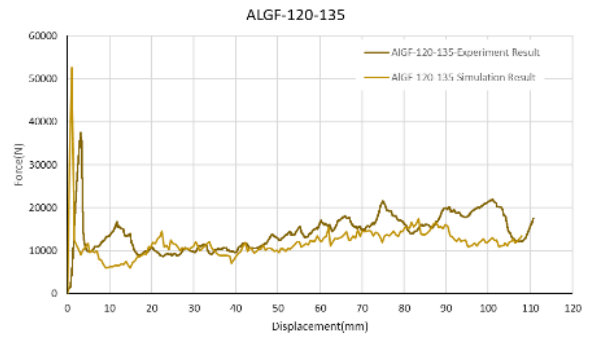


**Table 1. Geometric characteristics of the structures**

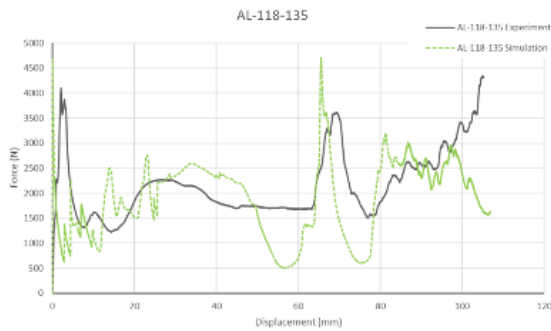
Name	Height (mm)	Thickness (mm)	Bottom Diameter (mm)	$\alpha_1$ (degree)
AL-118-135	135	0.87	118.4	8.51
ALGF-120-135	135	1.87	120.4	8.51



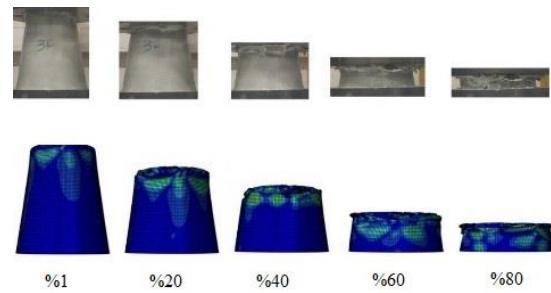
**Fig. 1. Specifications of the tested structure and introduction of how the composite is placed on aluminum**



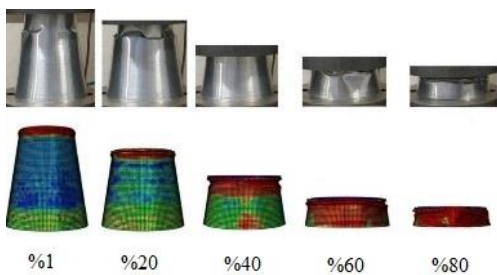
**Fig. 4. Force-displacement diagram of ALGF-120-135 in experimental and simulation study**



**Fig. 2. Force-displacement diagram of AL-118-135 in experimental and simulation study**



**Fig. 5. Structural demolition process of AL-120-135 in experimental and simulation study**



**Fig. 3. Structural demolition process of AL-118-135 in experimental and simulation study**

and specific energy absorption of 3.5 J/g. As shown in Figs. 2 and 3, in the experimental study the structure experiences degradation, which causes the average force to decrease. It is also worth noticing that due to neglecting construction related imperfections in the simulation process, simulated models are able to shrink more than 0.8 of their initial length, which explains the non-uptrend of its chart at this length.

Experimental and numerical studies of aluminum-composite structures show that the application of composites, not only regulates the demolition process but also is able to cover construction related problems. Figs. 4 and 5 depict good agreement between simulation and experimental procedure. The aluminum-composite structure was able to achieve a maximum force of 37.4 kN, an average force of 11.8 kN, and specific energy absorption of 13.88 J/g.

**4- Conclusion**

In this study, the energy absorption of conical frustum structures in aluminum and aluminum composite was investigated experimentally and numerically. The results showed that the use of composite could increase the specific energy absorption of the structure compared to the aluminum structure by up to 3 times, which can be attributed to the angles of the fibers and the improvement of the degradation process. A significant increase in maximum force and average force, as important parameters in energy absorption, is obvious, as well.

## References

- [1] Pitch to the Axial Crushing Characteristics of Top-Hat Crash Box, 660 (2014) 578-582.
- [2] N.N. Hussain, S. Prakash, Y.V. Daseswara, Comparative Study of Trigger Configuration for Enhancement of Crashworthiness of Automobile Crash Box Subjected to Axial, Procedia Engineering, 173 (2017) 1390-1398.
- [3] J. Wang, Y. Zhang, N. He, C.H. Wang, Crashworthiness behavior of Koch fractal structures, Materials & Design, (2018) 229-244.
- [4] PawełKaczyński, ZbigniewGronostajski, SławomirPolak, Progressive crushing as a new mechanism of energy absorption. The crushing study of magnesium alloy crash-boxes, I. Journal, I. Engineering, I. Journal, I. Engi, (2019) 1-8..
- [5] X. Xu, Y. Zhang, J. Wang, F. Jiang, C.H. Wang, Crashworthiness design of novel hierarchical hexagonal columns, Composite Structures, 194(2017) (2018) 36-48.
- [6] I. Saenz-dominguez, I. Tena, A. Esnaola, M. Sarrionandia, J. Torre, J. Aurrekoetxea, Design and characterisation of cellular composite structures for automotive crash-boxes manufactured by out of die ultraviolet cured pultrusion, Composites Part B, 160(2018) (2019) 217-224.
- [7] S. Boria, A. Scattina, G. Belingardi, Axial crushing of metal-composite hybrid tubes: Experimental analysis, Procedia Structural Integrity, 8 (2018) 102-117.
- [8] M. Mühler, F. Bombis, R. Szlosarek, M. Kröger, Development of Crash Absorbers Made of Carbon Fibre-Reinforced Plastic Based on Experimental Studies, Machine Dynamics Research, 39(4) (2015) 65-72.
- [9] D. Chen, G. Sun, M. Meng, G. Li, Q. Li, Residual crashworthiness of CFRP structures with pre-impact damage – An experimental and numerical study, International Journal of Mechanical Sciences, 149 (2018) 122-135.

### HOW TO CITE THIS ARTICLE

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 J. Mech Eng., 54(8) (2022) 371-374.

DOI: [10.22060/mej.2022.20923.7338](https://doi.org/10.22060/mej.2022.20923.7338)







## بررسی عددی و تجربی جذب انرژی سازه مخروط ناقص چندلایه آلومینیوم- کامپوزیت تحت بارگذاری محوری

افشین تفضلی<sup>۱</sup>، مسعود عسگری<sup>۱\*</sup>، آیدین غزنوی اسگویی<sup>۲</sup>

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیر، تهران، ایران  
۲- گروه پژوهشی نیروهای تجدید پذیر، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۰۵  
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۲/۲۴  
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۳  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۴/۱۴

### کلمات کلیدی:

جذب انرژی  
جعبه تصادف  
سازه‌های مخروطی ناقص  
آلومینیوم-کامپوزیت  
چند لایه فلز-کامپوزیت

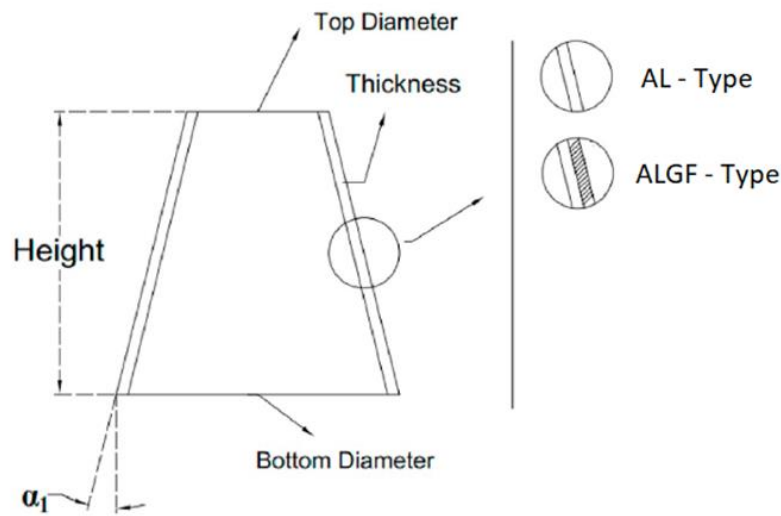
**خلاصه:** ایمنی غیرعامل مهم‌ترین بخش محافظت از جان سرنشینان در تصادفات و برخوردها در موضوع ایمنی خودروهاست. جعبه تصادف یکی از اساسی‌ترین بخش‌های ایمنی غیرعامل در خودرو است و انتظار بر این است که توانایی جذب انرژی جنبشی در تصادفات طولی را داشته باشد تا بتواند در محدوده‌های ایمن، آسیب به سرنشینان را به حداقل برساند. با وجود به کارگیری انواع اشکال هندسی و مواد در ساخت جعبه تصادف، سازه‌های مخروطی و آلومینیوم توجه‌های بسیاری را به خود جلب کرده‌اند. در این پژوهش سازه‌های مخروطی آلومینیومی و آلومینیوم-کامپوزیت تحت بارگذاری شبه استاتیکی در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی بررسی شد که نتایج حاکی از افزایش تا سه برابری جذب انرژی ویژه، نیروی حداکثر و نیروی میانگین سازه‌های آلومینیومی با به کارگیری الیاف شیشه-اپوکسی در تقویت سازه آلومینیومی بود. الیاف شیشه-اپوکسی علاوه بر خواص مکانیکی خود به دلیل زوایای لایه چینی ۰ و ۹۰ توانستند عملکردی عالی در پوشش نقایص ساخت سازه آلومینیومی و راهنمایی مقطع به مقطع تخریب از خود نشان دهند.

### ۱- مقدمه

ایمنی خودرو یکی از ارکان مهم صنعت خودروسازی است و با پیشرفت و سرعت روز افزون خودروها، اهمیت ایمنی روز به روز در حال افزایش است. ایمنی خودرو را می‌توان به سه گروه [۱]: غیرعامل، عامل و پیشگیرانه تقسیم کرد. در این بین ایمنی غیرعامل در هنگام تصادف عمل کرده و آسیب‌ها را دفع یا به حداقل می‌رساند. جعبه تصادف یکی از اصلی‌ترین موارد ایمنی غیرعامل است و از آنجایی که تصادفات در جهت طولی خودرو نزدیک به ۴۵٪ تصادفات را تشکیل می‌دهد [۲] بهبود عملکرد جعبه تصادف در کنار کاهش وزن می‌تواند نقش مهمی در بالا بردن ایمنی و مصرف انرژی خودرو ایفا کند. جعبه تصادف سازه‌ای است جدار نازک از جنس فلز یا کامپوزیت که در نقاط ابتدایی و انتهایی خودرو نصب یا سوار می‌شود تا به عنوان یک جاذب انرژی برخورد در هنگام تصادفات عمل کند [۳] به عنوان یک سیستم ایمنی غیرعامل در خودرو، انتظار بر این است که سازه توانایی جذب انرژی جنبشی در تصادفات طولی را داشته باشد و بتواند در محدوده‌ای

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

ایمن، آسیب به سرنشینان را به حداقل برساند [۴]. در تحقیقات مربوط به جعبه تصادف، هدف اصلی بررسی پارامترهای مؤثر بر تغییر شکل پلاستیک و روند آن است. می‌توان عوامل مؤثر بر رفتار جعبه تصادف را در سه گروه مشخصات هندسی، جنس سازه و شرایط بارگذاری سازه تقسیم‌بندی کرد. در مبحث مشخصات هندسی، انواع سازه‌های جدار نازک همچون استوانه‌ای، سطح مقطع چهار ضلعی، چند ضلعی و مخروطی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند تا رفتار تغییر شکل پلاستیک آن‌ها درک گردد [۳ و ۵]. برخی دیگر از تحقیقات به بررسی ضخامت و قطر مقطع سازه‌های دیوار نازک پرداخته‌اند [۷-۵]. همچنین، حالات گوناگون مربوط به طراحی همچون پرکننده‌ها [۸ و ۹]، سازه‌های ترکیبی و چند سلولی نیز از دیگر مواردی است که در تحقیقات مطرح گردید [۵ و ۷]. مطالعات صورت گرفته در زمینه سازه‌های دیوار نازک و عوامل مؤثر بر بهبود جذب انرژی در آن‌ها حاکی از افزایش توانایی سازه در جذب انرژی در اثر افزایش اندک ضخامت دیواره سازه است [۱۰ و ۱۱]. علاوه بر تلاش جهت بهبود طراحی و عملکرد جعبه تصادف، محققین بسیاری به بررسی تأثیر مواد سازنده جعبه تصادف و نقش اساسی



شکل ۱. مشخصات سازه مورد آزمایش و معرفی نحوه قرارگیری کامپوزیت بر روی آلومینیوم

Fig. 1. Specifications of the tested structure and introduction of how the composite is placed on aluminum

۱۱۸ میلیمتر به روش شکل دهی چرخشی<sup>۱</sup> و نمونه‌ای دیگر حاصل از ترکیب سازه آلومینیومی ذکر شده و پوشش کامپوزیتی به روش لایه‌چینی دستی با ضخامت ۱ میلیمتر و ساختار  $[0/90]$  ساخته شد و در بخش شبیه‌سازی نیز با بهره‌گیری از اطلاعات حاصل از آزمایش کشش آلومینیوم و معیار شکست هاشین قطعات در آباکوس شبیه‌سازی شدند. پس از آزمایش تجربی با سرعت ثابت ۲ mm/min و شبیه‌سازی در نرم افزار آباکوس، نتایج محاسبه مشخصه‌های قابلیت تصادف<sup>۲</sup> حاکی از بهبود روند تخریب سازه و در نتیجه آن سه برابر شدن قابلیت جذب انرژی ویژه و افزایش قابل ملاحظه نیروی پیشینه و میانگین و همچنین قابلیت ضربه سازه در سازه ترکیبی آلومینیوم-کامپوزیت بوده است.

## ۲- معرفی سازه

در این پژوهش دو سازه با مشخصات هندسی یکسان و در نمونه‌های آلومینیوم و آلومینیوم - کامپوزیت در نظر گرفته شده است. همانگونه که در شکل ۱ مشاهده می‌گردد. ساختمان سازه و نحوه قرارگیری کامپوزیت بر روی سازه آلومینیومی مشخص شده است.

آن‌ها در بهبود عملکرد جذب انرژی جاذب‌های انرژی پرداخته‌اند [۱۴-۱۲]. به دنبال فراگیری گسترده سازه‌های سبک ایمن در عصر حاضر، تحقیقات بسیاری جهت جایگزینی فلز با این دسته سازه‌ها و افزایش اعتمادپذیری آن‌ها به عنوان مواد سازنده جاذب انرژی انجام شده است [۱۲]. در مبحث جنس جعبه تصادف، می‌توان به سه گروه آلیاژهای فلزی، مواد مرکب و سازه ترکیبی آلیاژهای فلزی و مواد مرکب اشاره کرد. آلومینیوم به دلیل وزن پایین و رفتار مناسب در برابر ضربه اخیراً توجه‌های بسیاری را در تحقیقات به خود جلب کرده است [۱۵]. در عین حال بررسی مواد مرکب همیشه یک موضوع جذاب به عنوان جایگزین فلز برای محققین بوده است. علی‌رغم تحقیقات گسترده بر روی کارایی انواع مواد مرکب در جعبه تصادف و بررسی تأثیرات تعداد لایه‌ها، زاویه الیاف و طول الیاف در جذب انرژی [۱۹-۱۶]، مسئله شکنندگی مواد مرکب موجب استفاده از مواد ترکیبی مواد مرکب - فلز/الیاف فلز در کاربرد جعبه تصادف شده است [۱۵]. ترکیب آلیاژهای فلزی با مواد مرکب نتایج بهتری نسبت به استفاده تنه‌های هریک از آن‌ها داشته است [۱۵] و افزودن مواد مرکب می‌تواند رفتار آلیاژ فلزی را بهبود بخشد [۲۰]. در این پژوهش با هدف شناخت رفتار سازه‌های مخروطی جاذب انرژی و بهبود عملکرد آن، سازه‌ای آلومینیومی با ارتفاع ۱۳۵ میلیمتر و قطر بزرگ

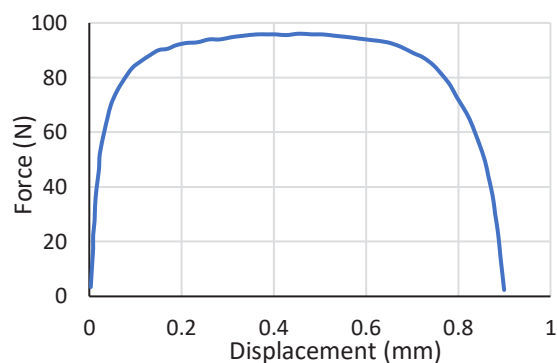
1 - Spinning metal  
2 - Crashworthiness





شکل ۲. ساخت سازه‌های آلومینیومی به روش شکل‌دهی چرخشی

Fig. 2. Construction of aluminum structures by spinning method



شکل ۳. نمودار نیرو- جابه‌جایی به دست آمده از آزمایش کشش آلومینیوم سازه آلومینیومی

Fig. 3. Force-displacement diagram obtained from the aluminum tensile test of the aluminum structure

به وزن ۱۶۵ گرم بر متر مربع و رزین اپوکسی EPL۱۰۱۲، با رعایت زاویه ۰ و ۹۰ بر روی سازه اعمال گردید. پس از هواگیری، نمونه در مکانی با دما و رطوبت مناسب نگهداری شد تا به سختی عمیق خود برسد. نسبت رزین به سخت کننده ۱۰۰ به ۱۵ است. مطابق شکل ۳ خواص مکانیکی آلومینیوم بر اساس آزمایش کشش و الگوی استاندارد ASTM E۸ / E۸M به دست آمد. در ادامه می‌توان مشخصات سازه‌های ساخته شده را در جداول ۱ و ۲ و شکل ۴ مشاهده کرد.

به منظور ساخت سازه مخروط ناقص بدون خط جوش و فراهم آوردن سازه‌ای یکدست، از روش شکل‌دهی چرخشی برای ساخت سازه استفاده شد شکل ۲ نحوه انجام این کار را نشان می‌دهد. در ساخت سازه آلومینیوم- کامپوزیت، به منظور ایجاد چسبندگی مناسب بین آلومینیوم و الیاف شیشه - اپوکسی و جلوگیری از لیز خوردن آن بر روی آلومینیوم، ابتدا سطح آلومینیوم با زیرساز بدون کرومات ۲K شرکت شروین ویلیامز پوشانده شد، پس از خشک شدن کامل زیرساز، سه لایه الیاف شیشه بافته شده با الگوی سرژده

جدول ۱. مشخصات سازه آلومینیومی

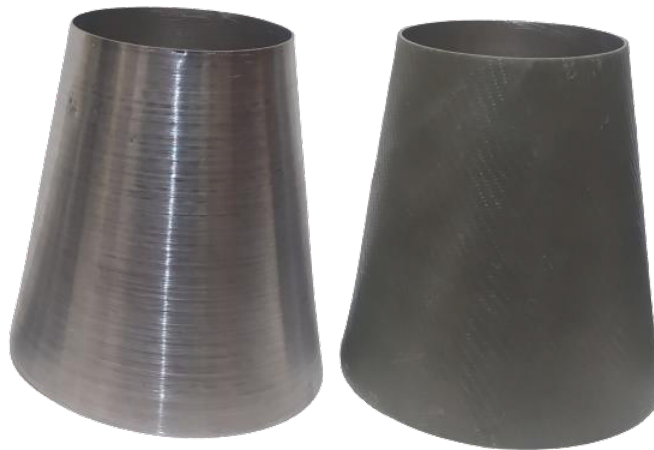
Table 1. Specifications of aluminum structure

وزن سازه (g)	جنس سازه	زاویه (degree)	ارتفاع (mm)	قطر مقطع پایین (mm)	قطر مقطع بالا (mm)	ضخامت (mm)	نام
۶۴/۹۹	آلومینیوم	۸/۵۱	۱۳۵	۱۱۸/۴	۷۸	۰/۸۷	AL-۱۱۸-۱۳۵

جدول ۲. مشخصات سازه آلومینیوم - کامپوزیت

Table 2. Specifications of aluminum-composite structure

درصد حجمی الیاف (%)	وزن سازه (g)	جنس سازه	زاویه (degree)	ارتفاع (mm)	قطر مقطع پایین (mm)	قطر مقطع بالا (mm)	ضخامت (mm)	زوایای الیاف	نام
۲۷/۵	۱۱۴/۳۴	آلومینیوم- کامپوزیت	۸/۵۱	۱۳۵	۱۲۰/۴	۸۰	۱/۸۷	$[0/90]_3$	ALGF -۱۲۰-۱۳۵



شکل ۴. سازه آلومینیومی و آلومینیوم - کامپوزیت ساخته شده

Fig. 4. Aluminum and aluminum-composite structures



بازده نیروی لهیدگی<sup>۵</sup>: بازده نیروی لهیدگی نسبت نیروی متوسط به حداکثر نیرو است. بازده نیروی لهیدگی می‌تواند معیار گروه‌بندی ثبات نیرو و بازدهی یک میراگر باشد [۲۲]. بازده نیروی لهیدگی با رابطه ریاضی (۴) به دست می‌آید:

$$CFE = \frac{P_m}{P_{max}} \quad (4)$$

این متغیر هر چه به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد نشان دهنده عملکرد جذب انرژی بهتر توسط جاذب انرژی است و جاذب انرژی ایده‌آل دارای بازده نیروی لهیدگی ۱ است.

بازده ضربه<sup>۶</sup>: بازده ضربه عبارت است از قابلیت تغییر شکل سازه جاذب انرژی که از رابطه ریاضی (۵) به دست می‌آید:

$$SE = \frac{L_0 - U}{L_0} \quad (5)$$

که در آن  $L$  طول اولیه سازه به میلی‌متر و  $U$  طول سازه پس از تخریب است. روشن است که به هر میزان که این پارامتر به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد جاذب انرژی بهتر عمل کرده است.

### ۳- آزمایش تجربی و شبیه‌سازی شبه استاتیک

#### ۳-۱- آزمایش تجربی

با توجه به تفاوت رفتار سازه‌ها در آزمون دینامیک و شبه استاتیک و نیاز به بررسی و مشاهده دقیق‌تر روند تخریب و همچنین تحقیقات در دسترس بیشتر در مورد سازه مخروطی آلومینیومی در زمینه آزمون شبه استاتیک، آزمون شبه استاتیک با سرعت ۲ mm/min مطابق شکل ۵ در دستگاه Koopa TB-۱۰T در نظر گرفته شد.

#### ۳-۲- شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی آزمون سازه‌های معرفی شده از نرم افزار آباکوس استفاده شد. ابتدا قطعه در قسمت پارت تعریف و در قسمت مشخصات،

به منظور بررسی قابلیت تصادف سازه‌های ساخته شده، پارامترهایی همچون حداکثر نیرو، کل انرژی جذب شده، نیروی میانگین، جذب انرژی ویژه، بازده نیروی لهیدگی و بازده ضربه مطرح می‌گردد که با روابط (۱) تا (۵) قابل محاسبه است.

حداکثر نیرو<sup>۱</sup>: نیروی حداکثر عبارتست از نیروی مورد نیاز جهت آغاز روند جذب انرژی و تغییر شکل پلاستیک.

انرژی جذب شده کل<sup>۲</sup>: انرژی جذب شده کل، میزان انرژی صرف شده در حین تصادف یا تغییر شکل است. این کمیت را می‌توان با محاسبه سطح زیر نمودار نیرو-جاب‌جایی به دست آورد و به صورت ریاضی از رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$E_a = \int_0^{\delta_b} P \cdot d\delta \quad (1)$$

که در آن  $P$  میزان نیروی لحظه‌ای و  $\delta_b$  طول نمونه تصادف است. نیروی متوسط<sup>۳</sup>: نیروی متوسط عبارتست از نیروی میانگین یا انرژی جذب شده هر واحد طول تصادف [۲۱]. این نیرو طبق رابطه ریاضی (۲) به دست می‌آید:

$$P_m = \frac{E_a}{\delta_b} \quad (2)$$

جذب انرژی ویژه<sup>۴</sup>: جذب انرژی ویژه، انرژی جذب شده توسط هر واحد از جرم سازه می‌باشد. این پارامتر که فاکتور مهمی در حوزه مطالعات وابسته به وزن است [۲۱] براساس رابطه ریاضی (۳) به دست می‌آید:

$$SEA = \frac{E_a}{m} \quad (3)$$

که در آن  $E_a$  انرژی جذب شده کل و  $m$  جرم سازه است.

5 - Crush Force Efficiency (CFE)

6 - Stroke efficiency

1 - Peak Crushing Force (PCF)

2 -  $E_a$

3 -  $P_m$

4 - Specific Energy Absorption (SEA)

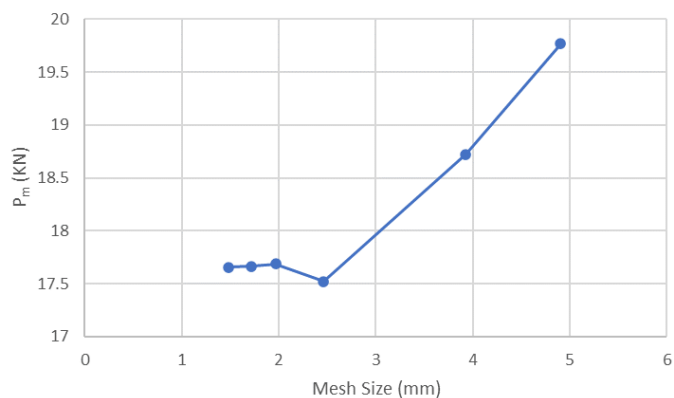
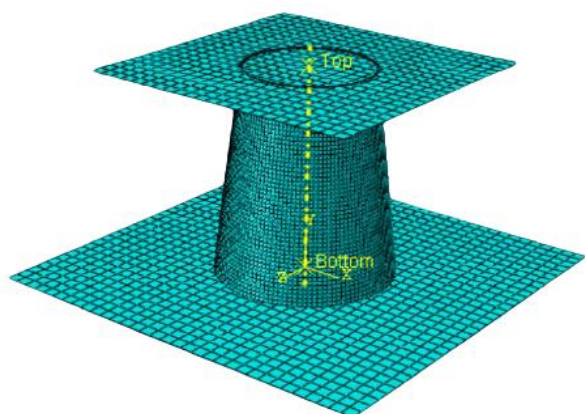


شکل ۵. انجام آزمایش فشار با سرعت ثابت  $2 \text{ mm / min}$

Fig. 5. Pressure test at constant speed  $2 \text{ mm / min}$

انجام آزمون حساسیت مش مطابق شکل ۶، مش ۲ میلیمتری مورد استفاده قرار گرفت که برای سازه آلومینیومی ۹۵۱۶ المان و برای سازه آلومینیوم-کامپوزیت ۱۷۵۳۸ المان را تولید می‌کند. در مرحله بعد میزان نیروی وارد بر نمونه مشخص می‌شود، با توجه به نرخ کرنش ۲ میلیمتر بر دقیقه در آزمون تجربی، بارگذاری به صورت جا به جایی و یکنواخت تعریف گردید. همچنین در محیط اندرکنش شاخصه‌های تماسی بین سطوح تعریف گردید و ضرایب  $0/3$  و  $0/9$  برای اصطکاک بین سطوح تعریف گردید [۲۴]. در انتها با تعریف گام و ارسال دستور انجام کار، کار تحلیل آغاز شد.

مشخصات آلومینیوم شامل چگالی، الاستیسیته و پلاستیک که از آزمون کشش نمونه بدست آمده بود وارد شد و به قطعه اختصاص داده شد. همچنین برای تعریف کامپوزیت از دستور لایه‌چینی مواد مرکب و معیار تخریب هاشین استفاده گردید. متغیرهای تخریب لایه الیاف بافته شده با زاویه ۰ و ۹۰ و مشخصات مکانیکی الیاف شیشه‌ای - اپوکسی به ترتیب در جداول ۴ و ۵ [۲۳] آورده شده است. قطعات آلومینیومی و کامپوزیتی پوسته در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به شبه استاتیک بودن آزمون، حلگر روش صریح انتخاب گردید. به منظور مش‌بندی درست قطعه در کنار کاهش زمان تحلیل، با



شکل ۶. آزمون حساسیت مش و مش بندی سازه

Fig. 6. Mesh convergence test and structural mesh

جدول ۳. مشخصات مکانیکی آلومینیوم [۲۵]

Table 3. Mechanical specifications of aluminum [25]

مقدار	توضیحات	مشخصات
۲۷۰۰	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho$
۶۸/۹	مدول یانگ (GPa)	$E$
۰/۳۳	ضریب پواسون (MPa)	$\nu$

جدول ۴. متغیرهای تخریب لایه فایبرگلاس بافته شده در زوایای ۰ و ۹۰ [۲۳]

Table 4. Degradation variables of woven fiberglass layer at angles 0 and 90 [23]

مقدار	توضیحات	مشخصات
۴۳۵	تنش کششی نهایی طولی الیاف (MPa)	$\sigma_{1t}$
۴۸۵	تنش فشاری نهایی طولی الیاف (MPa)	$\sigma_{1c}$
۴۳۵	تنش کششی نهایی عرضی الیاف (MPa)	$\sigma_{2t}$
۴۸۵	تنش فشاری نهایی عرضی الیاف (MPa)	$\sigma_{2c}$
۵۰	تنش برشی نهایی برای لایه الیاف در صفحه ۱-۲ (MPa)	$\tau_{12}$
۱/۳	(%) محدودیت کرنش کششی نهایی در جهت الیاف	$\epsilon_{1t}$
۰/۱۴	(%) محدودیت کرنش کششی نهایی در جهت عرضی الیاف	$\epsilon_{2t}$
۱	(%) کرنش برشی نهایی برای لایه الیاف در صفحه ۱-۲	$\gamma_{12}$

جدول ۵. مشخصات مکانیکی E-glass لایه الیاف - اپوکسی [۲۳]

Table 5- Mechanical specifications of E-glass fiber layer - epoxy [23]

مقدار	توضیحات	مشخصات
۱۸۰۰	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho$
۲۳	مدول یانگ الیاف در جهت طولی (GPa)	$E_{11}$
۲۳	مدول یانگ الیاف در جهت عرضی (GPa)	$E_{22}$
۴/۸	مدول برشی درون صفحه‌ای (GPa)	$G_{12}$
۴/۸	مدول برشی خارج صفحه‌ای (GPa)	$G_{23}$
۰/۲۵	ضریب پواسون عمده	$\nu_{12}$
۴۲۸	استحکام کششی طولی (MPa)	$X_T$
۲۴۶	استحکام فشاری طولی (MPa)	$X_C$
۴۲۸	استحکام کششی عرضی (MPa)	$Y_T$
۲۴۶	استحکام فشاری عرضی (MPa)	$Y_C$
۲۴۶	استحکام برشی (MPa)	$S_C$

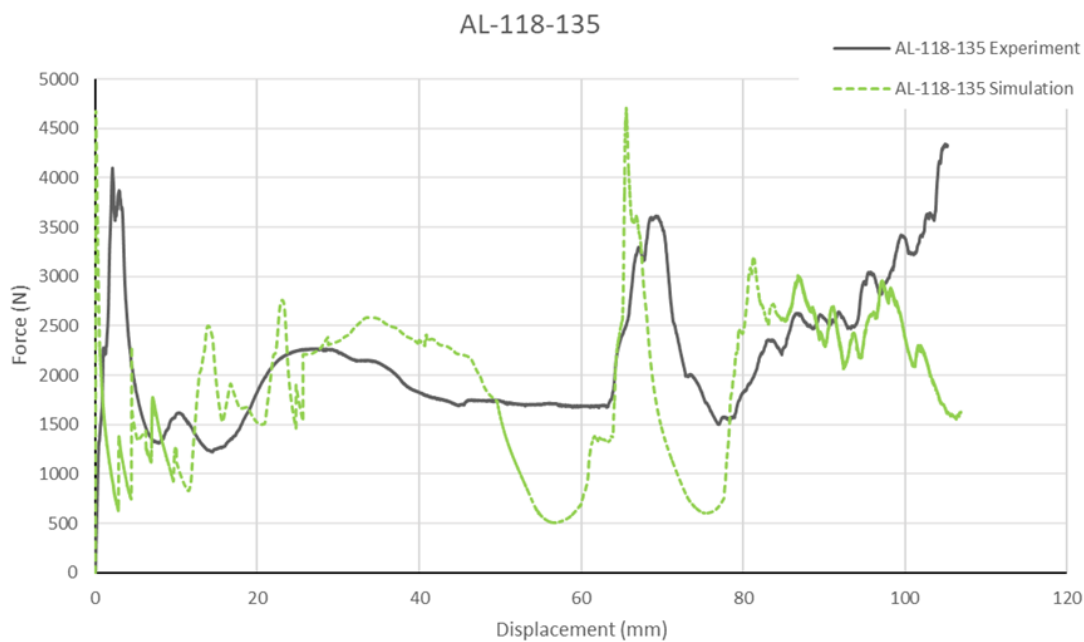
۴- نتایج

۴-۱- نتایج آزمایش تجربی و شبیه‌سازی تست فشار

نشیب‌ها قابل مشاهده است. نکته حائز اهمیت این است که روند تخریب تا ۸۰ درصد طول اولیه برای محاسبات و مقایسه مدنظر قرار گرفته است که در نمودار شبیه‌سازی با توجه به تخریب منظم‌تر این سازه در شبیه‌سازی به دلیل نبود اشکالات ساختی، سازه بیشتر از ۸۰ درصد طول اولیه قابلیت جمع شدن داشته و هنوز به حد نهایی تخریب خود نرسیده است و با این استدلال می‌توان نزولی بودن نمودار شبیه‌سازی را در انتهای آن توجیه کرد. چرا که به طور قطع در روند تخریب سازه و تبدیل سازه به قطعه‌ای صلب، انتهای نمودارها باید صعودی باشد.

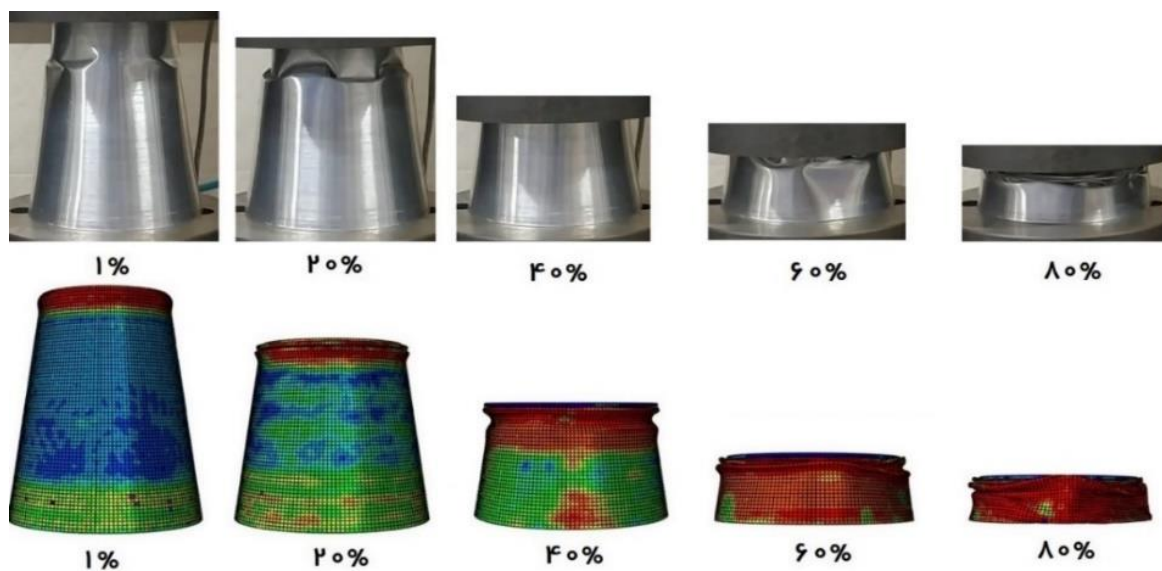
همانگونه که در شکل ۹ مشاهده می‌گردد همگرایی نمودار نیرو - جابه‌جایی در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی در سازه آلومینیوم-کامپوزیت نسبت به سازه آلومینیومی بیشتر است که نشان از پوشش ضعف‌های ساختاری توسط فایبرگلاس و فراهم آوردن نظم در تخریب این سازه است. این امر را می‌توان در شکل ۱۰ نیز مشاهده کرد. به گونه‌ای که با کاهش تأثیر مشخصات هندسی از جمله زاویه و ارتفاع در روند تخریب، کاربرد کامپوزیت در این سازه با افزایش نزدیک به سه برابری جذب انرژی ویژه توانسته است بازده ضربه سازه آلومینیومی ابتدایی را نیز به مقدار قابل قبولی بهبود ببخشد.

نمودار نیرو - جابه‌جایی و روند تخریب سازه‌های آلومینیومی و آلومینیوم-کامپوزیت در طی آزمایشات تجربی و شبیه‌سازی مقایسه گردیده است. شایان توجه است که در تصاویر آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی، درصد ذکر شده میزان طول تخریب شده نسبت به طول اولیه است. همانگونه که در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌گردد، روند تخریب و نمودار نیرو - جابه‌جایی ۱۳۵-۱۱۸-AL در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی دارای مطابقت‌های قابل قبولی است. این سازه در یک سوم نزدیک به نقطه اعمال بار، شروع شکست خود را تجربه می‌کند که می‌توان نقش ترکیبی زاویه و ارتفاع در این رخداد را در شکل ۸ مشاهده کرد. متعاقباً این امر موجب ثبات سطح نیرو تا میانه راه و طی روندی همراه با لهیدگی و سپس تمایل به حرکت تخریب در مسیر جدارهای سازه می‌شود که با چین خوردگی و در نتیجه فراز و نشیب‌های نهایی همراه است. این سازه نیروی حداکثر ۴/۰۵ kN و نیروی میانگین ۲/۱۴ kN و جذب انرژی ویژه ۳/۵ J/g را کسب کرده است. مطابق تصاویر روند تخریب و شکل ۱۱، سازه دچار ۴ چین‌خوردگی شده است که در نمودار نیز مطابق فراز و



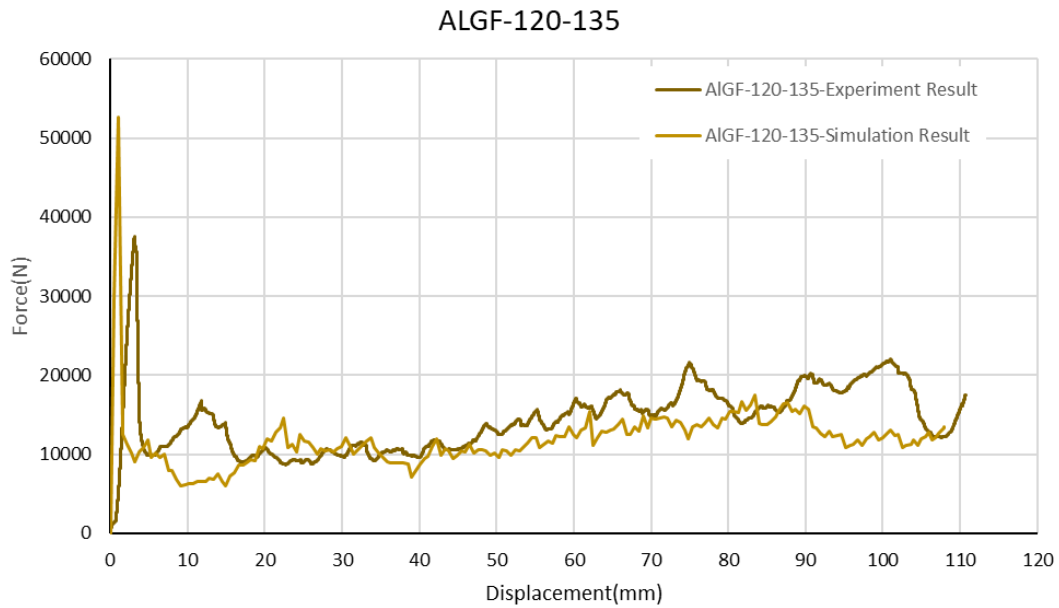
شکل ۷. نمودار نیرو - جا به جایی سازه AL-118-135 در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی

Fig. 7. Force – displacement diagram of AL-118-135 in experimental and numerical studies



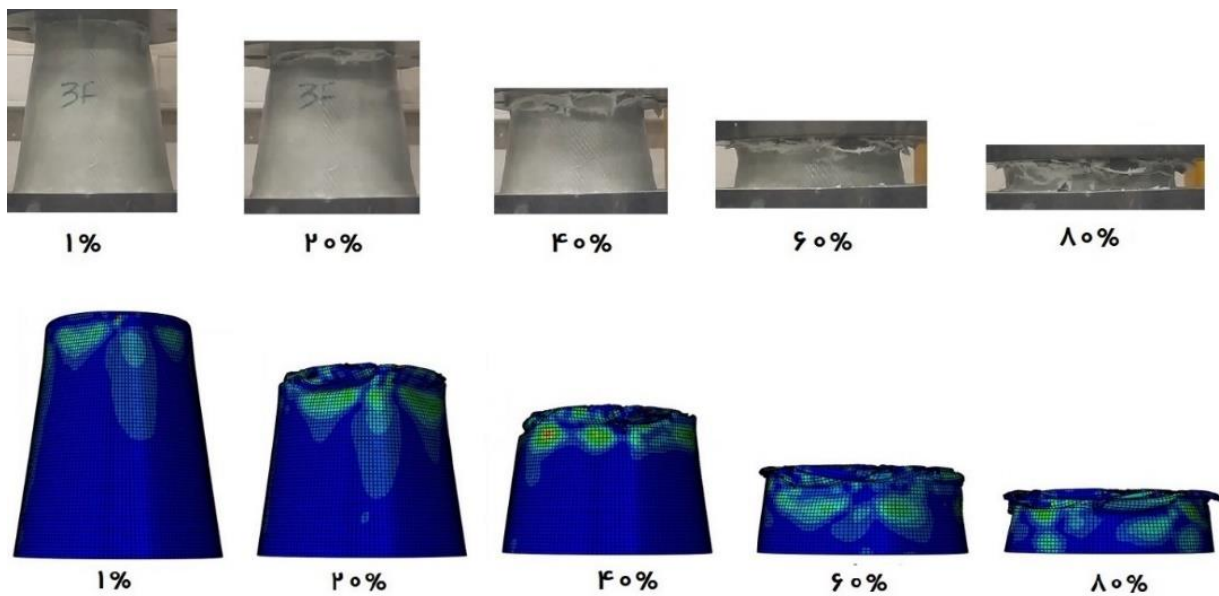
شکل ۸. روند تخریب سازه AL-118-135 در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی

Fig. 8. Structural degradation process of AL-118-135 in experimental and numerical studies



شکل ۹. نمودار نیرو - جابه‌جایی سازه در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی

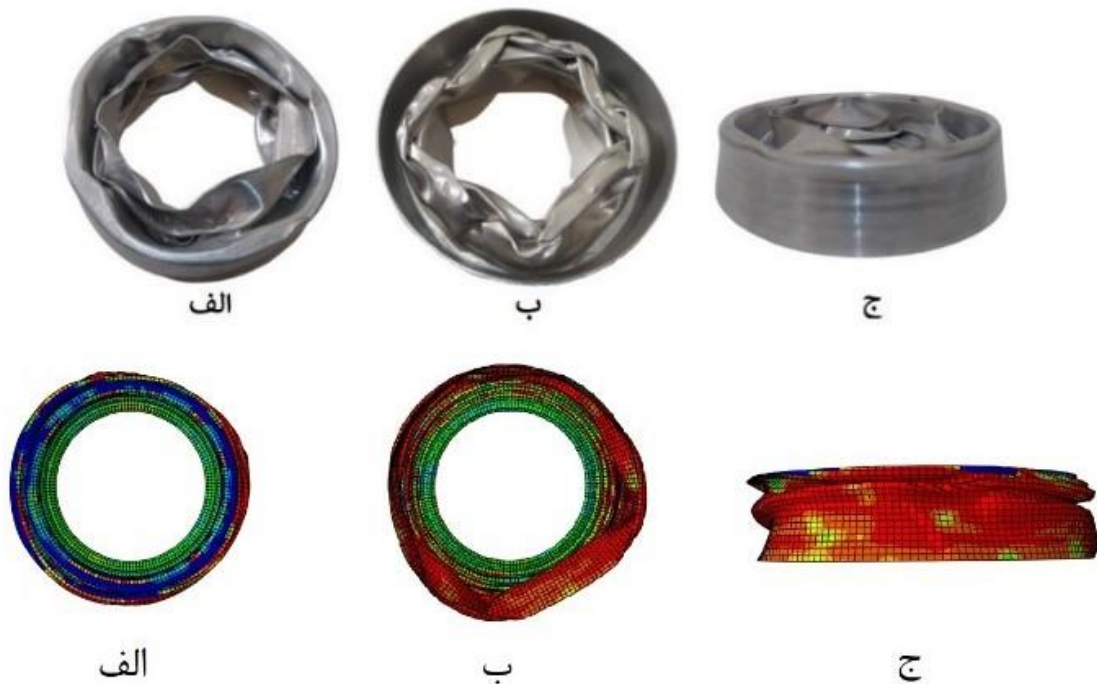
Fig. 9. Force – displacement diagram of ALGF-120-135 in experimental and numerical studies



شکل ۱۰. روند تخریب سازه ALGF-120-135 در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی

Fig. 10. Structural degradation process of ALGF-120-135 in experimental and numerical studies





شکل ۱۱. سازه پس از تخریب در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی. الف) تصویر از بالا ب) تصویر از بالا ب) تصویر از ناحیه تحتانی ج) تصویر از رو به رو

Fig. 11. Structure AL-118-135 after demolition in experimental and numerical studies. A) Image from above b) Image from the bottom c) Image from the front

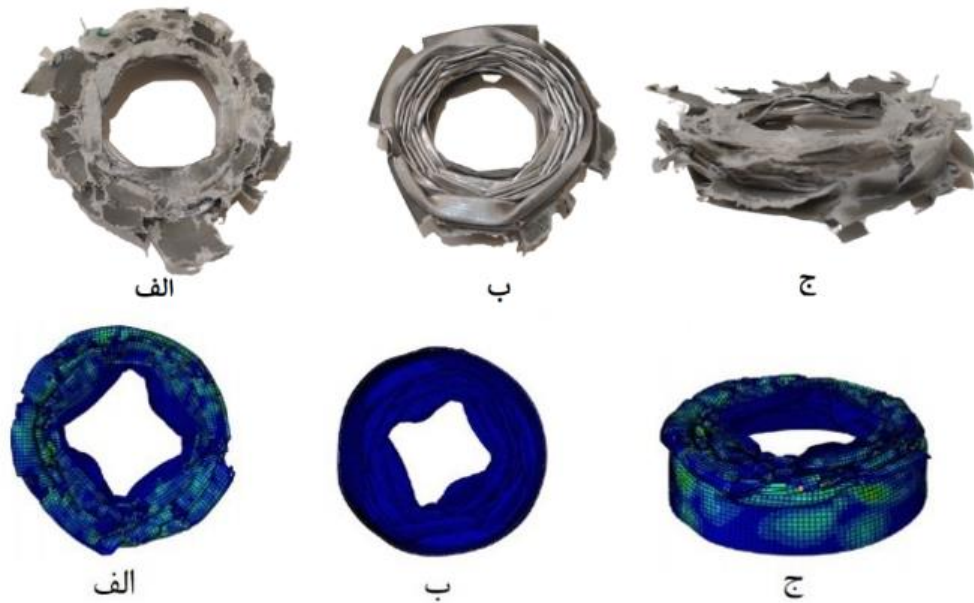
۴-۲- محاسبه مشخصه‌های جذب انرژی در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی

در این بخش مشخصه‌های تعریف شده برای محاسبه بازده قطعه جذب انرژی از نمودارهای نیرو - جابه‌جایی استخراج می‌گردد. جدول ۶ مقادیر محاسبه شده را نشان می‌دهد که از نظر تشابه روند و رفتار مطابقت قابل قبولی دارد. در محاسبات جذب انرژی ویژه لازم است ذکر شود که وزن سازه‌های شبیه‌سازی شده بر اساس وزن اعلامی در نرم افزار محاسبه شده است. خطا، درصد اختلاف نیروی میانگین آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی است. همانگونه که در شکل ۱۳ مشاهده می‌گردد، افزودن کامپوزیت در جهات ۰ و ۹۰ توانسته است تأثیر مثبتی در جذب انرژی سازه داشته باشد به گونه‌ای که افزایشی ۳ برابری را در جذب انرژی ویژه سازه دیده می‌شود. همچنین نیروی حداکثر و نیروی میانگین نیز افزایش چشم‌گیری داشته است. در شکل ۱۴ مقادیر بازده نیروی لهیدگی نشانگر افزایش بیشتر نیروی حداکثر در مقایسه با نیروی میانگین در نمونه‌های آلومینیوم - کامپوزیت است و همچنین نشان می‌دهد که افزودن کامپوزیت می‌تواند بازده ضربه سازه را بهبود ببخشد.

با توجه به شکل ۱۲ مشاهده می‌گردد که چین‌خوردگی‌های سازه در راستای جدار و با فواصل نزدیک به هم رخ داده است که در نمودار نیرو-جابه‌جایی نیز این فراز و نشیب‌ها قابل مشاهده است. شیب ملایم افزایشی سطح نیرو در نیمه دوم تخریب را نیز می‌توان ناشی از همین نظم چین‌خوردگی دانست. این سازه جذب انرژی ویژه  $13/88 \text{ J/g}$  و نیروی حداکثر  $37/4 \text{ kN}$  و نیروی میانگین  $11/8 \text{ kN}$  را به خود اختصاص داده است.

با توجه به شکل ۱۱ می‌توان تأثیر روند تخریب در توانایی جذب انرژی سازه را مشاهده کرد. همانگونه که در نمونه آلومینیومی مشاهده می‌گردد، چین‌خوردگی‌ها در سازه آلومینیومی کم و غیر قابل تمایز است و به گونه‌ای سازه دچار لهیدگی‌های نامنظم شده است. این امر علاوه بر انحراف جهت اعمال نیرو و کاهش سطح نیروی دریافتی توسط سازه باعث کاهش جذب انرژی ویژه سازه نیز می‌شود. همانگونه که در شکل ۱۲ قابل مشاهده است روند منظم تخریب و چین‌خوردگی‌های متوالی نزدیک به هم و تقریباً یکسان موجب شده است که سازه جذب انرژی بهتری را تجربه کرده و حداکثر سطح خود را در جذب انرژی تا پایان مسیر شرکت دهد.





شکل ۱۲. سازه ALGF-120-135 پس از تخریب در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی. الف) تصویر از بالا ب) تصویر از ناحیه تحتانی ج) تصویر از رو به رو

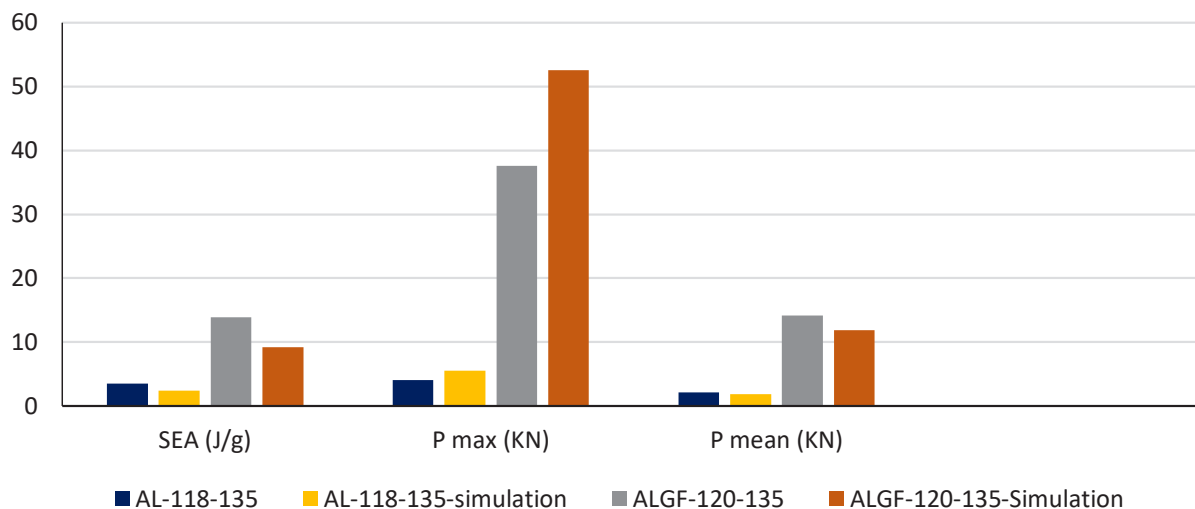
Fig. 12. Structure ALGF-120-135 after demolition in experimental and numerical studies. A) Image from above b) Image from the bottom c) Image from the front

جدول ۶. نتایج آزمایش تجربی و شبیه‌سازی سازه‌های آلومینیومی و کامپوزیتی

Table 6. Experimental and numerical studies results of aluminum and composite structures

خطا (%)	بازده ضربه (SE)	بازده نیروی لهیدگی (CFE)	حداکثر نیرو ( $P_{max}$ ) (N)	جذب انرژی ویژه SEA (J/g)	ارتفاع له‌شدگی (mm)	نیروی میانگین (N)	انرژی جذب شده کل (J)	نمونه
-	۰/۷۴۲	۰/۵۲۹	۴۰۵۴/۸۷	۳/۵	۱۰۰/۲۲۶	۲۱۴۴/۱۳۴	۲۲۷/۴۰۹	AL-۱۱۸-۱۳۵
-	۰/۸۲۰	۰/۳۷۹	۳۷۴۵۸/۳۵	۱۳/۸۷۷	۱۱۰/۷۱۳	۱۴۱۹۸/۰۹	۱۵۸۶/۷۳۲	ALGF-۱۲۰-۱۳۵
۱۳/۲	۰/۸	۰/۳۳۸	۵۵۱۱/۲۷	۲/۳۷۰	۱۰۰/۲۲۶	۱۸۶۲/۰۳۷	۱۹۹/۱۶۲	AL-۱۱۸-۱۳۵ simulation
۱۶/۷	۰/۸	۰/۲۲۵	۵۲۶۰۵/۶	۹/۲۱۸	۱۱۰/۷۱۳	۱۱۸۲۲/۷۱	۱۲۷۹/۳۹۴	ALGF-۱۲۰-۱۳۵ simulation

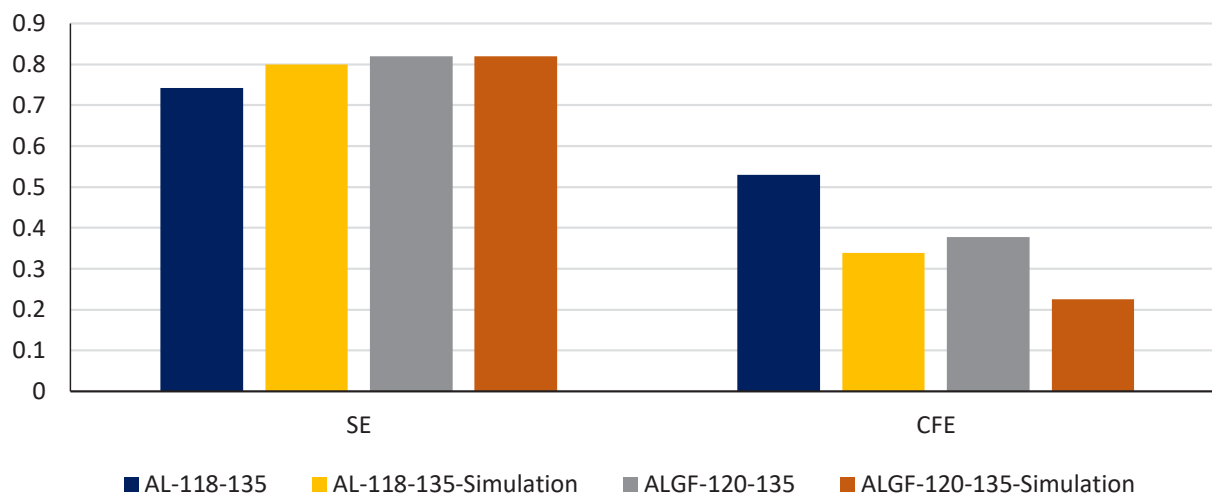
مقایسه شاخصه‌های جذب انرژی در سازه‌های آلومینیومی



شکل ۱۳. مقایسه جذب انرژی ویژه (SEA)، نیروی بیشینه (Pmax) و نیروی میانگین (Pmean) سازه‌ها در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی

Fig. 13. Comparison of specific energy absorption (SEA), maximum force (Pmax) and average force (Pmean) of structures in experimental, and numerical studies

مقایسه شاخصه‌های جذب انرژی در سازه‌های آلومینیومی



شکل ۱۴. مقایسه بازده نیروی لهیدگی (CFE)، بازده ضربه (SE) سازه‌ها در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی

Fig. 14. Comparison of crushing force efficiency (CFE) and impact efficiency (SE) of structures in experimental and numerical studies

## ۵- نتیجه گیری

جاذب‌های انرژی بخش مهمی از ایمنی خودروها را به عنوان ایمنی غیرعامل تشکیل می‌دهند و بهبود عملکرد آن‌ها در کنار کاهش وزن می‌تواند کمک بزرگی در صنعت خودروسازی باشد. در این پژوهش با هدف شناخت و بهبود عملکرد الگوی سازه‌ای رایج در صنعت خودروسازی، رفتار و بازده سازه‌های آلومینیومی در آزمایشات تجربی و شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفت و در ادامه سازه آلومینیومی توسط الیاف شیشه-اپوکسی تقویت گردید و رفتار آن با سازه آلومینیومی مقایسه گردید که نتایج آن به شرح زیر است:

- سازه ترکیبی کامپوزیت- آلومینیوم توانست نقایص مربوط به ساخت سازه را در حد قابل قبولی کاهش دهد و در فرآیندی منظم، روند تخریب را به سمت چین‌خوردگی‌های منظم و نزدیک به هم و مقطع به مقطع راهنمایی کند و این امر را می‌توان در تصاویر روند تخریب و سازه‌ها پس از تخریب مشاهده کرد که می‌تواند ناشی از زوایای ۰ و ۹۰ الیاف باشد. مجموعه این فرآیندها موجب سه برابر شدن جذب انرژی ویژه سازه به صورت میانگین در ازای افزایش ۷۶ درصدی وزن سازه شده است. این امر در کنار افزایش قابل قبول سطح نیروی میانگین و نیروی حداکثر و کاهش وابستگی روند تخریب به مشخصات هندسی رخ داده است. می‌توان انتظار داشت که با تغییر تعداد لایه‌ها و جهات الیاف رفتارهای مناسب تخریبی را در سازه‌های ترکیبی فلز-کامپوزیت رقم زد.

- ترکیب زاویه و ارتفاع سازه می‌تواند در تعیین روند تخریب سازه و هدایت آن به لهیدگی، چین خوردگی و یا ترکیب این دو نقش آفرینی کند که این امر با توجه به نقطه شروع تخریب می‌تواند در جذب انرژی ویژه تأثیرگذار باشد. این امر می‌تواند در اعمال آغازگرهای تخریب حائز اهمیت باشد.

## ۶- فهرست علائم

### علائم لاتین و اختصارات

بازده نیروی لهیدگی	$CFE$
مدول یانگ الیاف در جهت طولی	$E_{11}$
مدول یانگ الیاف در جهت عرضی	$E_{22}$
انرژی جذب شده کل	$E_a$
مدول برشی درون صفحه‌ای	$G_{12}$
مدول برشی خارج صفحه‌ای	$G_{23}$
نیروی برخورد در هر لحظه	$P$
نیروی متوسط	$P_m$
نیروی بیشینه	$P_{max}$
حداکثر نیرو در نمودار نیرو - جا به جایی سازه در آزمایش فشار	$PCF$
انرژی جذب شده مخصوص	$SEA$
استحکام کششی طولی	$X_T$
استحکام فشاری طولی	$X_C$
استحکام کششی عرضی	$Y_T$
استحکام فشاری عرضی	$Y_C$
استحکام برشی	$S_C$
استحکام کششی طولی	$X_T$

### علائم یونانی

مقدار لهیدگی در لحظه	$\delta$
ضریب پواسون عمده	$\nu_{12}$
چگالی	$\rho$
تنش کششی نهایی طولی الیاف	$\sigma_v$
تنش فشاری نهایی طولی الیاف	$\sigma_{vc}$
تنش کششی نهایی عرضی الیاف	$\sigma_{2t}$
تنش فشاری نهایی عرضی الیاف	$\sigma_{2c}$
تنش برشی نهایی برای لایه الیاف در صفحه ۱-۲	$\tau_{12}$
محدودیت کرنش کششی نهایی در جهت الیاف	$\epsilon_{1t}$
محدودیت کرنش کششی نهایی در جهت عرضی الیاف	$\epsilon_{2t}$
کرنش برشی نهایی برای لایه الیاف در صفحه ۱-۲	$\gamma_{12}$

- [11] Q. Gao, C. Ge, W. Zhuang, L. Wang, Z. Ma, Crashworthiness analysis of double-arrowed auxetic structure under axial impact loading, *Materials and Design*, 161 (2019) 22-34.
- [12] I. Saenz-dominguez, I. Tena, A. Esnaola, M. Sarrionandia, J. Torre, J. Aurrekoetxea, Design and characterisation of cellular composite structures for automotive crash-boxes manufactured by out of die ultraviolet cured pultrusion, *Composites Part B*, 160(2018) (2019) 217-224.
- [13] R. Lu, W. Gao, X. Hu, W. Liu, Y. Li, X. Liu, International Journal of Mechanical Sciences Crushing analysis and crashworthiness optimization of tailor rolled tubes with variation of thickness and material properties, *International Journal of Mechanical Sciences*, 136(2017) (2018) 67-84.
- [14] G. Sun, M. Deng, G. Zheng, Q. Li, Thin-Walled Structures Design for cost performance of crashworthy structures made of high strength steel, *Thin Walled Structures*, (2018) 1-15.
- [15] S. Boria, A. Scattina, G. Belingardi, Axial crushing of metal-composite hybrid tubes: Experimental analysis, *Procedia Structural Integrity*, 8 (2018) 102-117.
- [16] M. Mühler, F. Bombis, R. Szlosarek, M. Kröger, Development of Crash Absorbers Made of Carbon Fibre-Reinforced Plastic Based on Experimental Studies, *Machine Dynamics Research*, 39(4) (2015) 65-72.
- [17] D. Chen, G. Sun, M. Meng, G. Li, Q. Li, Residual crashworthiness of CFRP structures with pre-impact damage – An experimental and numerical study, *International Journal of Mechanical Sciences*, 149 (2018) 122-135.
- [18] R.D. Hussein, D. Ruan, G. Lu, An analytical model of square CFRP tubes subjected to axial compression, *Composites Science and Technology*, 168 (2018) 170-178.
- [19] Y. Tong, Y. Xu, Improvement of crash energy absorption of 2D braided composite tubes through an innovative chamfer external triggers, *International Journal of Impact Engineering*, 111 (2018) 11-20.
- [1] G. Belingardi, C. Giorgio, *Vehicle Crashworthiness Design — General Principles and Potentialities of Composite Material Structures*, *Impact Engineering of Composite Structures*, (2011) 193-264.
- [2] S.F. Abdulqadir, Design a new energy absorber longitudinal member and compare with S-shaped design to enhance the energy absorption capability, *Alexandria Engineering Journal*, 57(4) (2018) 3405-3418.
- [3] N. Hussain, S. Regalla, D.R. Yendluri, Comparative Study of Trigger Configuration for Enhancement of Crashworthiness of Automobile Crash Box Subjected to Axial Impact Loading, *Procedia Engineering*, 173 (2017) 1390-1398.
- [4] A. Jusuf, I.S. Putra, The Effects of Spot Weld Pitch to the Axial Crushing Characteristics of Top-Hat Crash Box, 660 (2014) 578-582.
- [5] J. Wang, Y. Zhang, N. He, C.H. Wang, Crashworthiness behavior of Koch fractal structures, *Materials & Design*, (2018) 229-244.
- [6] P. Woelke, N. Abboud, D. Tennant, E. Hansen, C. McArthur, Ship impact study : Analytical approaches and finite element modeling, 19 (2012) 515-525.
- [7] X. Xu, Y. Zhang, J. Wang, F. Jiang, C.H. Wang, Crashworthiness design of novel hierarchical hexagonal columns, *Composite Structures*, 194(2017) (2018) 36-48.
- [8] PawełKaczyński, ZbigniewGronostajski, SławomirPolak, Progressive crushing as a new mechanism of energy absorption. The crushing study of magnesium alloy crash-boxes, *I. Journal, I. Engineering, I. Journal, I. Engi*, (2019) 1-8.
- [9] F. Wu, X. Xiao, T. Liu, Z. Zhang, Static and dynamic crushing of novel porous crochet-sintered metal and its filled composite tube, *Composite Structures*, (2018) 830-843.
- [10] Q. Gao, X. Zhao, C. Wang, L. Wang, Z. Ma, Multi-objective crashworthiness optimization for an auxetic cylindrical structure under axial impact loading, *Materials & Design*, 143 (2018) 120-130.

- and energy absorption characteristics of aluminium and E-glass/epoxy over-wrapped aluminium conical frusta under low velocity impact loading, *Composite Structures*, 136 (2016) 86-100.
- [24] A. Shiravand, M. Asgari, Hybrid metal-composite conical tubes for energy absorption; theoretical development and numerical simulation, *Thin-Walled Structures*, 145 (2019) 106442-106442.
- [25] S. Zhu, G.B. Chai, Low-velocity impact response of fibre-metal laminates – Experimental and finite element analysis, *Composites Science and Technology*, 72(15) (2012) 1793-1802.
- [20] G. Balaji, K. Annamalai, Crushing response of square aluminium column filled with carbon fibre tubes and aluminium honeycomb, *Thin-Walled Structures*, 132 (2018) 667-681.
- [21] A. Partovi Meran, T. Toprak, A. Muğan, Numerical and experimental study of crashworthiness parameters of honeycomb structures, *Thin-Walled Structures*, 78 (2014) 87-94.
- [22] A.R. Ab Ghani, C. Kee, M.Z. Othman, M. Koslan, A. Zaidi, Impact Response of Multi-Grooved Square Column, *Modern Applied Science*, 7 (2013) 12-25.
- [23] M. Kathiresan, K. Manisekar, Axial crush behaviours

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

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 J. Mech Eng.*, 54(8) (2022) 1851-1866.

DOI: [10.22060/mej.2022.20923.7338](https://doi.org/10.22060/mej.2022.20923.7338)

