

Investigating the effects of simultaneous symmetrical impulsive loading on honeycomb sandwich panels with different core topologies

Mehdi Niajalili, Majid Alitavoli, Reza Ansari*, Mojtaba Haghgoo

Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

ABSTRACT

In the design of structures, it is important that they have the ability to withstand loads. Sandwich panels have received attention due to their lightweight and good absorption. In this research, honeycomb sandwich panels with different core topologies were subjected to simultaneous impulsive loading and the effect of the amount of loads and the distance between charges on the deformation was evaluated. Due to the high cost of conducting the experimental test, the finite element software has been employed. After validating with the experimental data, the values of 0.5, 1 and 2 kg of selected charge in single and two-point loading at the sandwich panels with square, circular and octagonal core topologies have been affected and the deformation of sandwich panels has been evaluated. In order to investigate the effect of the distance of charges from each other on the deformation, these are placed at 8, 10 and 12 cm from each other. Then, the amount of deflection of sandwich panels with single-point loading has been compared. According to the investigations, the best topology for absorbing loads is octagonal, so that it has less displacement in single and two-point loading in the best case of 14.1 and 12.2 mm, respectively.

KEYWORDS

Deflection, core topologies, finite element software, sandwich panel, simultaneous impulsive loading.

* Corresponding Author: Email: r_ansari@guilan.ac.ir

1. Introduction

Nowadays, impact loadings are considered one of the most important threats to industrial and non-industrial infrastructures. Therefore, research on the behavior of various structures in the face of this type of loading has attracted the attention of many researchers [1-3]. Impulsive loading is a phenomenon that occurs as a result of the release of energy. This release of energy is immediate and very fast and causes the accumulation of energy at the site of the loads. On the other hand, the increasing demand for the use of monolithic structures with minimal weight has increased the necessity of research on sandwich panels (SPs) [4]. SPs are widely used in bridge construction, transportation systems, protective structures, etc. [5]. In recent years, the use of SPs has received much attention in various engineering fields for reasons such as excellent strength, optimal energy absorption, vibration absorption, etc. [6, 7]. SPs are three-layer composite structures consisting of two high-strength outer sheets and a soft or crushable core in the middle. In this study, a honeycomb SP with square, circular and octagonal core cell structures was designed in LS-DYNA software and subjected to simultaneous single-point and two-point symmetric impulsive loads. In the next step, the effect of changing the weight of the impulsive load on the deflection of the SP under the aforementioned conditions was evaluated. Finally, in the two-point loading case, the distance between the loads was changed and its effect on the deflection of the SP was evaluated, and a detailed comparison was made between single-point and two-point loading.

2. Methodology

In this study, the main objective is to find the effects of simultaneous symmetrical impulsive loads on the SP. According to the studies conducted, the effects of simultaneous impulsive loads are different due to the effect of the waves on each other [8]. Therefore, at this stage, the effects of two simultaneous symmetrical impulsive loads on the SP are investigated and compared with the same model with a single-point loading. The dimensions of the SP in this study are 300 mm × 600 mm × 30 mm. In order to reduce the calculation time, a one-half geometric model has been used. Therefore, a panel with dimensions of 300 mm × 300 mm × 30 mm has been designed according to Figures 1 and 2 for applying single-point and two-point impulsive loads. The front and back faces and the core were all made of AL6XN material [1].

3. Results and Discussion

In the first stage, as shown in Figure 1, single point loads were applied to the SP with square, circular, and octagonal core topology.

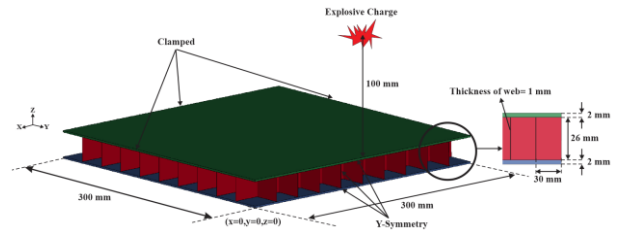


Figure 1. Characteristics of the SP simulated in the present study with an single-point impulsive loads

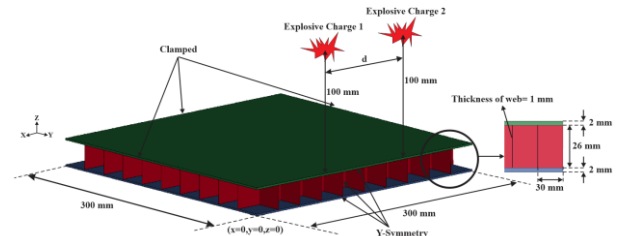


Figure 2. Characteristics of the SP simulated in the present study with two-point simultaneous impulsive loads

After the applying of 0.5, 1, and 2 kg loads on the aforementioned SP, the maximum deflection of the front and back faces was evaluated. Figures 3 and 4 show the deflection of the front and back faces of the SP in a single point impulsive loading.

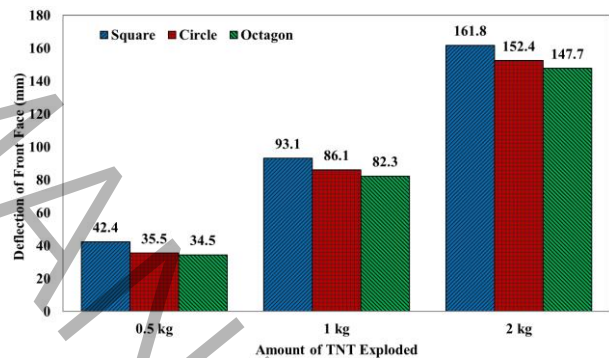


Figure 3. Maximum deflection of the front face of the SP in single-point impulsive loads

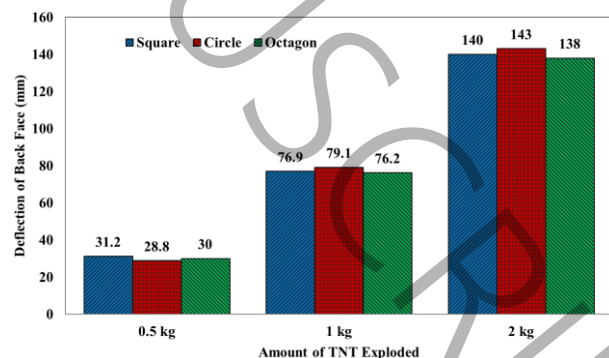


Figure 4. Maximum displacement of the back face of the SP in single-point impulsive loads

According to the research conducted on the cellular structures under study, the octagonal topology has shown the best

performance due to the minimum deflection of the front and back faces. The deflection of the front panel with octagonal core topology is reduced by 18.6, 11.6 and 8.7% under loads of 0.5, 1 and 2 kg, respectively, compared to the square core topology. In the next step, simultaneous loading of two-point symmetric charges is carried out as shown in Figure 2. The distance between the charges, indicated by the letter d , is determined as 8, 10 and 12 cm. Figures 5 to 7 show the deflection at different points on the front face of the SP under single-point and two-point impulsive loading.

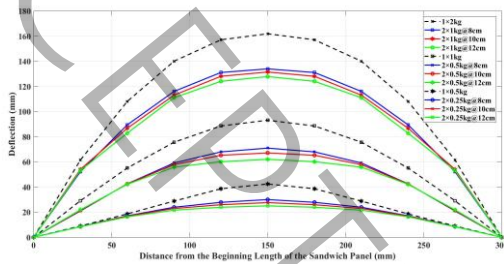


Figure 5. Comparison of the deflection of the front face of a SP with a square core topology

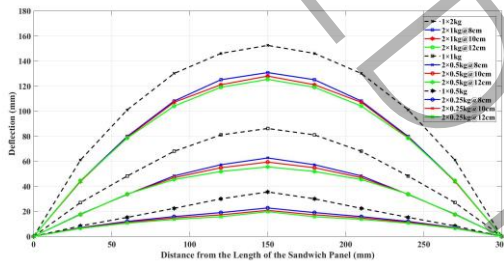


Figure 6. Comparison of the deflection of the front face of the SP with a circular core topology

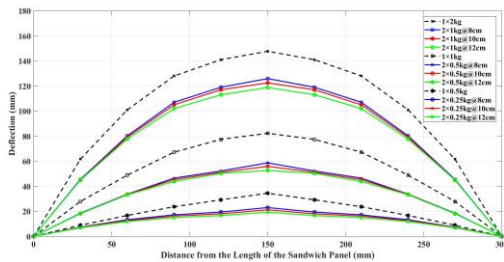


Figure 7. Comparison of the deflection of the front face of the SP with an octagonal core topology

4. Conclusions

One of the most important loadings on various engineering structures is impact loading. The behavior of waves in single-point and two-point impulsive loads is different from each other. Therefore, in this study, the effects of a single-point impulsive charge and two-point simultaneous symmetric impulsive charges on honeycomb SPs with different core topology have been investigated. The core topologies studied include square, circular, and octagonal. In this study, first, a single-point impulsive loading was applied to the honeycomb SP with the aforementioned topologies. In the next step, two-point simultaneous impulsive loads

with distances of 8, 10, and 12 cm were applied to the SP and the amount of deformation and deflection was estimated. The studies were conducted numerically using the LS-DYNA finite element software. The most important results of this research include the following:

- Single-point impulsive loads have a larger deformation in all cases than two-point loading.
- SPs with octagonal core topology have the best performance in absorbing impulsive loads.
- SPs with square core topologies have shown the weakest performance in single-point and two-point impulsive loading.
- By examining the deflection of the back face, it was found that the circular cellular structure has better absorption in small loads, but its performance weakens with increasing impulsive load weight.
- In two-point loading with small impulsive load weight values, changing the distance between the loads does not have much effect on the maximum deflection.

Therefore, by developing use of octagonal core topology in SP core, various structures can be better protected against impact loading.

5. References

- [1] K.P. Dharmasena, H.N. Wadley, Z. Xue, J.W. Hutchinson, Mechanical response of metallic honeycomb sandwich panel structures to high-intensity dynamic loading, *International Journal of Impact Engineering*, 35(9) (2008) 1063-1074.
- [2] R. Sawant, M. Patel, S. Patel, Numerical analysis of honeycomb sandwich panels under blast load, *Materials Today: Proceedings*, 87 (2023) 67-73.
- [3] T. Mirzababaie Mostofi, M. Rezasefat, M. Sayah Badkhor, H. Babaei, Effect of intense impulsive loading on performance of multi-layered plates, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 53(Issue 4 (Special Issue)) (2021) 2639-2670.
- [4] V. Birman, G.A. Kardomateas, Review of current trends in research and applications of sandwich structures, *Composites Part B: Engineering*, 142 (2018) 221-240.
- [5] F. Kiakojouri, H.R. Tavakoli, M.R. Sheidaii, V. De Biagi, Numerical analysis of all-steel sandwich panel with drilled I-core subjected to air blast scenarios, *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(5) (2022) 320.
- [6] Z. Wang, Recent advances in novel metallic honeycomb structure, *Composites Part B: Engineering*, 166 (2019) 731-741.
- [7] S.A. Ahmadi, A. Maleki, M.H. Pashaei, Three-Dimensional Elastic-Plastic Deformation Analysis of Composite Sandwich Panel under Blast Loading, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 52(5) (2019) 1079-1100.
- [8] A. Zaghoul, A. Remennikov, B. Uy, Enhancement of blast wave parameters due to shock focusing from multiple simultaneously detonated charges, *International Journal of Protective Structures*, 12(4) (2021) 541-576.

بررسی اثرات بارگذاری هم‌زمان متقارن ضربه‌ای روی ساندویچ پنل لانه زنبوری با ساختارهای سلولی مختلف هسته

مهدی نیاجلیلی، مجید علی‌طاوولی، رضا انصاری خلخالی*، مجتبی حقگو چروده

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران، r_ansari@guilan.ac.ir

چکیده

در طراحی سازه‌های مختلف، مهم‌است که آن‌ها توانایی تحمل بارهای مختلف را داشته باشند. در این راستا، ساندویچ پنل‌ها به دلیل سبکی و جذب بار مطلوب، مورد توجه قرار گرفته‌اند. با توجه به این‌که ضربه ناشی از انفجار می‌تواند بر سلامت انسان تأثیر بگذارد، بررسی رفتار ساندویچ پنل‌ها تحت این بارگذاری مهم است. در این تحقیق، ساندویچ پنل‌های لانه‌زنبوری با سلول‌های هسته متفاوت، تحت بارگذاری‌های انفجاری متقارن هم‌زمان قرار گرفته و تأثیر تغییر وزن و فاصله‌ی بارها، بر تغییر شکل ارزیابی شده است. با توجه به هزینه بالای انجام آزمایش‌های تجربی، از روش عددی توسط نرم‌افزار المان محدود ال‌اس‌داینما استفاده شد. پس از طراحی و اعتبارسنجی با داده‌های تجربی موجود در ادبیات، مقادیر $0.5/1$ و 2 کیلوگرم تی‌ان‌تی در یک و دونقطه (2×0.5 ، 2×0.25 ، 2×1 کیلوگرم) در فاصله 10 سانتی‌متری ساندویچ پنل با ساختارهای سلولی هسته مربع، دایره و هشت‌ضلعی منفجر شده و تغییر شکل آن‌ها ارزیابی شد. به منظور بررسی تأثیر فاصله بارهای انفجاری بر تغییر شکل در بارگذاری دونقطه‌ای، این بارها در فواصل 8 ، 10 و 12 سانتی‌متری از یکدیگر قرار داده شده و میزان تغییر شکل ساندویچ پنل‌ها با سلول‌های مختلف، با انفجار تک‌نقطه‌ای مقایسه شده است. بر طبق مطالعات انجام شده، بهترین ساختار برای جذب بارهای انفجاری، هشت‌ضلعی ارزیابی شده، به گونه‌ای که به ترتیب در انفجارهای تک‌نقطه‌ای و دونقطه‌ای، در بهترین حالت $14/1$ و $12/2$ میلی‌متر، جابجایی کمتر داشته است.

کلمات کلیدی

جابجایی، ساختار سلولی هسته، نرم افزار المان محدود، ساندویچ پنل، بارگذاری ضربه‌ای هم‌زمان.

امروزه بارگذاری‌های ضربه‌ای یکی از مهم‌ترین تهدیدات برای زیرساخت‌های صنعتی و غیرصنعتی محسوب می‌شوند. بنابراین، تحقیقات در مورد رفتار سازه‌های مختلف در مواجهه با این نوع بارگذاری‌ها، مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است [۱-۳]. انفجار پدیده‌ای است که در نتیجه آزاد شدن انرژی رخ می‌دهد. این آزاد شدن انرژی فوری و بسیار سریع بوده و باعث تجمع انرژی در محل انفجار می‌شود. از طرف دیگر، افزایش تقاضا برای استفاده از سازه‌های یکپارچه با حداقل وزن، ضرورت تحقیق روی ساندویچ‌پنل‌ها را افزایش داده است [۴]. ساندویچ‌پنل‌ها کاربرد گسترده‌ای در ساخت پل، سیستم‌های حمل و نقل، سازه‌های حفاظتی و غیره دارند [۵]. با توجه به مقاومت سازه‌های ساندویچی، استفاده از آن‌ها می‌تواند آسیب‌های ناشی از بارگذاری‌های انفجاری را حداقل نماید [۶]. در سال‌های اخیر استفاده از ساندویچ‌پنل به دلایلی مانند استحکام عالی، جذب بهینه انرژی، جذب ارتعاش و غیره در زمینه‌های مختلف مهندسی بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۷-۹]. ساندویچ‌پنل‌ها ساختارهای کامپوزیتی سه لایه‌ای هستند که از دو صفحه بیرونی با استحکام بالا و یک هسته نرم یا خرد شونده در وسط تشکیل شده‌اند [۱۰، ۱۱]. ساختارهای سلولی هسته مورد استفاده در ساندویچ‌پنل‌ها می‌توانند لانه زنبوری [۱۲]، موج‌دار [۱۳]، فوم‌دار [۱۴] و غیره باشند که نوع لانه زنبوری دارای بالاترین استحکام در میان ساختارهای سلولی هسته می‌باشد [۱۵]. این ساندویچ‌پنل‌ها برای مکان‌هایی که کاهش جرم از اهمیت بالایی برخوردار است، پرکاربرد هستند [۱۶]. قسمت‌های اصلی ساندویچ‌پنل در برابر بارگذاری مواد منفجره، قسمت جلویی و هسته آن است [۱۷]. در مسائل مربوط به انفجار، انجام تحقیقات تجربی، بسیار پرهزینه بوده، آلودگی زیست‌محیطی و صوتی بالایی ایجاد کرده و می‌تواند اثرات جبران‌ناپذیری بر سلامت انسان داشته باشد. بنابراین، بسیاری از محققان استفاده از نرم افزارهای المان محدود مانند ال‌اس داین^۱ و آباکوس^۲ را در تجزیه و تحلیل مسائل مربوط به انفجارها قابل اعتماد دانسته‌اند [۲، ۱۸، ۱۹]. ساوانت و همکاران [۲] تجزیه و تحلیل عددی یک ساندویچ‌پنل لانه زنبوری را که تحت بار انفجار تک‌نقطه‌ای قرار گرفته است، انجام داده‌اند. این محققان تجزیه و تحلیل تجربی را وقت‌گیر و پرهزینه دانسته و تحلیل عددی را به‌عنوان یک جایگزین مناسب پیشنهاد می‌کنند. این پژوهشگران با استفاده از نرم افزار المان محدود آباکوس رفتار ساندویچ‌پنل‌های لانه زنبوری با هسته‌های مربع، شش‌ضلعی و دایره‌ای را هنگام قرار گرفتن در معرض بارهای انفجاری مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها همچنین تأثیر استفاده از فوم آلومینیومی برای تقویت ساندویچ‌پنل را بررسی کرده و در نهایت اعلام کردند که ساندویچ‌پنل‌ها عملکرد بهینه‌ای را در برابر انفجار از خود نشان داده و با افزودن فوم، کاهش جابجایی صفحه جلو برای همه انواع هسته مشاهده شده است.

گیت و گوئل [۲۰] تأثیر استفاده از ساختارهای سلولی چندلایه برای هسته ساندویچ‌پنل را بر کاهش اثرات انفجارها بررسی کرده‌اند. آن‌ها ساختارهای سلولی مربعی، دایره‌ای و شش‌ضلعی را برای هسته در نظر گرفتند و در نهایت اعلام کردند که افزایش لایه‌های هسته ساندویچ‌پنل در همه ساختارهای سلولی، باعث افزایش مقاومت آن در برابر بارگذاری انفجاری می‌شود.

رای و همکاران [۱۸] در مورد تأثیر انفجارها روی هندسه خاصی از پنل ساندویچی لانه زنبوری تحقیق کرده‌اند. آن‌ها بیان کردند که ساختار سلولی آگزیٹیک نسبت پواسون منفی داشته و می‌تواند مقاومت بیشتری در برابر بارگذاری ایجاد کند و لذا استفاده از یک ساندویچ‌پنل با ساختار سلولی آگزیٹیک در هسته، حداکثر مقاومت را در نقطه بارگذاری ایجاد می‌کند. آن‌ها تحلیل خود را با استفاده از نرم افزار ال‌اس داین^۱ و با رویکرد ال‌بی‌ای^۳ انجام دادند و سعی کردند با تغییر پارامترهای ضخامت صفحه هسته، تعداد لایه‌ها و جرم بار، بهترین طراحی ساندویچ‌پنل تحت بارگذاری انفجاری را به دست آورند. این محققان در نهایت اعلام کردند که ساندویچ‌پنل لانه زنبوری با ساختار سلولی آگزیٹیک، مقاومت و جذب ضربه بهتری در مواجهه با بار انفجاری از خود نشان می‌دهد. لازم به ذکر است رویکرد ال‌بی‌ای یک رویکرد لاگرانژی است که فشار انفجار را با محاسبات تجربی بر اساس فاصله و جرم بار انفجاری محاسبه می‌کند.

مطالعه روی تأثیر بارگذاری انفجاری عادی و مکرر بر جابجایی پنل ساندویچی با هسته هرمی و مثلثی نیز توسط ریاماری و رفسه و روپا ماری و رفسه [۱۰] انجام شده است. این محققان با بیان این‌که همه مدل‌ها تحت بارگذاری انفجاری با فاصله مقیاس شده یکسان

¹ LS-DYNA

² ABAQUS

³ LBE(Load_Blast_Enhanced)

قرار گرفته‌اند، پنل ساندویچی با هسته هرمی را نسبت به هسته مثلی در بارگذاری‌های عادی و مکرر به ترتیب ۵ و ۴۸ درصد کارآمدتر اعلام نمودند.

مورلیدهار پاتل و شیودایال پاتل [۲۱] اثرات تغییر اندازه سلول هسته پنل ساندویچی با ساختار سلولی لانه زنبوری مربعی بر تغییر شکل پنل ساندویچی تحت انفجار را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده‌اند. این محققان در سه حالت بررسی‌های خود را انجام داده‌اند. این سه حالت شامل استفاده از ۶۴ مربع (۸×۸)، ۱۰۰ مربع (۱۰×۱۰) و ۱۴۴ مربع (۱۲×۱۲) می‌باشد که در حالت اول، دوم و سوم اندازه هرکدام از اضلاع سلول هسته به ترتیب ۳۸/۱۲، ۳۰/۵ و ۲۵/۴۲ میلی‌متر لحاظ شده است. ماده منفجره تی‌ان‌تی و به میزان ۱ تا ۳ کیلوگرم در نظر گرفته شده است. این پژوهشگران به این نتیجه رسیدند پنل‌های ساندویچی با اندازه سلول‌های لانه زنبوری بزرگ‌تر، تحت انفجار، میزان انحراف پوسته بیشتری دارند. علاوه بر این، اعلام کردند که در انفجارهای با شدت کم، پنل ساندویچی با سلول لانه زنبوری ۸×۸ (اندازه بزرگ‌تر) مقاوت قابل قبولی دارد، اما عملکرد آن در بارگذاری‌های با شدت بالاتر ضعیف‌تر شده و لذا در انفجارهای با شدت بالا، سلول لانه زنبوری ۱۲×۱۲ (اندازه سلول کوچک‌تر) ارجحیت دارد. این محققان در مطالعه دیگری تاثیر ارتفاع هسته بر جابجایی پنل ساندویچی را بررسی کردند [۱۱]. در تحقیقات آن‌ها، ارتفاع هسته ۵۱، ۶۱ و ۷۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده و مقادیر ۱ تا ۳ کیلوگرم تی‌ان‌تی را در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از ساندویچ‌پنل منفجر نمودند. برطبق مطالعات این پژوهشگران، با افزایش ضخامت هسته، جابجایی صفحه پشتی کاهش یافته و مقاومت هسته در جذب انرژی افزایش می‌یابد. این محققان در نهایت اعلام نمودند که ارتفاع هسته ۷۱ میلی‌متری، بهترین عملکرد را نسبت به دو مورد دیگر از خود نشان داده که می‌تواند در صنایع نظامی کاربرد داشته باشد. این محققان، تحلیل خود را توسط نرم افزار المان محدود آباکوس و با الگوریتم کانوپ^۴ انجام داده‌اند. این الگوریتم که توسط ارتش ایالات متحده توسعه داده شده است، یک فرمول تجربی برای تخمین فشار اعمال شده ناشی از بارهای انفجاری روی سطوح است. در مدل تجربی کانوپ، پارامترهای ورودی شامل جرم معادل تی‌ان‌تی، فاصله بارگذاری، نوع انفجار (در هوا یا روی سطح)، نقطه منبع انفجار و سطح هدف برای ارزیابی انفجار مورد نیاز است [۲۲].

در دهه‌های گذشته، انفجارهای تصادفی به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. بنابراین، انجمن‌های مهندسی با توجه به تأثیر انفجار بر سازه‌های مختلف، دستورالعمل‌هایی را پیرامون طراحی سازه برای مقاومت در برابر انفجار صادر کرده‌اند [۲۳-۲۵]. اکثر این راهنماها، انفجارهای ناشی از چندین منبع انفجار را به دلیل پیچیدگی رفتار موج انفجار در طول بازتاب‌های متعدد در نظر نمی‌گیرند. این در حالی است که در دستورالعمل یوآف‌سی [۲۶] نیز اثرات بارهای انفجاری هم‌زمان کمتر مورد بحث قرار داده شده است، زیرا داده‌های نظری و تجربی محدودی در دسترس است. هنگامی که انفجارهای متعدد رخ می‌دهد، امواج انفجار در فواصل طولانی با هم ادغام می‌شوند و رابطه فشار-زمان به‌گونه‌ای عمل می‌کند که گویی یک ماده منفجره واحد است [۲۷].

زغلول و همکاران [۲۷] تأثیر پارامترهای موج انفجار بر یکدیگر را در انفجار هم‌زمان مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها اظهار داشتند که این نوع انفجار در مسائل مربوط به تخریب بسیار مفید است. علاوه بر این، هنگامی که بارهای انفجاری به‌طور هم‌زمان منفجر می‌شوند، فشار و مقادیر ضربه‌ای متفاوتی را در مقایسه با یک بار منفرد معادل به‌وجود می‌آورند. در نهایت، این محققان روش‌های تقریبی را برای محاسبه پارامترهای موج انفجار از چندین بار کروی منفجر شده به‌طور هم‌زمان، ارائه کردند که در آن فشار و ضربه ناشی از بارهای متعدد تنها با دانستن پارامترهای یک بار معادل منفرد قابل محاسبه است. موهوتیکه و همکاران [۲۸] نیز روی انفجار هم‌زمان دو و سه بار انفجاری پژوهش کرده‌اند. آن‌ها دریافتند که اثر انفجارهای هم‌زمان، زمانی تشدید می‌شود که بارهای انفجاری به هم نزدیک شوند. لذا فاصله بین بارهای انفجاری می‌تواند تاثیر مستقیم روی حداکثر فشار ایجاد شده داشته باشد. لذا اثرات انفجاری بارگذاری هم‌زمان دونقطه‌ای، با توجه به فاصله مقدار بارگذاری ممکن است کمتر یا بیشتر از بار انفجاری معادل تک‌نقطه‌ای باشد [۲۷، ۲۹]. در این پژوهش، ساندویچ‌پنل لانه زنبوری با ساختارهای سلولی هسته مربعی، دایره‌ای و هشت‌ضلعی در نرم افزار ال‌اس‌داینا طراحی شده و تحت بارهای انفجاری متقارن هم‌زمان تک‌نقطه‌ای و دونقطه‌ای قرار گرفته است. در مرحله بعد تاثیر تغییر وزن بار انفجاری بر جابجایی ساندویچ‌پنل، در شرایط مذکور مورد ارزیابی قرار گرفته است. در نهایت، در حالت انفجار دونقطه‌ای، فاصله بین

⁴ ConWep

بارهای انفجاری تغییر داده شده و تأثیر آن بر جابجایی ساندویچ پنل مورد ارزیابی قرار گرفته و مقایسه دقیقی بین بارگذاری تک نقطه‌ای و دونقطه‌ای انجام شده است.

۲- مدل سازی عددی

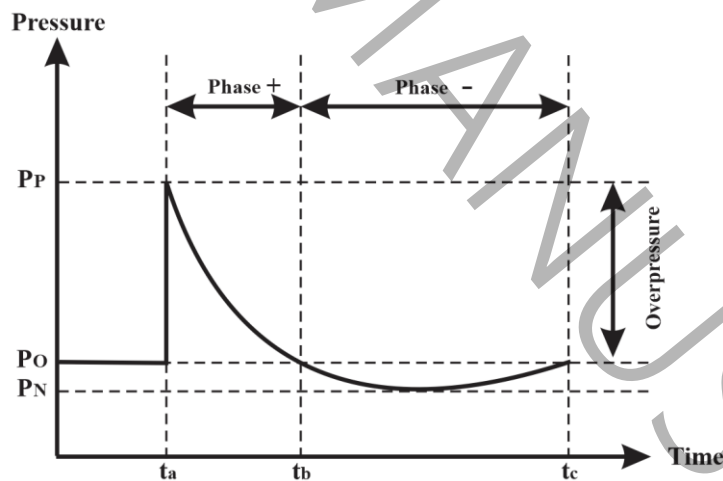
۲-۱- انفجار

هنگام انفجار ماده منفجره در هوای آزاد، برای جسمی که در فاصله معینی از مرکز بار انفجاری قرار دارد، تغییرات فشار-زمان مانند شکل ۱ نشان داده می‌شود [۲۶]. پس از گذشت زمان t_a از انفجار، فشار به هدف می‌رسد و فشار در هدف بلافاصله به P_P افزایش می‌یابد. بنابراین t_a و P_P را به ترتیب زمان رسیدن و پیک فشار می‌نامند. مطابق شکل ۱، زمان پس از انفجار به دو بخش فاز مثبت و فاز منفی به شرح زیر تقسیم می‌شود:

$$t_P = t_b - t_a \quad (1)$$

$$t_N = t_c - t_b \quad (2)$$

در معادلات (۱) و (۲)، t_a زمان شروع فاز مثبت (زمان رسیدن)، t_b زمان پایان فاز مثبت و زمان شروع فاز منفی و t_c زمان پایان فاز منفی است. t_P و t_N به ترتیب فازهای مثبت و منفی را نشان می‌دهند. در طول زمان t_P ، فشار در هدف به فشار محیط (P_o) باز می‌گردد و سپس برای مدت زمان t_N ، تحت یک فاز مکش با فشار منفی P_N قرار می‌گیرد که مدت زمان فاز فشار منفی بیشتر از فاز فشار مثبت است.



شکل ۱: مشخصات موج ضربه حاصل از انفجار

Fig. 1. Characteristics of the shock wave resulting from the impulsive loading

لازم به ذکر است که معمولاً تغییر شکل هدف در فاز مثبت بارزتر است. بنابراین معمولاً فاز منفی برای مطالعه نادیده گرفته می‌شود [۲]. تغییر فشار در فاز مثبت با معادله اصلاح شده فریدلندر (معادله ۳) نشان داده شده است [۳۰].

$$P(t) = (P_P - P_o) \left[1 - \frac{t - t_a}{t_P} \right] e^{-\frac{t - t_a}{\gamma}} \quad (3)$$

که در این رابطه γ ثابت اتلاف زمان می‌باشد.

۲-۲- انتخاب مدل ماده و پارامترهای نرم افزاری

در این تحقیق از خواص مواد فولاد ضد زنگ که توسط دارماسنا و همکاران [۱] مورد استفاده قرار گرفت، در تمام مدل‌های مورد بررسی، استفاده شده است. از مدل ماده جانسون-کوک که بهترین انتخاب برای بررسی رفتار فلزات در تغییر شکل پلاستیک است [۱۱، ۳۱، ۳۲]، نیز برای مدل‌سازی ساندویچ‌پنل‌ها استفاده شده است. این مدل، بهترین پیش‌بینی در تغییر شکل پلاستیک مواد فلزی تحت انفجار در هوا با الگوریتم کانوپ، که دارای کرنش و نرخ کرنش بالا در دماهای بالا می‌باشند، را دارد [۳۳، ۳۴]. فرمول مدل ماده جانسون-کوک به صورت زیر ارائه می‌شود [۱۱]:

$$\sigma = (A + B \varepsilon^n) \left(1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^m\right) \quad (4)$$

در اینجا، σ تنش سیلان، ε کرنش، $\dot{\varepsilon}$ نرخ کرنش و $\dot{\varepsilon}_0$ نرخ کرنش مرجع است. پارامترهای A ، B ، C ، n و m ثابت‌های معادله جانسون-کوک هستند که به ترتیب ثابت تنش تسلیم، ثابت سخت‌شدگی کرنش، نفوذ ویسکوز، توان کرنش سختی و ثابت نرم شدن حرارتی را نشان می‌دهند [۳۵]. همچنین، T ، T_m و T_r به ترتیب دمای کنونی، دمای ذوب و دمای مرجع هستند. مدل ماده جانسون-کوک دارای سه بخش مهم است؛ سخت‌شدن کرنشی، سخت شدن نرخ کرنشی و اثر نرم شدن حرارتی [۳۶]. در این تحقیق به دلیل این‌که اثرات حرارتی مد نظر نیست، از مدل ساده شده جانسون کوک به شرح زیر استفاده شد [۳۷]:

$$\sigma = (A + B \varepsilon^n) \left(1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right) \quad (5)$$

نرم افزار المان محدود مورد استفاده در این تحقیق، ال‌اس‌داینما بوده که به دلیل پیش‌بینی دقیق رفتار بارهای انفجاری مورد توجه بسیاری از محققین [۱۸، ۱۹] قرار گرفته است. شبیه‌سازی بارگذاری انفجاری با استفاده از الگوریتم کانوپ در ال‌اس‌داینما، به روش ال‌بی‌ای انجام شده است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، مدل ماده مورد استفاده در این پژوهش، مدل جانسون-کوک ساده‌شده است که با مدل ماده‌ای تحت همین نام (مدل ماده جانسون-کوک ساده شده^۵) در نرم افزار ال‌اس‌داینما ارائه شده است. جدول ۱ پارامترهای مدل ماده جانسون-کوک را برای فولاد ضد زنگ نشان می‌دهد.

جدول ۱: خواص مواد و پارامترهای مدل ماده جانسون-کوک برای فولاد ضد زنگ [۳۸]

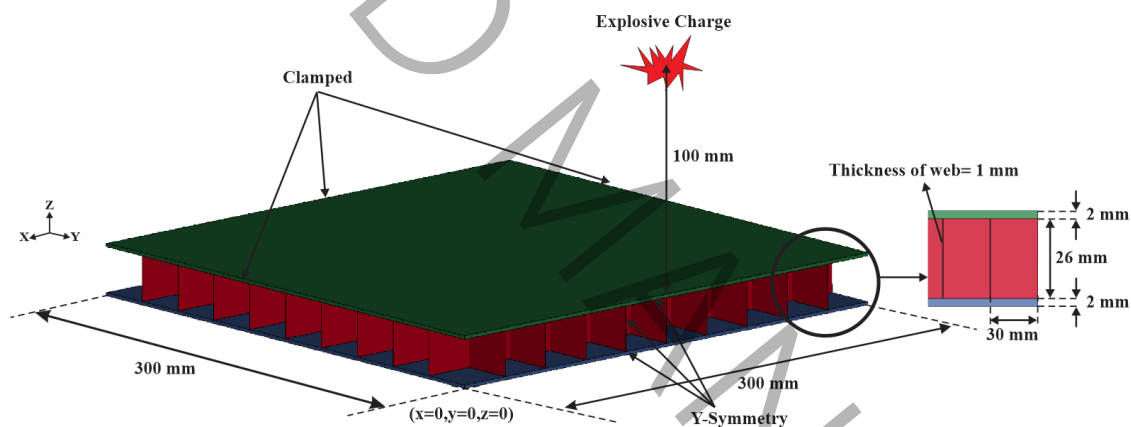
Table 1. Material properties and Johnson-Cook model parameters for stainless steel

۱۶۱	$E(\text{GPa})$
۷۸۵۰	$\rho(\text{kg/m}^3)$
۰/۳۵	ν
۰/۴	$A(\text{GPa})$
۱/۵	$B(\text{GPa})$
۰/۰۴۵	C
۱/۲	m
۰/۴	n
۰/۰۰۱	$\varepsilon_0(\text{s}^{-1})$

⁵ MAT_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK

در این تحقیق هدف اصلی یافتن اثرات بارهای انفجاری متقارن هم‌زمان روی ساندویچ پنل می‌باشد. براساس بررسی‌های انجام شده، اثر بارهای انفجاری هم‌زمان به دلیل تأثیر امواج انفجار بر یکدیگر متفاوت است [۲۷]. بنابراین در این مرحله اثرات دو انفجار متقارن هم‌زمان روی ساندویچ پنل بررسی و با همان مدل با انفجار تک‌نقطه‌ای مقایسه شده است.

ابعاد ساندویچ پنل در این تحقیق ۳۰۰ میلی‌متر × ۶۰۰ میلی‌متر × ۳۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. به منظور کاهش زمان محاسبه از مدل هندسی یک‌دوم استفاده شده است. بنابراین پنل با ابعاد ۳۰۰ میلی‌متر × ۳۰۰ میلی‌متر × ۳۰ میلی‌متر مطابق شکل های ۲ و ۳ برای اعمال بارهای انفجاری تک‌نقطه‌ای و دونقطه‌ای طراحی شده است. ضخامت صفحه جلو و عقب ۲ میلی‌متر و ارتفاع هسته ۲۶ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همچنین ضخامت المان‌های هسته در تمامی مدل‌های تحقیقاتی ۱ میلی‌متر لحاظ شد. همان‌طور که در شکل ۲ و ۳ نشان داده شده است، شرط مرزی گیردار در سه وجه و شرط مرزی تقارن در یک وجه اعمال شده است. صفحه‌های جلو و عقب و هسته همگی از مواد فولاد ضد زنگ با مشخصات ذکر شده در جدول ۱ ساخته شده‌اند. صفحات جلویی و پشتی با المان جامد^۶ ۵ میلی‌متری و هسته با المان پوسته^۷ ۵ میلی‌متری شبکه‌بندی شده‌اند. اندازه شبکه‌های المان‌های هسته، صفحات بالایی و پایینی بعد انجام بررسی حساسیت مش انتخاب شده است. از الگوریتم تماس خودکار گره‌ها به سطح^۸، بین اولین و آخرین لایه هسته با صفحات جلو و عقب استفاده شده است. زمان پایان محاسبات ۰/۰۱ ثانیه و پارامتر ضریب مقیاس برای گام زمانی محاسبات^۹ نیز ۰/۶۷ در نظر گرفته شده است. برای بررسی دقیق تغییر شکل نیز، برای پارامتر فاصله زمانی بین خروجی‌ها^{۱۰} در خروجی پایگاه داده^{۱۰}، مقدار ۰/۱ میلی‌ثانیه لحاظ شده است.



شکل ۲: مشخصات ساندویچ پنل شبیه‌سازی شده در تحقیق حاضر با یک بار انفجاری

Fig. 2. Characteristics of the sandwich panel simulated in the present study with a single-point impulsive loading

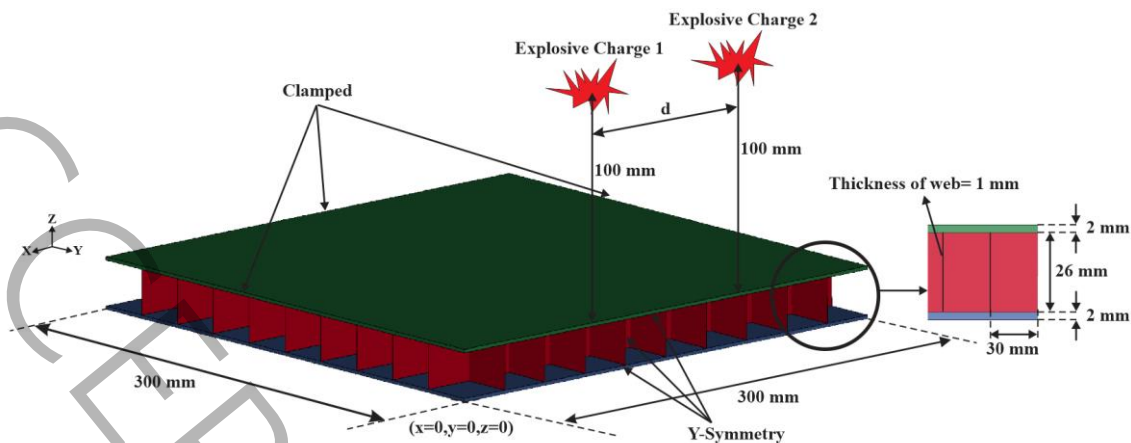
⁶ Solid

⁷ AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE

⁸ TSSFAC

⁹ DT

¹⁰ DATABASE-BINARY_D3PLOT



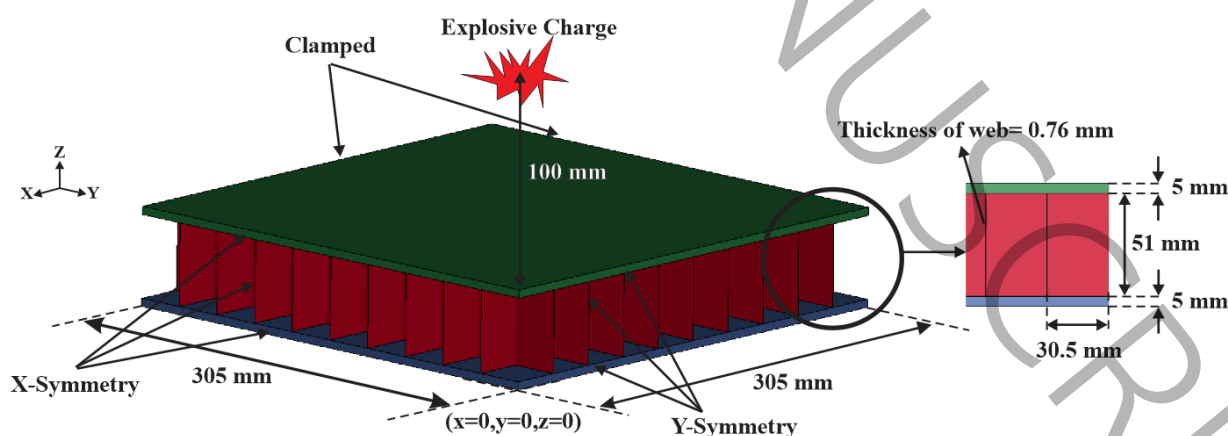
شکل ۳: مشخصات ساندویچ پنل شبیه سازی شده در تحقیق حاضر با دو بار انفجاری متقارن همزمان

Fig. 3. Characteristics of the sandwich panel simulated in the present study with two simultaneous symmetrical impulsive loading

مقادیر بارهای انفجاری برای مدل انفجاری تک نقطه‌ای ۰/۵، ۱ و ۲ کیلوگرم است. برای مدل انفجار دوقطه‌ای ۲×۰/۲۵ کیلوگرم، ۲×۰/۵ کیلوگرم و ۲×۱ کیلوگرم در نظر گرفته شده است. مطابق شکل ۶، در حالت انفجار دوقطه‌ای، بارهای انفجاری در فاصله d از یکدیگر قرار گرفته‌اند. این فاصله برای ساختارهای سلولی مختلف تحقیقاتی ۸، ۱۰ و ۱۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است.

۴-۲- راستی آزمایشی

به منظور اعتبارسنجی، از پارامترهای تحقیق تجربی دارماسنا و همکاران [۱] استفاده شده است. این محققان از یک ساندویچ پنل به ابعاد $۶۱ \times ۶۱ \times ۶/۱$ سانتی‌متر مکعب استفاده کردند که ماده منفجره در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از مرکز آن قرار گرفته است. هسته این ساندویچ پنل دارای ساختار سلولی مربع است. ضخامت صفحه جلو و عقب ۵ میلی‌متر و ارتفاع هسته ۵۱ میلی‌متر است. برای کاهش زمان محاسبه از مدل هندسی یک چهارم در طراحی آن، استفاده شده است. شکل ۴ نمای یک‌چهارم ساندویچ پنل دارماسنا و همکاران [۱] را همراه شرایط مرزی و جزئیات دیگر نشان می‌دهد.

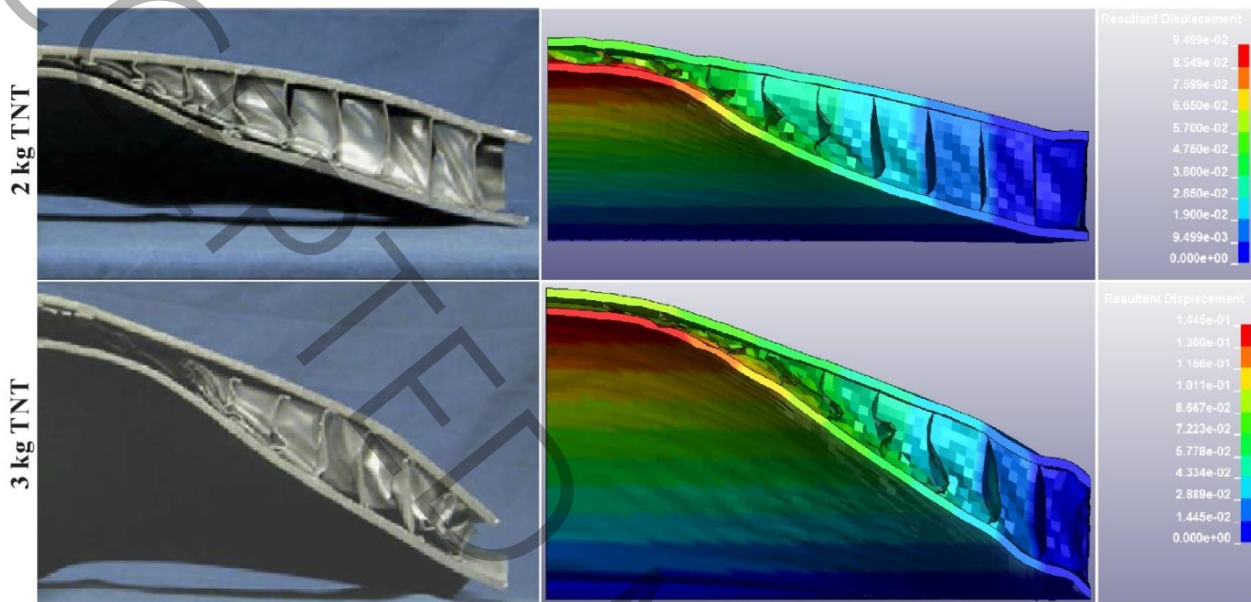


شکل ۴: شبیه‌سازی مدل دارماسنا و همکاران [۱] در نرم افزار LS-DYNA

Fig. 4. Simulation of the model of Dharmasena et al.[1] in LS-DYNA software

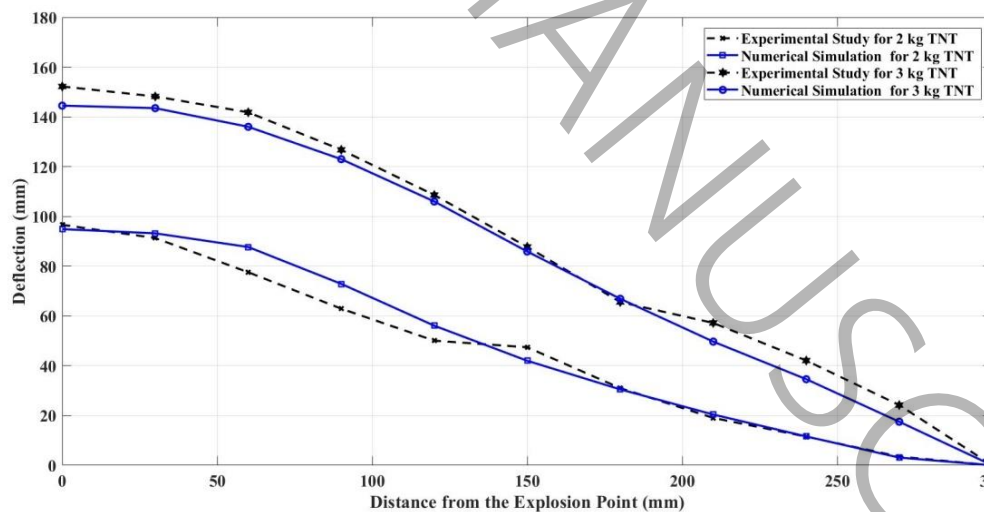
در این قسمت نیز از فولاد ضد زنگ برای صفحه‌های جلو و عقب و هسته با مشخصات ذکر شده در جدول ۱ استفاده شده است. مطابق شکل ۴، ابعاد صفحات جلو و عقب در مدل هندسی یک‌چهارم، ۳۰۵ میلی‌متر \times ۳۰۵ میلی‌متر \times ۵ میلی‌متر است. ابعاد هر کدام

از سلول‌های هسته نیز $30/5$ میلی‌متر \times $30/5$ میلی‌متر \times 51 میلی‌متر است. سائز و نوع شبکه‌بندی المان صفحات جلویی، عقبی و هسته و همچنین الگوریتم تماس میان آن‌ها مطابق مدل هندسی طراحی شده در قسمت ۳-۲ در نظر گرفته شده است. مقایسه تغییر شکل و جابجایی در شبیه‌سازی عددی حاضر و مطالعه تجربی [۱] در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است.



شکل ۵: مقایسه تغییر شکل بین مطالعه تجربی [۱] و شبیه‌سازی عددی حاضر

Fig. 5. Comparison of deformation between the experimental study [1] and the present numerical simulation



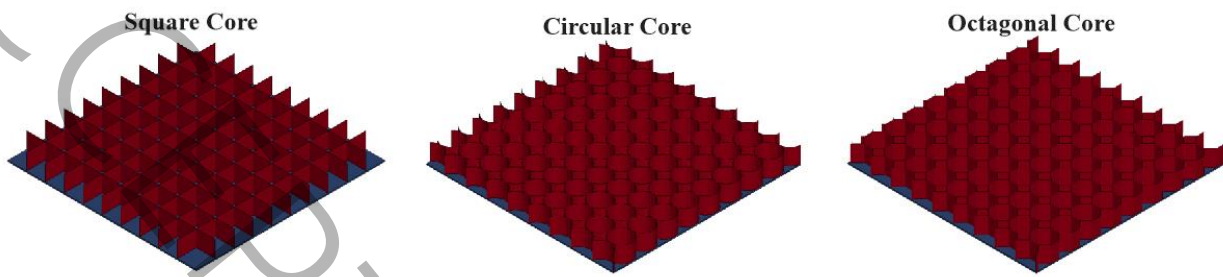
شکل ۶: مقایسه جابجایی بین مطالعه تجربی [۱] و شبیه‌سازی عددی حاضر

Fig. 6. Comparison of deflection between the experimental study [1] and the present numerical simulation

با مقایسه ساختارهای تغییر شکل و مقادیر جابجایی بین مطالعه تجربی و تحلیل عددی حاضر، تطابق خوبی مشاهده می‌شود که اعتبار مدل‌های تحقیقاتی را تایید می‌کند.

۵-۲- ساختارهای سلولی هسته

در این تحقیق سه ساختار سلولی مختلف برای هسته لانه زنبوری در نظر گرفته شده است. این ساختارها شامل دایره، مربع و هشت‌ضلعی است. شکل ۷ ساختارهای سلولی شبیه‌سازی شده برای هسته ساندویچ‌پنل توسط نرم افزار ال‌اس‌داینرا را نشان می‌دهد.



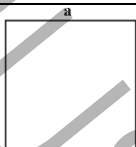
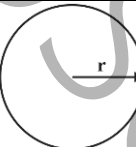
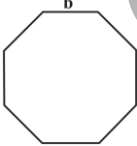
شکل ۷: نمایی از ساختارهای سلولی شبیه‌سازی شده برای هسته ساندویچ‌پنل

Fig. 7. View of simulated core topologies for the sandwich panel

همان‌طور که گفته شد طول، عرض و ارتفاع ساندویچ‌پنل در تمامی موارد یکسان در نظر گرفته شده است. برای افزایش دقت مقایسه، مساحت سلول‌های هر سه نوع ساختار سلولی، برابر با نوع دیگر در نظر گرفته شده است. با توجه به یکسان بودن ارتفاع هسته پنل ساندویچی، برابر گرفتن سطح مقطع هر کدام از سلول‌های هسته باعث می‌شود که حجم فضای خالی داخل سلول‌ها با یکدیگر برابر شده و مقایسه دقیقی بین تاثیر نوع ساختار سلولی هسته بر جابجایی پنل ساندویچی تحت بارهای انفجاری انجام شود. سطح مقطع هر سلول ساندویچ‌پنل لانه‌زنبوری در مدل هسته مربعی با ابعاد ۳۰ میلی‌متر × ۳۰ میلی‌متر طراحی شده است. بنابراین مساحت هر سلول واحد ۰/۰۹ سانتی‌متر مربع محاسبه شده است. با برابر گرفتن مساحت‌ها، شعاع دایره و ضلع سلول‌های هشت‌ضلعی مطابق جدول ۲ ارزیابی شده است. لازم به ذکر است که ضخامت پوسته‌ها در تمام موارد یک میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

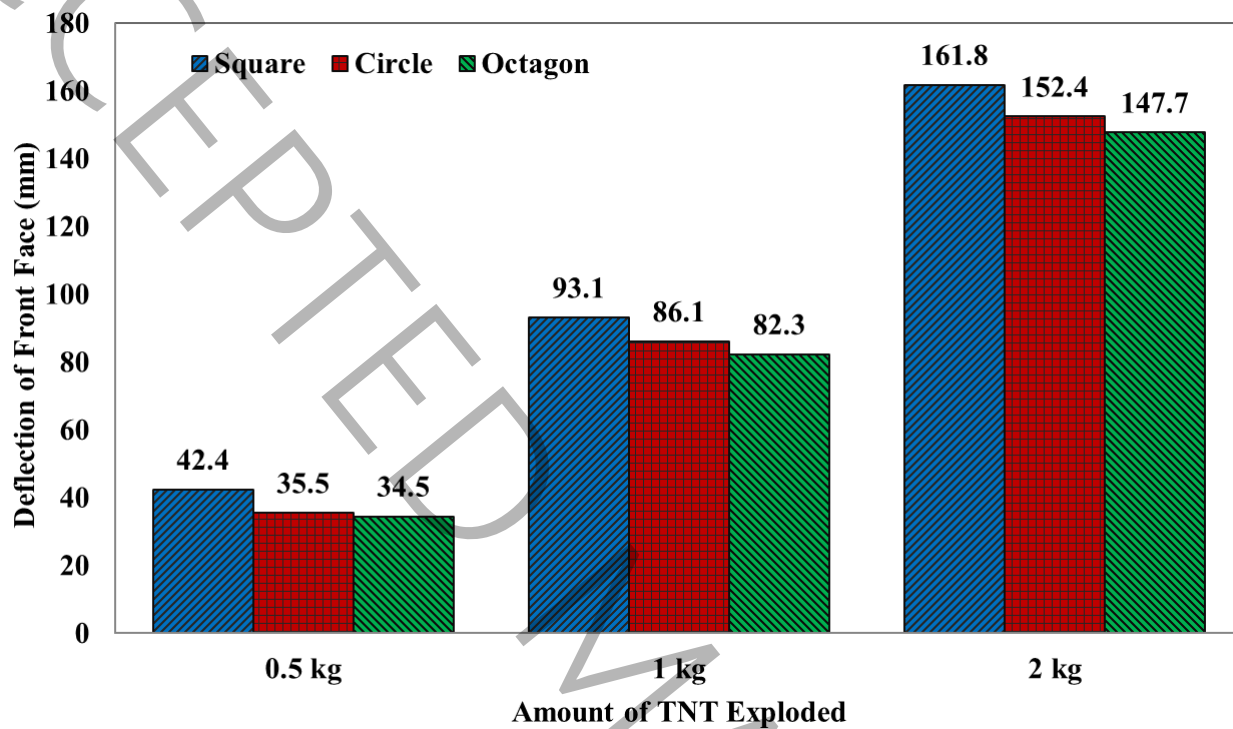
جدول ۲: ابعاد سلول شبیه‌سازی شده برای هسته ساندویچ‌پنل

Table 2. Simulated cell dimensions for sandwich panel core

مساحت و جزئیات	شکل سلول
$Area = a^2 = 3\text{cm} \times 3\text{cm} = 9\text{cm}^2$	
$Area = \pi r^2 = 9\text{cm}^2 \Rightarrow r = 1/693\text{cm}$	
$Area = 2(1 + \sqrt{2}) \times b^2 = 9\text{cm}^2 \Rightarrow b = 1/365\text{cm}$	

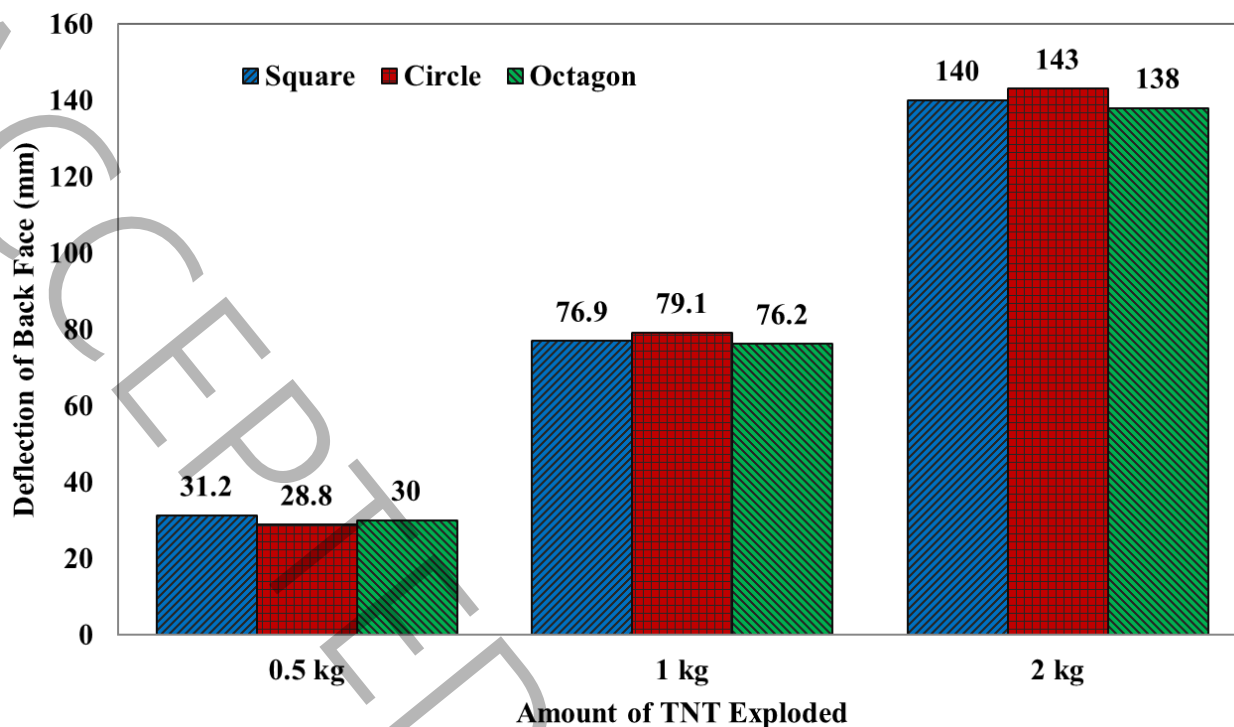
۳- نتایج و بحث

در مرحله اول، مطابق شکل ۵، اعمال بارهای تک نقطه‌ای روی ساندویچ پنل با ساختارهای سلولی هسته مربعی، دایره‌ای و هشت ضلعی انجام شده است. پس از انفجار بارهای ۰/۵، ۱ و ۲ کیلوگرمی روی پنل ساندویچی مذکور، حداکثر جابجایی صفحه جلو و عقب مورد ارزیابی قرار گرفته است. شکل‌های ۸ و ۹ میزان جابجایی صفحه جلو و عقب ساندویچ پنل در انفجار تک نقطه‌ای با بارهای ذکر شده را نشان می‌دهد.



شکل ۸: حداکثر جابجایی صفحه جلویی ساندویچ پنل در انفجار تک نقطه‌ای

Fig. 8. Maximum deflection of the front face of the sandwich panel in a single-point impulsive loading



شکل ۹: حداکثر جابجایی صفحه عقبی ساندویچ پنل در انفجار تک نقطه‌ای

Fig. 9. Maximum deflection of the back face of the sandwich panel in a single-point impulsive loading

این نکته در اینجا حائز اهمیت است که در برخی مراجع [۲]، صرف نظر از مساحت سلول‌های هسته، تنها تعداد سلول‌ها در راستاهای X و Y را برابر در نظر گرفته‌اند. در این حالت، مساحت هر کدام از سلول‌های هسته در ساختارهای سلولی مختلف با یکدیگر تفاوت داشته و مقایسه دقیقی بین آن‌ها صورت نمی‌گیرد. زیرا با توجه به ثابت بودن ارتفاع هسته، حجم سلول‌ها با یکدیگر تفاوت می‌یابد. برطبق مطالعات انجام شده [۲۱]، در بارگذاری انفجاری، افزایش سطح مقطع سلول‌های هسته پنل ساندویچی باعث افزایش جابجایی آن می‌شود. اما با برابر گرفتن مساحت هر کدام از سلول‌ها، که ضربات ناشی از بارگذاری انفجاری بر آن‌ها اثر می‌کند، مقایسه دقیق‌تری بین ساختارهای سلولی مورد نظر انجام می‌شود.

با توجه به تحقیقات انجام شده روی ساختارهای سلولی مورد بررسی، ساختار هشت‌ضلعی بهترین عملکرد را به دلیل حداقل جابجایی صفحه جلو و عقب از خود نشان داده است. جابجایی صفحه جلویی با ساختار سلولی هشت‌ضلعی، به ترتیب ۱۸/۶، ۱۱/۶ و ۸/۷ درصد در اثر بارهای ۰/۵، ۱ و ۲ کیلوگرم نسبت به ساختار سلولی مربعی کاهش یافته است. در مرحله بعد، بارگذاری هم‌زمان مواد منفجره متقارن دو نقطه‌ای مطابق شکل ۶ انجام شده است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، فاصله بین مواد منفجره که با حرف d نشان داده است، ۸، ۱۰ و ۱۲ سانتی‌متر تعیین شده است. جدول ۳، اثرات بارگذاری انفجار متقارن دو نقطه‌ای هم‌زمان روی ساندویچ پنل با ساختارهای سلولی هسته مربعی، دایره‌ای و هشت‌ضلعی را نشان می‌دهد.

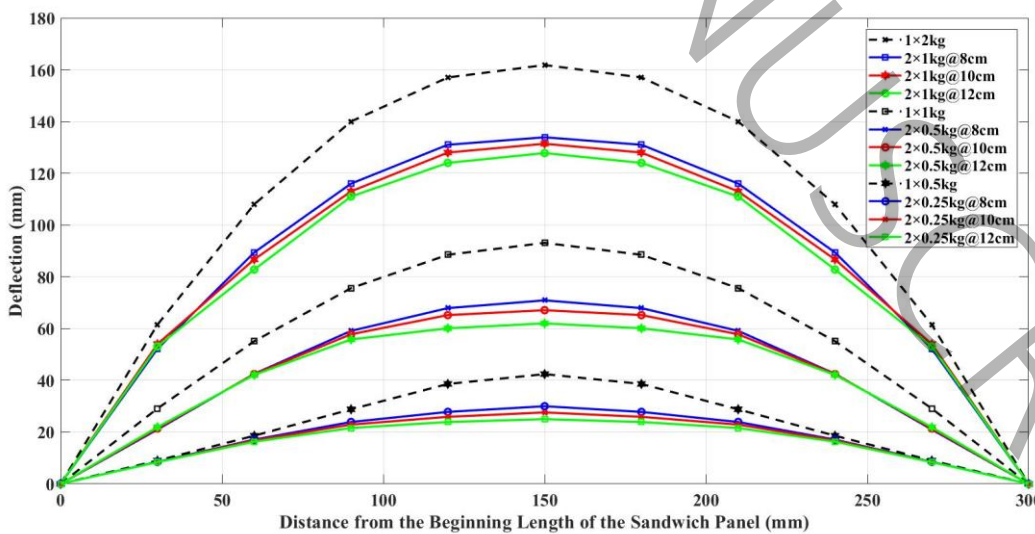
جدول ۳: مقادیر حداکثر جابجایی صفحات جلو و عقب ساندویچ پنل تحت بارگذاری دونقطه‌ای

Table 3. Maximum deflection of the front and back faces of the sandwich panel under two-point impulsive loading

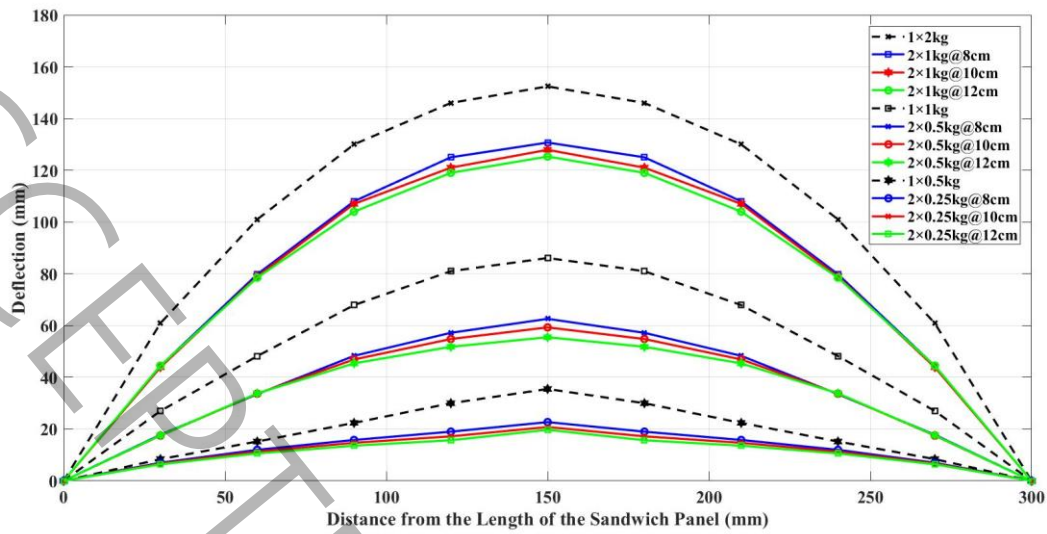
حداکثر جابجایی با توجه به نوع ساختار سلولی هسته (mm)						مقدار d (mm)
هشت‌ضلعی		دایره		مربع		
صفحه عقبی	صفحه جلویی	صفحه عقبی	صفحه جلویی	صفحه عقبی	صفحه جلویی	
						بارگذاری (kg)
۱۱۲	۱۲۵/۹	۱۱۷	۱۳۰/۷	۱۱۳	۱۳۳/۹	دو بار ۱
۵۰/۳	۵۸/۷	۵۲/۳	۶۲/۶	۵۳/۵	۷۰/۹	دو بار ۰/۵
۱۹/۱	۲۳	۱۸	۲۲/۷	۲۴	۳۰	دو بار ۰/۲۵
۱۰۸/۲	۱۲۲/۵	۱۱۴	۱۲۷/۹	۱۱۰	۱۳۱/۴	دو بار ۱
۴۹/۶	۵۵/۹	۵۱/۲	۵۹/۳	۵۲/۹	۶۷/۱	دو بار ۰/۵
۱۷/۹	۲۱/۲	۱۶/۸	۲۱/۷	۲۳	۲۷/۶	دو بار ۰/۲۵
۱۰۷	۱۱۸/۸	۱۱۲	۱۲۵/۳	۱۰۸	۱۲۷/۸	دو بار ۱
۴۸	۵۲/۶	۴۹/۳	۵۵/۵	۵۱/۶	۶۲	دو بار ۰/۵
۱۶/۳	۱۹/۳	۱۴/۶	۱۹/۷	۲۱/۵	۲۵	دو بار ۰/۲۵

ساختار سلولی هسته هشت‌ضلعی در این مرحله نیز بهترین عملکرد را در انفجار متقارن هم‌زمان دونقطه‌ای از خود نشان داده است. در اکثر شرایط بارگذاری میزان تغییر شکل ساندویچ پنل با ساختار سلولی مذکور کمتر از دو حالت دیگر است. بر اساس بررسی‌های انجام شده، در بارهای انفجاری کوچک، جابجایی سطح عقبی ساندویچ پنل با ساختار سلولی هسته دایره‌ای، بهتر از دو ساختار دیگر است. اما با افزایش وزن بارهای انفجاری، عملکرد هسته ساندویچ پنل در جذب بارهای انفجاری ضعیف‌تر شده و جابجایی صفحه پشتی با هسته دایره‌ای بیشتر از دو مورد دیگر ارزیابی شده است.

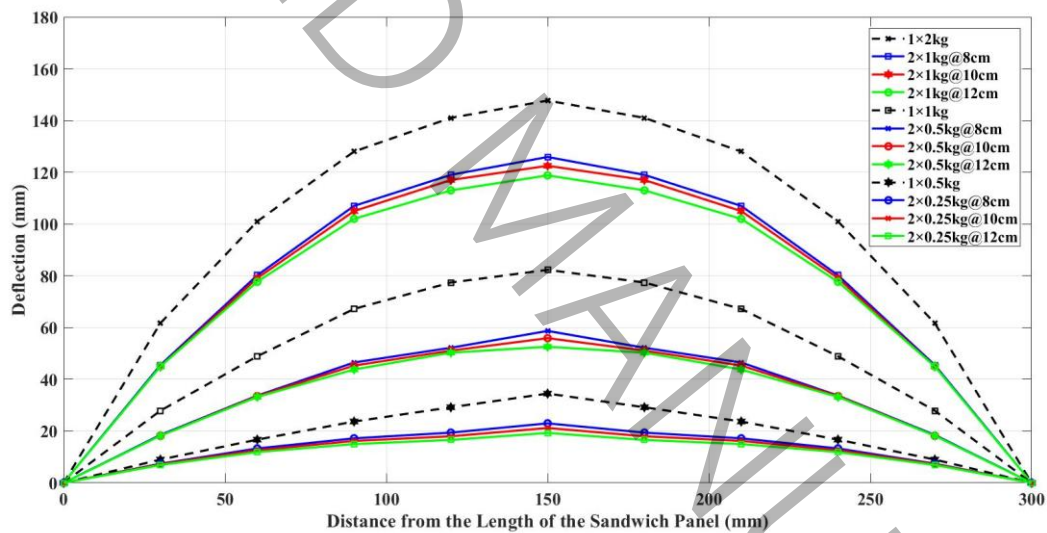
با توجه به این که در مسائل مربوط به بارگذاری انفجاری عملکرد صفحه جلویی بسیار حائز اهمیت است [۱۷]، برای تجزیه و تحلیل دقیق‌تر، در این مرحله میزان جابجایی صفحه جلویی در بارگذاری‌های انفجاری در طول ساندویچ پنل، برای ساختارهای سلولی مختلف ترسیم شده است. شکل‌های ۱۰ تا ۱۲، جابجایی را در نقاط مختلف سطح جلویی ساندویچ پنل نشان می‌دهد. علاوه بر این، تغییر شکل پلاستیک ساندویچ پنل‌ها نیز در شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۰: مقایسه جابجایی صفحه جلویی ساندویچ پنل با ساختار هسته مربعی تحت بارگذاری انفجار تک‌نقطه‌ای و متقارن هم‌زمان دونقطه‌ای
Fig. 10. Comparison of the deflection of the front face of a sandwich panel with a square core topology under single-point and simultaneous symmetrical impulsive loading

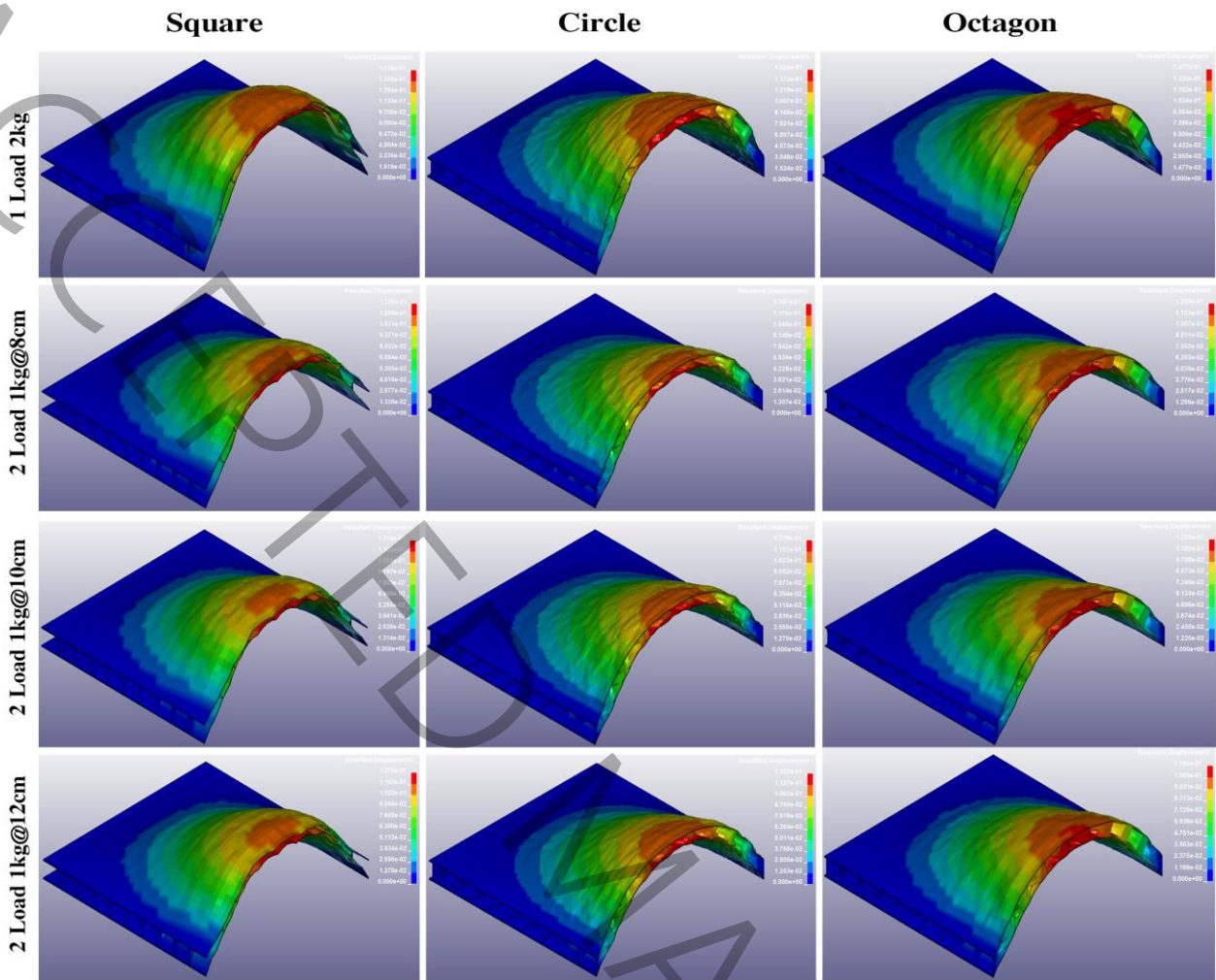


شکل ۱۱: مقایسه جابجایی صفحه جلویی ساندویچ پنل با ساختار هسته دایره‌ای تحت بارگذاری انفجار تک‌نقطه‌ای و متقارن هم‌زمان دونقطه‌ای
 Fig. 11. Comparison of the deflection of the front face of a sandwich panel with a circular core topology under single-point and simultaneous symmetrical impulsive loading

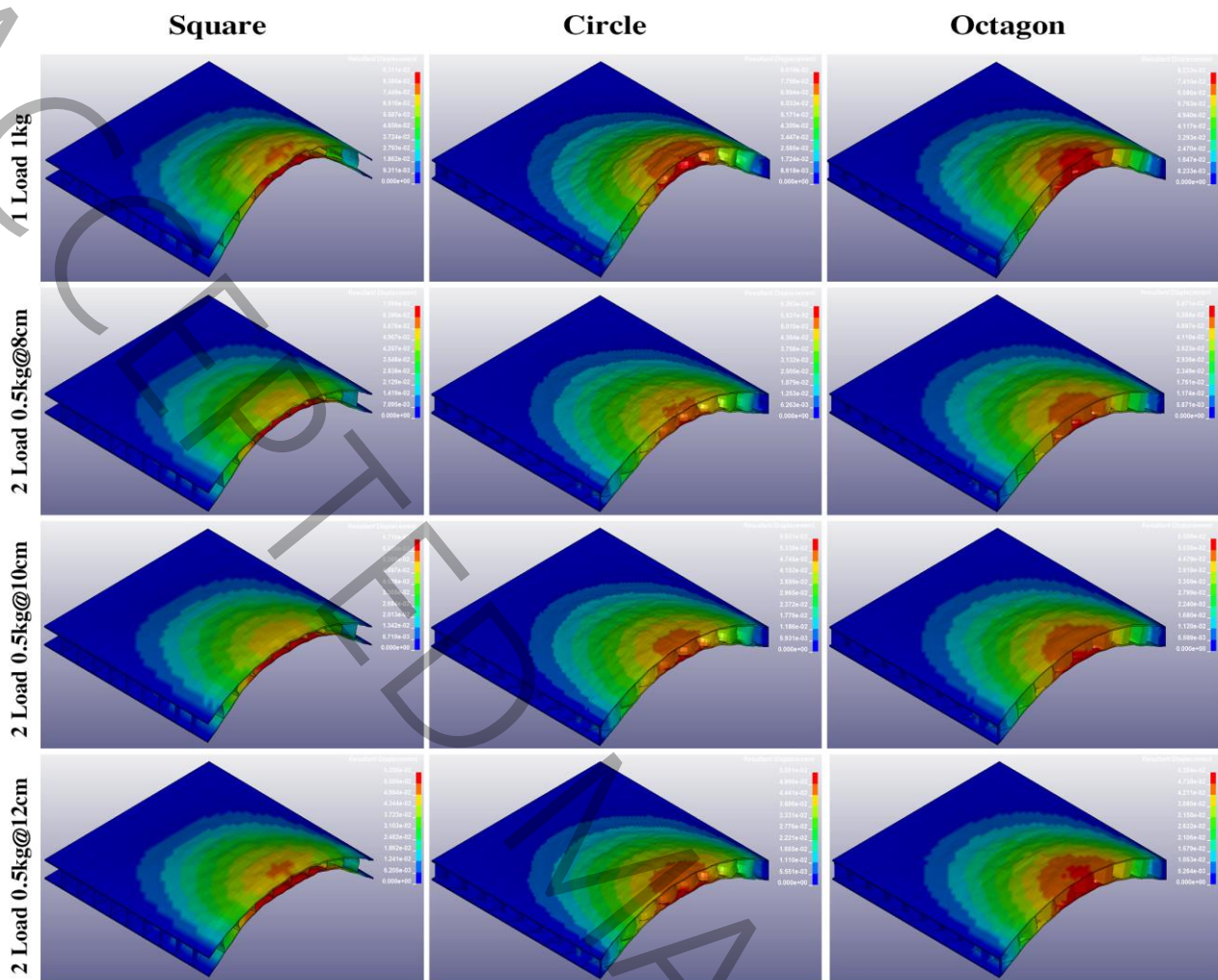


شکل ۱۲: مقایسه جابجایی صفحه جلویی ساندویچ پنل با ساختار هسته هشت‌ضلعی تحت بارگذاری انفجار تک‌نقطه‌ای و متقارن هم‌زمان دونقطه‌ای
 ای

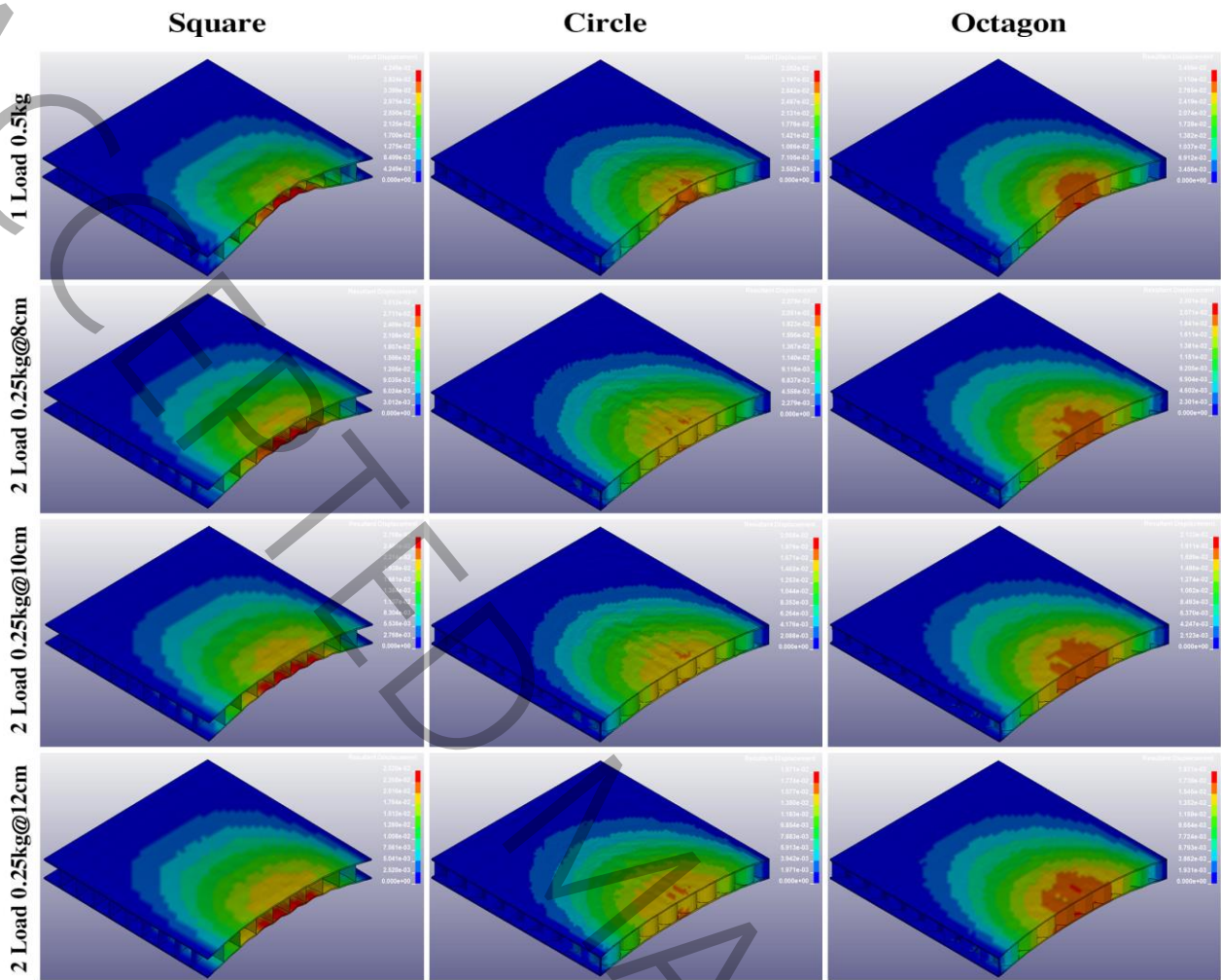
Fig. 12. Comparison of the deflection of the front face of a sandwich panel with an octagonal core topology under single-point and simultaneous symmetrical impulsive loading



شکل ۱۳: تغییر شکل پلاستیک ساندویچ پنل در بارگذاری تک نقطه‌ای و متقارن همزمان دونقطه‌ای با ۲ کیلوگرم ماده منفجره
 Fig. 13. Plastic deformation of sandwich panel under single-point and simultaneous symmetrical loading with 2 kg of impulsive charge



شکل ۱۴: تغییر شکل پلاستیک ساندویچ پنل در بارگذاری تک نقطه‌ای و متقارن هم‌زمان دونقطه‌ای با ۱ کیلوگرم ماده منفجره
 Fig. 14. Plastic deformation of sandwich panel under single-point and simultaneous symmetrical loading with 1 kg of impulsive charge



شکل ۱۵: تغییر شکل پلاستیک ساندویچ پنل در بارگذاری تک نقطه‌ای و متقارن هم‌زمان دونقطه‌ای با ۰/۵ کیلوگرم ماده منفجره

Fig. 15. Plastic deformation of sandwich panel under single-point and simultaneous symmetrical loading with 0.5 kg of impulsive charge

مطابق شکل‌های ۱۰ تا ۱۲، جابجایی در بارگذاری انفجاری دونقطه‌ای با وزن کمتر ماده منفجره، نزدیک به بارگذاری تک نقطه‌ای است. با افزایش وزن بارهای انفجاری، اختلاف جابجایی بین بارگذاری تک نقطه‌ای و دونقطه‌ای نیز افزایش می‌یابد. علاوه بر این، با افزایش فاصله بارهای انفجاری، نقطه حداکثر جابجایی کاهش می‌یابد و فاصله آن تا حداکثر جابجایی تک نقطه‌ای زیادتر می‌شود. برای یک ساندویچ پنل با ساختار سلولی هسته مربعی، جابجایی سطح جلویی در بارگذاری انفجاری تک نقطه‌ای ۲ کیلوگرمی، به ترتیب ۲۰/۸٪، ۲۳/۱٪ و ۲۶/۶٪ در مقایسه با بارگذاری ۱ کیلوگرمی در دو نقطه با فواصل ۸ سانتی‌متر، ۱۰ سانتی‌متر و ۱۲ سانتی‌متر بیشتر است. پارامتر مذکور برای ساندویچ پنل با ساختار هسته دایره‌ای ۱۶/۶٪، ۱۹/۱٪ و ۲۱/۶٪ و برای ساختار سلولی هسته هشت ضلعی ۱۷/۳٪، ۲۰/۵٪ و ۲۴/۳٪ افزایش یافته است. بنابراین در این حالت، ساختار سلولی دایره‌ای کمترین تغییرات را نسبت به دو ساختار سلولی دیگر از خود نشان داده است. جزئیات درصد تغییرات جابجایی برای صفحات جلو و عقب در بارگذاری‌های مذکور در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴: جزئیات درصد افزایش جابجایی بارگذاری تک نقطه‌ای نسبت به دونقطه‌ای

Table 4. Details of the percentage increase in deflection of single-point loading compared to two-point loading

میزان افزایش جابجایی با توجه به نوع ساختار سلولی هسته (%)						بارگذاری (kg)	مقدار d (mm)
هشت ضلعی		دایره		مربع			
صفحه عقبی	صفحه جلویی	صفحه عقبی	صفحه جلویی	صفحه عقبی	صفحه جلویی		
۲۳/۲	۱۷/۳	۲۲/۲	۱۶/۶	۲۳/۸	۲۰/۸	یک بار ۲ نسبت به دو بار ۱	۸
۵۱/۴	۴۰/۲	۵۱/۲	۳۷/۵	۴۳/۷	۳۱/۳	یک بار ۱ نسبت به دو بار ۰/۵	
۵۷	۵۰	۳۷/۵	۵۶/۳	۳۰	۴۱/۳	یک بار ۰/۵ نسبت به دو بار ۰/۲۵	
۲۷/۵	۲۰/۵	۲۵/۴	۱۹/۱	۲۷/۲	۲۳/۱	یک بار ۲ نسبت به دو بار ۱	۱۰
۵۳/۶	۴۷/۲	۵۴/۴	۴۵/۱	۴۵/۳	۳۸/۷	یک بار ۱ نسبت به دو بار ۰/۵	
۶۷/۵	۶۲/۷	۷۱/۴	۶۳/۵	۳۵/۶	۵۳/۶	یک بار ۰/۵ نسبت به دو بار ۰/۲۵	
۲۷/۷	۲۴/۳	۲۷/۶	۲۱/۶	۲۹/۶	۲۶/۶	یک بار ۲ نسبت به دو بار ۱	۱۲
۵۸/۷	۵۶/۴	۶۰/۴	۵۵/۱	۴۹	۵۰/۱	یک بار ۱ نسبت به دو بار ۰/۵	
۸۴	۷۸/۷	۹۷/۲	۸۰/۲	۴۵/۱	۶۹/۶	یک بار ۰/۵ نسبت به دو بار ۰/۲۵	

با توجه به شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ و بررسی تغییر شکل پلاستیک، ساندویچ پنل با ساختار سلولی هسته مربع ضعیف‌ترین عملکرد را در جذب بار نشان داده است که در بارگذاری با وزن بار انفجاری بالاتر به‌وضوح مشخص می‌شود. از طرفی ساندویچ پنل با ساختار هسته هشت ضلعی کمترین میزان جابجایی را داشته و بهترین عملکرد را از خود نشان داده است.

۴- جمع بندی

یکی از مهم‌ترین موارد بارگذاری روی سازه‌های مختلف مهندسی، بارگذاری ضربه‌ای است. در بسیاری از موارد، مواد منفجره ممکن است در چندین نقطه منفجر شده و اثرات آن به ساختار هدف منتقل شود. رفتار امواج انفجار در انفجارهای تک نقطه‌ای و دونقطه‌ای با یکدیگر متفاوت است. بنابراین، در این تحقیق، اثرات یک بار انفجاری تک نقطه‌ای و بارهای انفجاری متقارن هم‌زمان دونقطه‌ای روی ساندویچ پنل‌های لانه‌زنبوری با ساختارهای سلولی مختلف هسته، بررسی شده است. ساختارهای سلولی مورد بررسی شامل مربع، دایره و هشت ضلعی می‌باشند. در این تحقیق، ابتدا بارگذاری انفجاری تک نقطه‌ای روی ساندویچ پنل لانه زنبوری با ساختارهای سلولی ذکر شده، انجام شد. در مرحله بعد، بارهای انفجاری هم‌زمان دونقطه‌ای با فواصل ۸، ۱۰ و ۱۲ سانتی‌متر روی ساندویچ پنل اعمال شده و میزان تغییر شکل و جابجایی آن برآورد شده است. بررسی‌ها به‌صورت عددی با استفاده از نرم افزار المان محدود ال‌اس‌داینما انجام شده است. از مهم‌ترین نتایج این تحقیق می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- بارهای انفجاری تک نقطه‌ای در همه موارد تغییر شکل بزرگتری نسبت به بارگذاری دونقطه‌ای دارند.
 - ساندویچ پنل با ساختار سلولی هشت ضلعی بهترین عملکرد را در جذب بارهای انفجاری دارد.
 - ساندویچ پنل با هسته مربعی، ضعیف‌ترین عملکرد را در بارگذاری انفجاری تک نقطه‌ای و دونقطه‌ای نشان داده است.
 - با بررسی جابجایی صفحه عقبی مشخص شد که ساختار سلولی دایره‌ای در بارهای کوچک جذب بهتری دارد، اما با افزایش وزن بارهای انفجاری عملکرد آن ضعیف می‌شود.
 - در بارگذاری دونقطه‌ای با مقادیر وزنی کوچک بار انفجاری، تغییر فاصله بین بارها تأثیر چندانی بر میزان حداکثر جابجایی ندارد.
 - با افزایش فاصله بین بارهای دو نقطه‌ای، فاصله بین نقطه اوج جابجایی آن با نقطه مشابه در انفجار تک نقطه‌ای افزایش می‌یابد.
- بنابراین می‌توان گفت ساختار سلولی هشت ضلعی برای هسته ساندویچ پنل بهترین انتخاب برای حفاظت در برابر بارهای انفجاری است. لذا با توسعه استفاده از آن در هسته ساندویچ پنل، می‌توان سازه‌های مختلف را در برابر بارگذاری ضربه‌ای بهتر محافظت نمود.

- [1] K.P. Dharmasena, H.N. Wadley, Z. Xue, J.W. Hutchinson, Mechanical response of metallic honeycomb sandwich panel structures to high-intensity dynamic loading, *International Journal of Impact Engineering*, 35(9) (2008) 1063-1074.
- [2] R. Sawant, M. Patel, S. Patel, Numerical analysis of honeycomb sandwich panels under blast load, *Materials Today: Proceedings*, 87 (2023) 67-73.
- [3] T. Mirzababaie Mostofi, M. Rezasefat, M. Sayah Badkhor, H. Babaei, Effect of intense impulsive loading on performance of multi-layered plates, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 53(Issue 4 (Special Issue)) (2021) 2639-2670. (in Persian)
- [4] V. Birman, G.A. Kardomateas, Review of current trends in research and applications of sandwich structures, *Composites Part B: Engineering*, 142 (2018) 221-240.
- [5] F. Kiakojouri, H.R. Tavakoli, M.R. Sheidaii, V. De Biagi, Numerical analysis of all-steel sandwich panel with drilled I-core subjected to air blast scenarios, *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(5) (2022) 320.
- [6] H. Mohammadi Hooyeh, A. Naddaf Oskouei, T. Mirzababaie Mostofi, K. Vahedi, Experimental and Numerical Investigation of Trapezoidal Corrugated Core Sandwich Panels Under Oblique Blast Loading, *Aerospace Mechanics*, 19(2) (2023) 11-23. (in Persian)
- [7] Z. Wang, Recent advances in novel metallic honeycomb structure, *Composites Part B: Engineering*, 166 (2019) 731-741.
- [8] B.V. Ramnath, C. Elanchezhian, V. Manickavasagam, R.S. Narayanan, R. Sudharshan, G. Pugazhendhi, A review on sandwich composites and their advancements, *Materials Today: Proceedings*, 16 (2019) 1146-1151.
- [9] S.A. Ahmadi, A. Maleki, M.H. Pashaei, Three-Dimensional Elastic-Plastic Deformation Analysis of Composite Sandwich Panel under Blast Loading, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 52(5) (2019) 1079-1100. (in Persian)
- [10] R.M. Varghese, K.M. Varghese, Comparative study on the blast load response of woven and lattice core metallic sandwich panels, *Materials Today: Proceedings*, 65 (2022) 1343-1347.
- [11] M. Patel, S. Patel, Influence of honeycomb core height on the blast mitigation performance of sandwich panel, *Materials Today: Proceedings*, 74 (2023) 611-620.
- [12] J. Liu, Z. Wang, D. Hui, Blast resistance and parametric study of sandwich structure consisting of honeycomb core filled with circular metallic tubes, *Composites Part B: Engineering*, 145 (2018) 261-269.
- [13] X. Li, Z. Wang, F. Zhu, G. Wu, L. Zhao, Response of aluminium corrugated sandwich panels under air blast loadings: experiment and numerical simulation, *International Journal of Impact Engineering*, 65 (2014) 79-88.
- [14] N. Khaire, M. Gupta, G. Tiwari, Blast resistance of graded aluminium foam core sandwich structure against blast loading, *Materials Today: Proceedings*, 87 (2023) 159-163.
- [15] S.K. Sahu, P.R. Sreekanth, Experimental investigation of in-plane compressive and damping behavior anisotropic graded honeycomb structure, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(12) (2022) 15741-15753.
- [16] G.S. Langdon, C.J. von Klemperer, G.M. Sinclair, Blast response of sandwich structures: The influence of curvature, in: *Dynamic Deformation, Damage and Fracture in Composite Materials and Structures*, Elsevier, 2023, pp. 337-359.
- [17] H. Andami, H. Toopchi-Nezhad, Performance assessment of rigid polyurethane foam core sandwich panels under blast loading, *International Journal of Protective Structures*, 11(1) (2020) 109-130.
- [18] M. Rai, A. Chawla, S. Mukherjee, Parametric study of re-entrant honeycomb cored auxetic sandwich panel exposed to blast loading, *Materials Today: Proceedings*, 87 (2023) 197-203.

- [19] R.P. Bohara, S. Linforth, A. Ghazlan, T. Nguyen, A. Remennikov, T. Ngo, Performance of an auxetic honeycomb-core sandwich panel under close-in and far-field detonations of high explosive, *Composite Structures*, 280 (2022) 114907.
- [20] N. Ghate, M.D. Goel, Influence of core topology on blast mitigation application of multi-layered honeycomb core sandwich panel, *Materials Today Communications*, 36 (2023) 106531.
- [21] M. Patel, S. Patel, Effect of honeycomb cell size on the air-blast performance of sandwich panels, *Materials Today: Proceedings*, 78 (2023) 792-797.
- [22] D. Hyde, CONWEP: Conventional Weapons Effects Program, US Army Engineer Waterways Experiment Station, in USA, (1991).
- [23] ASCE, American Society of Civil Engineers(ed.), ASCE standard, Reston, Structural Engineering Institute, (2011).
- [24] V. Karlos, G. Solomos, Calculation of blast loads for application to structural components, *Blast Simulation Technology Development*, EUR 26456, Luxembourg: Publications Office of the European Union, JRC87200, (2013).
- [25] R. Gilsanz, R. Hamburger, D. Barker, J.L. Smith, A. Rahimian, *Steel design guide 26: Design of blast resistant structures*, American Institute of Steel Construction. (2013).
- [26] UFC, 3-340-02, Structures to resist the effects of accidental explosions. Department of Defense, USA. in, (2008).
- [27] A. Zaghoul, A. Remennikov, B. Uy, Enhancement of blast wave parameters due to shock focusing from multiple simultaneously detonated charges, *International Journal of Protective Structures*, 12(4) (2021) 541-576.
- [28] N.W. Mohottige, C. Wu, H. Hao, Characteristics of free air blast loading due to simultaneously detonated multiple charges, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 14(04) (2014) 1450002.
- [29] F. Bai, Y. Liu, J. Yan, Y. Xu, Z. Shi, F. Huang, Study on the characteristics of blast loads due to two simultaneous detonated charges in real air, *International Journal of Non-1304 Linear Mechanics*, 146(104108) (2022) 1305.
- [30] M. Patel, S. Patel, Novel design of honeycomb hybrid sandwich structures under air-blast, *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 24(8) (2022) 2105-2123.
- [31] B. Gaur, M. Patel, S. Patel, Strain rate effect on CRALL under high-velocity impact by different projectiles, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 45(2) (2023) 103.
- [32] M. Patel, S. Patel, S. Ahmad, Blast analysis of efficient honeycomb sandwich structures with CFRP/Steel FML skins, *International Journal of Impact Engineering*, 178 (2023) 104609.
- [33] M. Murugesan, D.W. Jung, Johnson Cook material and failure model parameters estimation of AISI-1045 medium carbon steel for metal forming applications, *Materials*, 12(4) (2019) 609.
- [34] Y. Li, X. Ren, T. Zhao, D. Xiao, K. Liu, D. Fang, Dynamic response of stiffened plate under internal blast: Experimental and numerical investigation, *Marine Structures*, 77 (2021) 102957.
- [35] M. Haghgoo, H. Babaei, T. Mirzababaie Mostofi, Numerical Simulation of Triangular Plate Deformation Profile Under Gaseous Detonation Loading, *Aerospace Mechanics*, 19(1) (2023) 1-15. (in Persian)
- [36] H. Bakhshan, E. Oñate, J.M. Carbonell i Puigbó, A Review of the Constitutive Modelling of Metals and Alloys in Machining Process, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 31(3) (2024) 1611-1658.
- [37] G. Geng, D. Ding, L. Duan, H. Jiang, A modified Johnson-Cook model of 6061-T6 Aluminium profile, *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 20(2) (2022) 516-526.
- [38] S. Patel, M. Patel, The efficient design of hybrid and metallic sandwich structures under air blast loading, *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 24(3) (2022) 1706-1725.

Investigating the effects of simultaneous symmetrical impulsive loading on honeycomb sandwich panels with different core topologies

Mehdi Niajalili, Majid Alitavoli, Reza Ansari*, Mojtaba Haghgoo

Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

ABSTRACT

In the design of structures, it is important that they have the ability to withstand loads. Sandwich panels have received attention due to their lightweight and good absorption. In this research, honeycomb sandwich panels with different core topologies were subjected to simultaneous impulsive loading and the effect of the amount of loads and the distance between charges on the deformation was evaluated. Due to the high cost of conducting the experimental test, the finite element software has been employed. After validating with the experimental data, the values of 0.5, 1 and 2 kg of selected charge in single and two-point loading at the sandwich panels with square, circular and octagonal core topologies have been affected and the deformation of sandwich panels has been evaluated. In order to investigate the effect of the distance of charges from each other on the deformation, these are placed at 8, 10 and 12 cm from each other. Then, the amount of deflection of sandwich panels with single-point loading has been compared. According to the investigations, the best topology for absorbing loads is octagonal, so that it has less displacement in single and two-point loading in the best case of 14.1 and 12.2 mm, respectively.

KEYWORDS

Deflection, core topologies, finite element software, sandwich panel, simultaneous impulsive loading.

* Corresponding Author: Email: r_ansari@guilan.ac.ir