



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 it has less displacement in single and two-point loading in the best case of 14.1 and 12.2 mm, respectively.

Review History:

Received: Oct. 05, 2024

Revised: Jan. 15, 2025

Accepted: Jan. 16, 2025

Available Online: Jan. 26, 2025

Keywords:

Deflection

Core Topologies

Finite Element Software

Sandwich Panel

Simultaneous Impulsive Loading

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

*Corresponding author's email: r_ansari@guilan.ac.ir



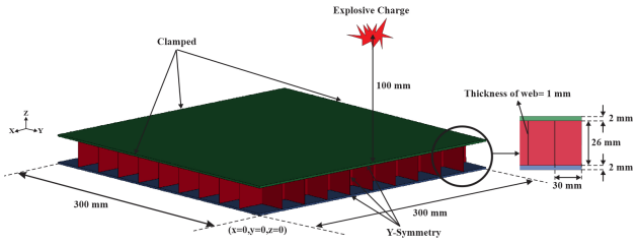


Fig. 1. Characteristics of the SP simulated in the present study with single-point impulsive loads

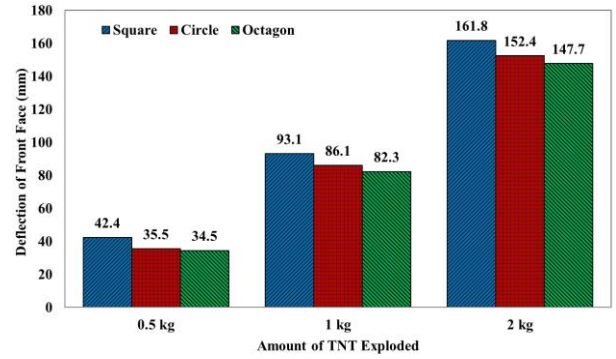


Fig. 3. Maximum deflection of the front face of the SP in single-point impulsive loads

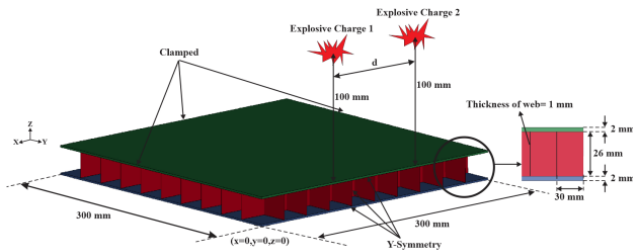


Fig. 2. Characteristics of the SP simulated in the present study with two-point simultaneous impulsive loads

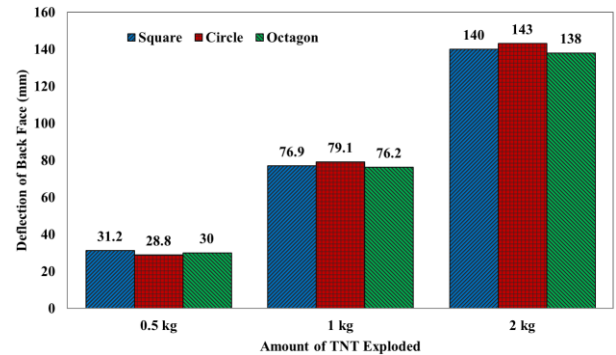


Fig. 4. Maximum displacement of the back face of the SP in single-point impulsive loads

core topology.

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.

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.

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 topologies have been investigated. The core topologies

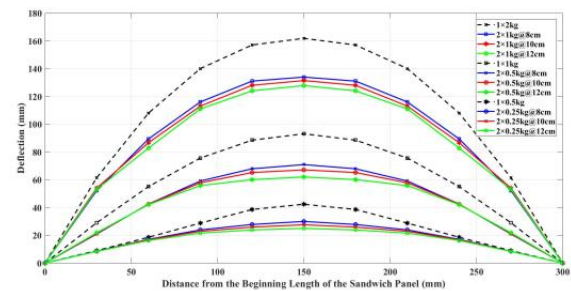


Fig. 5. Comparison of the deflection of the front face of a SP with a square core topology

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

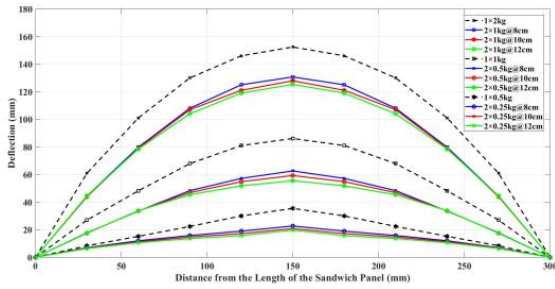


Fig. 6. Comparison of the deflection of the front face of the SP with a circular core topology

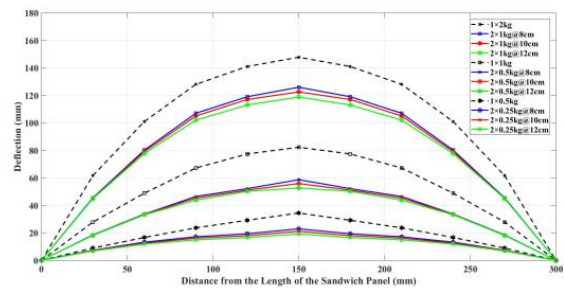


Fig. 7. Comparison of the deflection of the front face of the SP with an octagonal core topology

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.

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. Mirzababaei 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. Kiakojoori, 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 علی طاوولی، رضا انصاری خلخالی^{*}، مجتبی حقگو چروده

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۴
بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۲۶
پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۷
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۱۱/۰۷

کلمات کلیدی:

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

خلاصه: در طراحی سازه‌های مختلف، مهم است 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 این که ضربه ناشی از انفجار می‌تواند بر سلامت انسان تأثیر بگذارد، بررسی رفتار ساندویچ پنل‌ها تحت این بارگذاری مهم است. در این تحقیق، ساندویچ پنل‌های لانه زنبوری 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 ال‌اس‌داینا استفاده شد. پس از طراحی و اعتبارسنجی با داده‌های تجربی موجود در ادبیات، مقادیر $0.5/1$ و $0.5/2$ کیلوگرم تی‌ان‌تی در یک و دونقطه $0.5/2$ ، $0.5/5$ و $1/2$ 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 $1/14$ و $2/12$ میلی‌متر، جابجایی کمتر داشته است.

۱- مقدمه

ارتعاش و غیره در زمینه‌های مختلف مهندسی بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۷-۹]. ساندویچ پنل‌ها 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 ساندویچ پنل‌ها 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 ساندویچ پنل‌ها برای مکان‌هایی که کاهش جرم از اهمیت بالایی برخوردار است، پرکاربرد هستند [۱۶]. قسمت‌های اصلی ساندویچ پنل 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 ال‌اس‌داینا^۱ و آباکوس^۲

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 ساندویچ پنل‌ها را افزایش داده است [۴]. ساندویچ پنل‌ها 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 ساندویچ پنل به دلایلی مانند استحکام عالی، جذب بهینه انرژی، جذب

1 LS-DYNA
2 ABAQUS

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: r_ansari@guilan.ac.ir

ورقه [۱۰] انجام شده است. این محققان با بیان این که همه مدل‌ها تحت بارگذاری انفجاری با فاصله مقیاس شده یکسان قرار گرفته‌اند، پنل ساندویچی با هسته هرمی را نسبت به هسته مثلثی 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 هر کدام 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) مقاومت 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 ساندویچ پنل 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^۲ 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

را در تجزیه و تحلیل مسائل مربوط به انفجارها قابل اعتماد دانسته‌اند [۲، ۱۸، ۱۹]. ساوانت و همکاران [۲] تجزیه و تحلیل عددی یک ساندویچ پنل 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 ساندویچ پنل‌های 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 ساندویچ پنل را بررسی کرده و در نهایت اعلام کردند که ساندویچ پنل‌ها 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 ساندویچ پنل 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 ساندویچ پنل 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 آگزتیک نسبت پواسون منفی داشته و می‌تواند مقاومت بیشتری در برابر بارگذاری ایجاد کند و لذا استفاده از یک ساندویچ پنل با ساختار سلولی آگزتیک در هسته، حداکثر مقاومت را در نقطه بارگذاری ایجاد می‌کند. آن‌ها تحلیل خود را با استفاده از نرم افزار المان‌داینا و با رویکرد ال‌بی‌ای^۱ انجام دادند و سعی کردند با تغییر پارامترهای ضخامت صفحه هسته، تعداد لایه‌ها و جرم بار، بهترین طراحی ساندویچ پنل تحت بارگذاری انفجاری را به‌دست آورند. این محققان در نهایت اعلام کردند که ساندویچ پنل لانه زنبوری با ساختار سلولی آگزتیک، 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 تاثیر بارگذاری انفجاری عادی و مکرر بر جابجایی پنل ساندویچی با هسته هرمی و مثلثی نیز توسط ریا ماری ورقسه و روپا ماری

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 می شود [۲۶]. پس از گذشت زمان t_a از انفجار، فشار به هدف می رسد و فشار در هدف بلافاصله به P_p افزایش می یابد. بنابراین t_a و P_p را به ترتیب زمان رسیدن و پیک فشار می نامند. مطابق شکل ۱، زمان پس از انفجار به دو بخش فاز مثبت و فاز منفی به شرح زیر تقسیم می شود:

$$t_p = t_b - t_a \quad (۱)$$

$$t_N = t_c - t_b \quad (۲)$$

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 می دهند. در طول زمان t_p ، فشار در هدف به فشار محیط (P_o) باز می گردد و سپس برای مدت زمان t_N تحت یک فاز مکش با فشار منفی P_N قرار می گیرد که مدت زمان فاز فشار منفی بیشتر از فاز فشار مثبت است.

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

$$P(t) = (P_p - P_o) \left[1 - \frac{t - t_a}{t_p} \right] e^{-\frac{t - t_a}{\gamma}} \quad (۳)$$

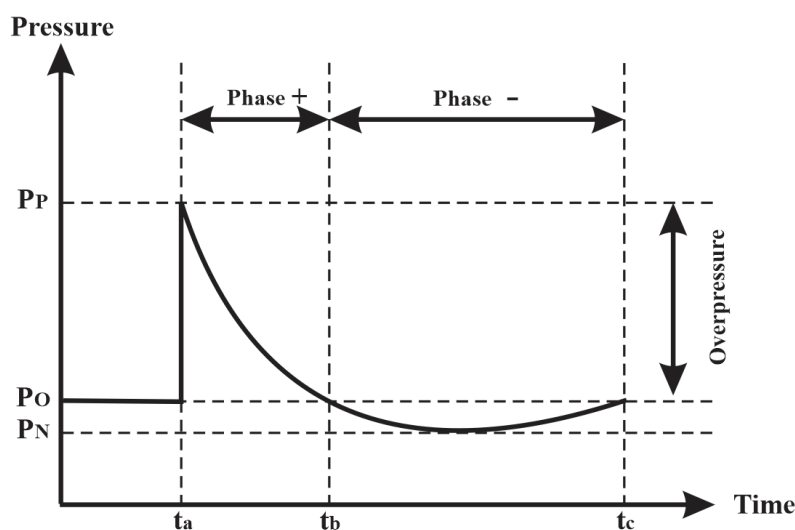
که در این رابطه γ ثابت اتلاف زمان می باشد.

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 مدل های مورد بررسی،

یافته است. بنابراین، انجمن های مهندسی با توجه به تأثیر انفجار بر سازه های مختلف، دستورالعمل هایی را پیرامون طراحی سازه برای مقاومت در برابر انفجار صادر کرده اند [۲۳-۲۵]. اکثر این راهنماها، انفجارهای ناشی از چندین منبع انفجار را به دلیل پیچیدگی رفتار موج انفجار در طول بازتاب های متعدد در نظر نمی گیرند. این در حالی است که در دستورالعمل یوآسی [۲۶] نیز اثرات بارهای انفجاری هم زمان کمتر مورد بحث قرار داده شده است، زیرا داده های نظری و تجربی محدودی در دسترس است. هنگامی که انفجارهای متعدد رخ می دهد، امواج انفجار در فواصل طولانی با هم ادغام می شوند و رابطه فشار-زمان به گونه ای عمل می کند که گویی یک ماده منفجره واحد است [۲۷].

زغلول و همکاران [۲۷] تأثیر پارامترهای موج انفجار بر یکدیگر را در انفجار هم زمان مورد بررسی قرار داده اند. آن ها اظهار داشتند که این نوع انفجار در مسائل مربوط به تخریب بسیار مفید است. علاوه بر این، هنگامی که بارهای انفجاری به طور هم زمان منفجر می شوند، فشار و مقادیر ضربه ای متفاوتی را در مقایسه با یک بار منفرد معادل به وجود می آورند. در نهایت، این محققان روش های تقریبی را برای محاسبه پارامترهای موج انفجار از چندین بار کروی منفجر شده به طور هم زمان، 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 هم زمان دو و سه بار انفجاری پژوهش کرده اند. آن ها دریافتند که اثر انفجارهای هم زمان، زمانی تشدید می شود که بارهای انفجاری به هم نزدیک شوند. لذا فاصله بین بارهای انفجاری می تواند تأثیر مستقیم روی حداکثر فشار ایجاد شده داشته باشد. لذا اثرات انفجاری بارگذاری هم زمان دونقطه ای، با توجه به فاصله مقدار بارگذاری ممکن است کمتر یا بیشتر از بار انفجاری معادل تک نقطه ای باشد [۲۷، ۲۹]. در این پژوهش، ساندویچ پنل لانه زنبوری با ساختارهای سلولی هسته مربعی، دایره ای و هشت ضلعی در نرم افزار ال اس داینا طراحی شده و تحت بارهای انفجاری متقارن هم زمان تک نقطه ای و دونقطه ای قرار گرفته است. در مرحله بعد تأثیر تغییر وزن بار انفجاری بر جابجایی ساندویچ پنل، در شرایط مذکور مورد ارزیابی قرار گرفته است. در نهایت، در حالت انفجار دونقطه ای، فاصله بین بارهای انفجاری تغییر داده شده و تأثیر آن بر جابجایی ساندویچ پنل مورد ارزیابی قرار گرفته و مقایسه دقیقی بین بارگذاری تک نقطه ای و دونقطه ای انجام شده است.



شکل ۱. مشخصات موج ضربه حاصل از انفجار

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

دمای مرجع هستند. مدل ماده جانسون-کوک دارای سه بخش مهم است؛ سخت شدن کرنشی، سخت شدن نرخ کرنشی و اثر نرم شدن حرارتی [۳۶]. در این تحقیق به دلیل این که 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، ال‌اس‌داین‌ا 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 ال‌اس‌داین‌ا، 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^۱) در نرم افزار ال‌اس‌داین‌ا ارائه شده است. جدول ۱ پارامترهای مدل ماده جانسون-کوک را برای فولاد ضد زنگ نشان می‌دهد.

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]:

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

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

1 MAT_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK

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	$\epsilon_0(\text{s}^{-1})$

۲-۳- مدل سازی هندسی

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 \times ۶۰۰ میلی‌متر \times 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 \times ۳۰۰ میلی‌متر \times ۳۰ میلی‌متر مطابق شکل‌های 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 ۵ میلی‌متری و هسته با المان پوسته ۵ میلی‌متری شبکه‌بندی شده‌اند. اندازه شبکه‌های المان‌های هسته، صفحات بالایی و پایینی بعد انجام بررسی حساسیت مش

1 Solid

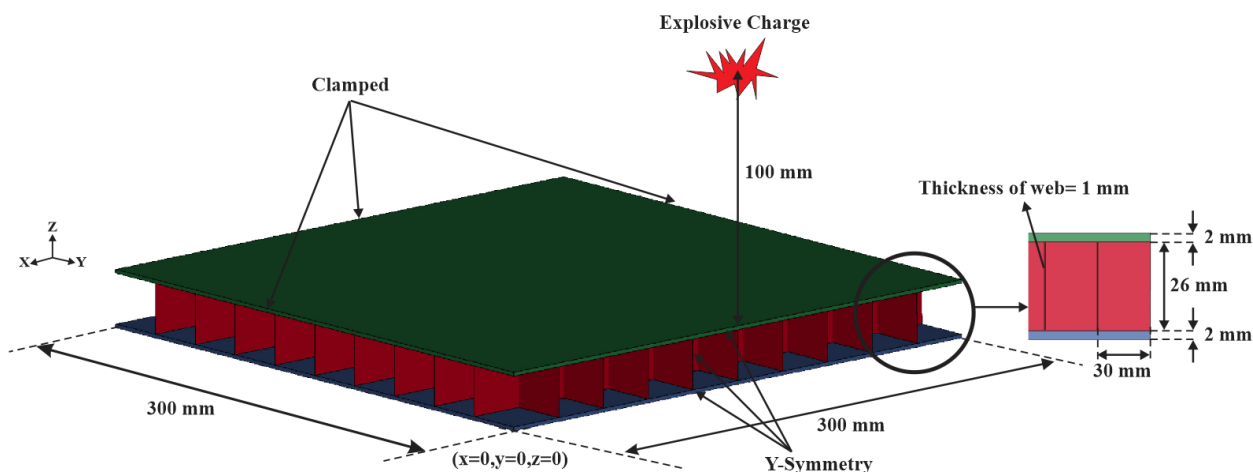
انتخاب شده است. از الگوریتم تماس خودکار گره‌ها به سطح^۲، بین اولین و آخرین لایه هسته با صفحات جلو و عقب استفاده شده است. زمان پایان محاسبات ۰/۰۱ ثانیه و پارامتر ضریب مقیاس برای گام زمانی محاسبات^۳ نیز ۰/۶۷ در نظر گرفته شده است. برای بررسی دقیق تغییر شکل نیز، برای پارامتر فاصله زمانی بین خروجی‌ها^۴ در خروجی پایگاه داده^۵، مقدار ۰/۱ میلی‌ثانیه لحاظ شده است.

مقادیر بارهای انفجاری برای مدل انفجاری تک‌نقطه‌ای ۰/۵، ۱ و ۲ کیلوگرم است. برای مدل انفجار دونقطه‌ای ۲۵/۲ \times ۲ کیلوگرم، ۵/۲۰ \times ۲ کیلوگرم و ۱ \times ۲ کیلوگرم در نظر گرفته شده است. مطابق شکل ۶ در حالت انفجار دونقطه‌ای، 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.

۲-۴- راستی آزمایی

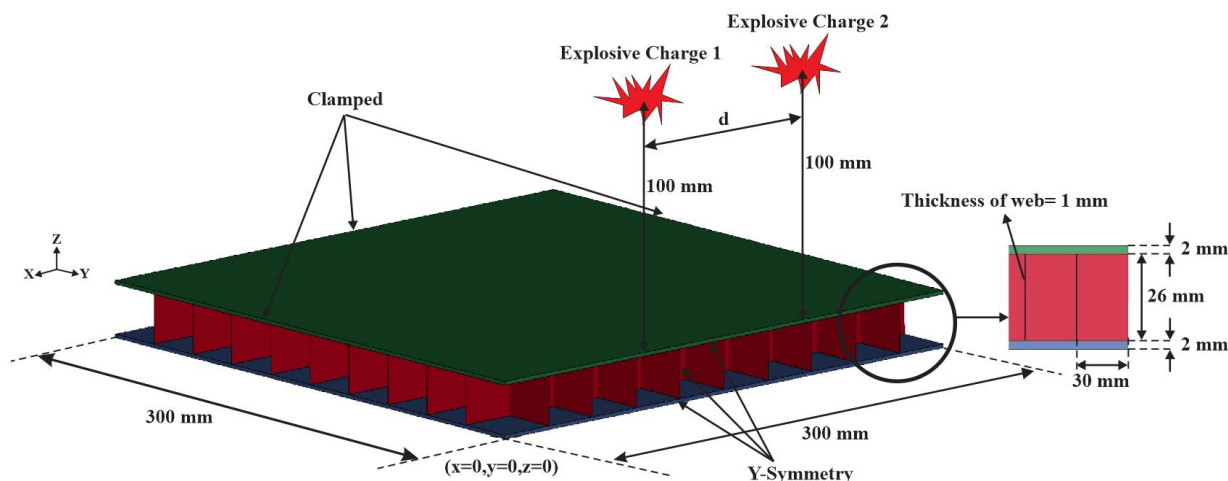
به منظور اعتبارسنجی، از پارامترهای تحقیق تجربی دارماسنا و همکاران [۱] استفاده شده است. این محققان از یک ساندویچ پنل به ابعاد ۶/۱ \times ۶۱ \times ۶۱ سانتی‌متر مکعب استفاده کردند که ماده منفجره در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از مرکز آن قرار گرفته است. هسته این ساندویچ پنل دارای

- 2 AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE
- 3 TSSFAC
- 4 DT
- 5 DATABASE-BINARY_D3PLOT



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



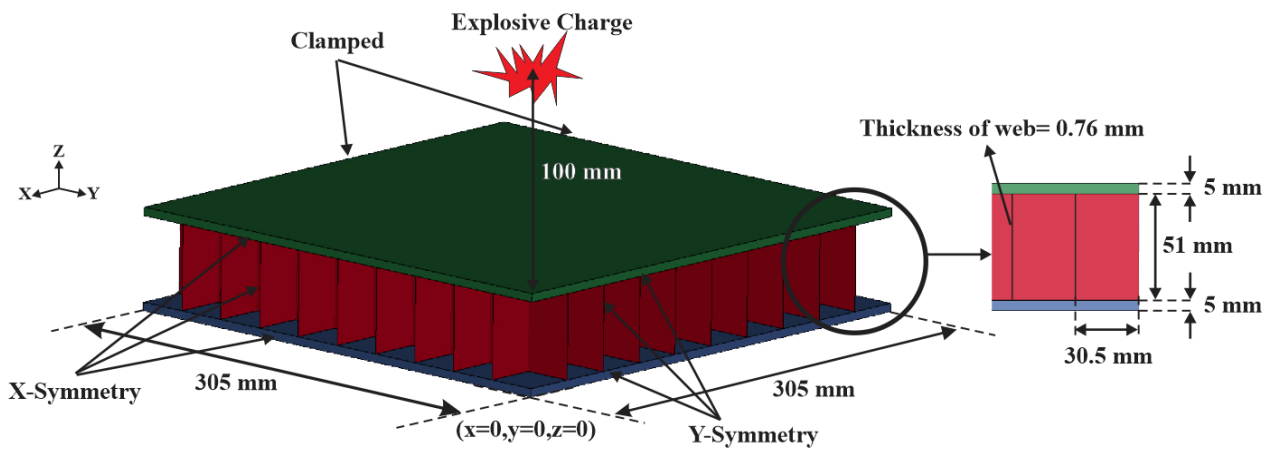
شکل ۳. مشخصات ساندویچ پنل شبیه‌سازی شده در تحقیق حاضر با دو بار انفجاری متقارن هم‌زمان

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

۴، ابعاد صفحات جلو و عقب در مدل هندسی یک چهارم، ۳۰۵ میلی‌متر × ۳۰۵ میلی‌متر × ۵ میلی‌متر است. ابعاد هرکدام از سلول‌های هسته نیز ۳۰/۵ میلی‌متر × ۳۰/۵ میلی‌متر × ۵۱ میلی‌متر است. سازه و نوع شبکه‌بندی المان صفحات جلویی، عقبی و هسته و همچنین الگوریتم تماس میان آن‌ها مطابق مدل هندسی طراحی شده در قسمت ۲-۳ 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.

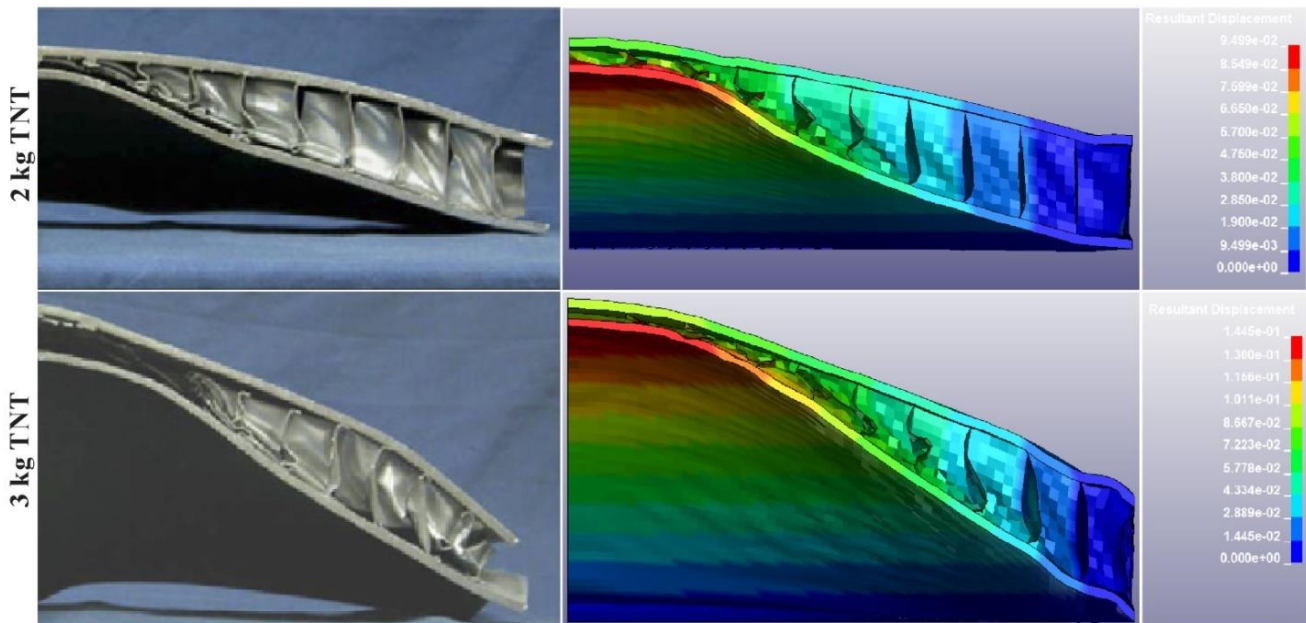
ساختار سلولی مربع است. ضخامت صفحه جلو و عقب ۵ میلی‌متر و ارتفاع هسته ۵۱ میلی‌متر است. برای کاهش زمان محاسبه از مدل هندسی یک چهارم در طراحی آن، استفاده شده است. شکل ۴ نمای یک چهارم ساندویچ پنل دارماسنا و همکاران [۱] را همراه شرایط مرزی و جزئیات دیگر نشان می‌دهد.

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



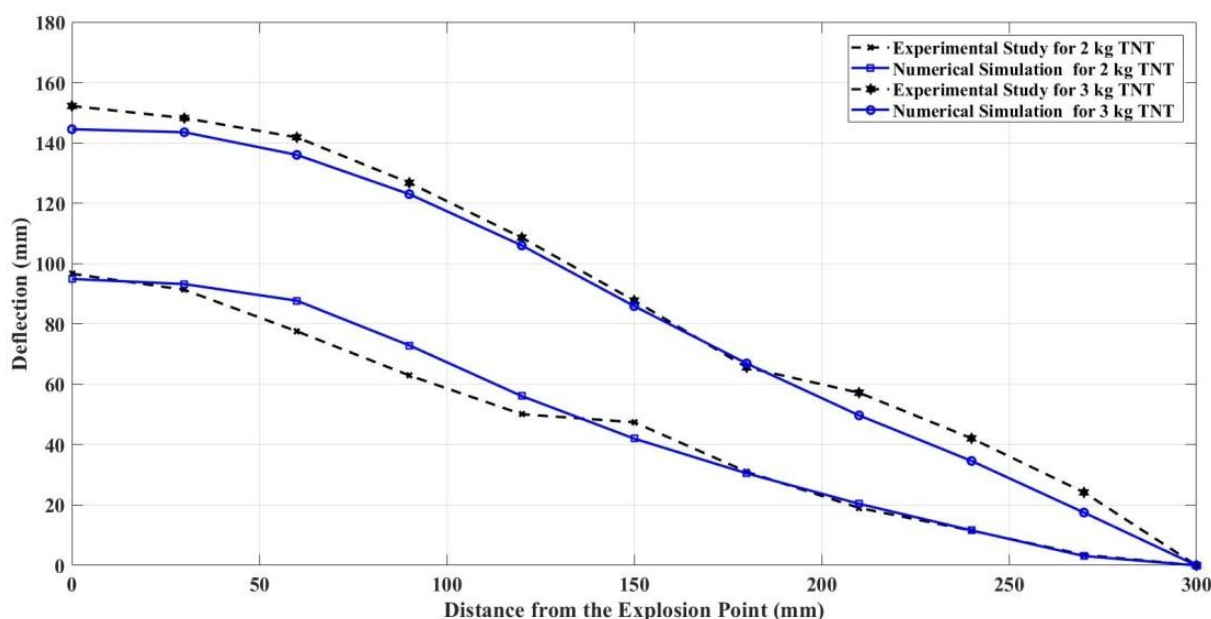
شکل ۴. شبیه‌سازی مدل دارماسنا و همکاران [۱] در نرم افزار LS-DYNA

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



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

سطح مقطع هر سلول ساندویچ پنل 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.

۳- نتایج و بحث

در مرحله اول، مطابق شکل ۵، اعمال بارهای تک‌نقطه‌ای روی ساندویچ پنل با ساختارهای سلولی هسته مربعی، دایره‌ای و هشت‌ضلعی انجام شده است. پس از انفجار بارهای ۱/۵، 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 تک‌نقطه‌ای با بارهای ذکر شده را نشان می‌دهد.

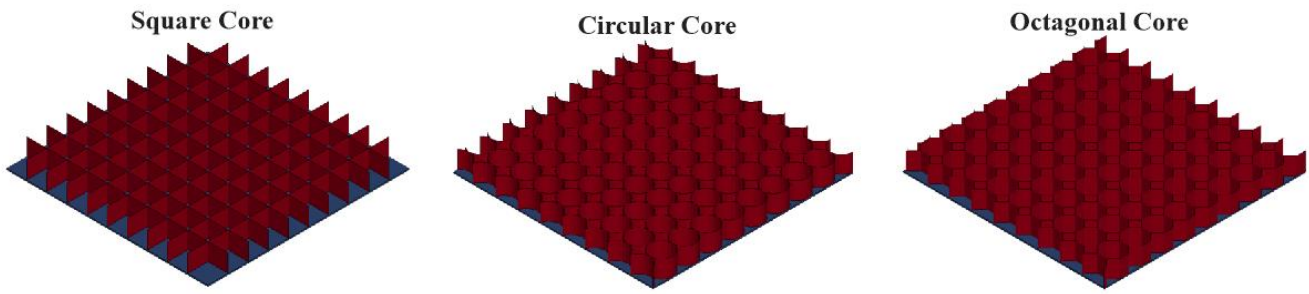
این نکته در اینجا حائز اهمیت است که در برخی مراجع [۲]، صرف نظر از مساحت سلول‌های هسته، تنها تعداد سلول‌ها در راستاهای X و Y

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.

۲-۵- 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 ساندویچ پنل توسط نرم افزار ال‌اس‌داینرا را نشان می‌دهد.

همان‌طور که گفته شد طول، عرض و ارتفاع ساندویچ پنل 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.



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

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

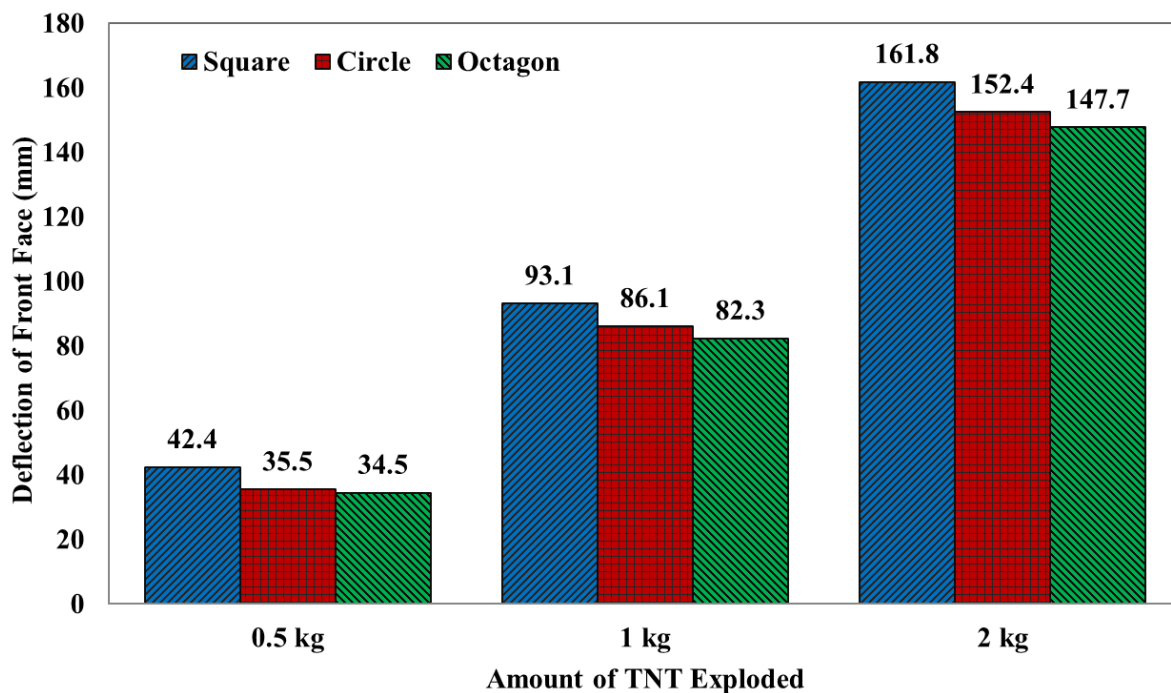
جدول ۲. ابعاد سلول شبیه‌سازی شده برای هسته ساندویچ‌پنل

Table 2. Simulated cell dimensions for sandwich panel core

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

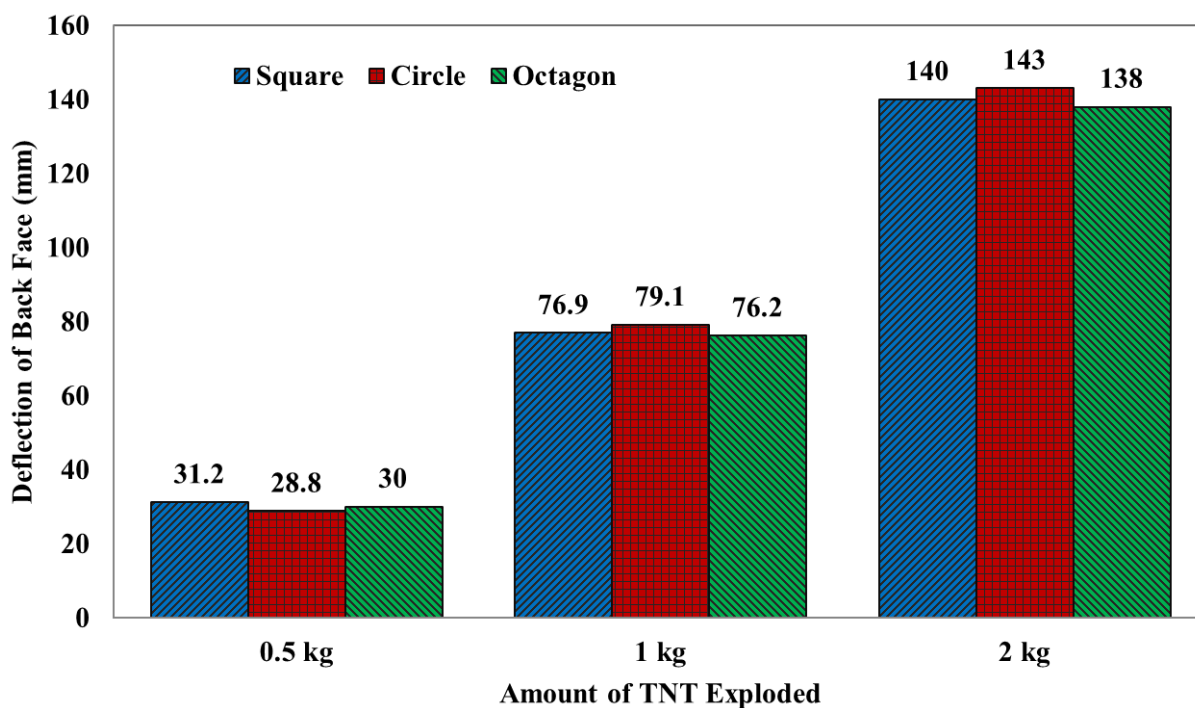
ساختار هشت‌ضلعی بهترین عملکرد را به دلیل حداقل جابجایی صفحه جلو و عقب از خود نشان داده است. جابجایی صفحه جلویی با ساختار سلولی هسته هشت‌ضلعی، به ترتیب ۱۸/۶، ۱۱/۶ و ۸/۷ درصد در اثر بارهای ۰/۵، ۱ و ۲ کیلوگرم نسبت به ساختار سلولی مربعی کاهش یافته است. در مرحله بعد، بارگذاری هم‌زمان مواد منفجره متقارن دو 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 ساندویچ‌پنل با ساختارهای سلولی هسته مربعی، دایره‌ای و هشت‌ضلعی را نشان می‌دهد.

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،



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

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

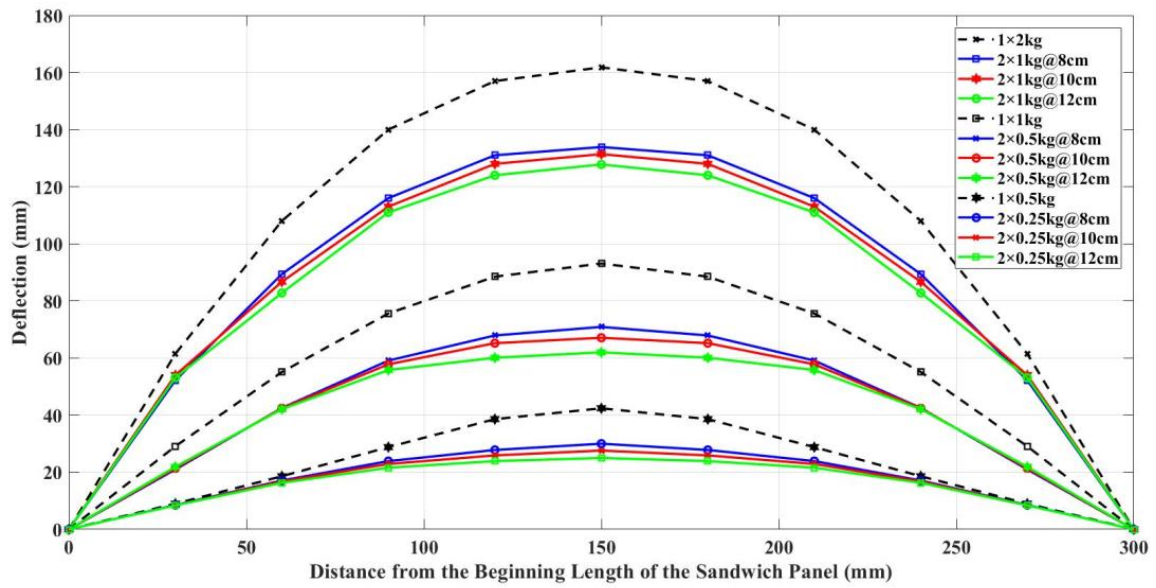
Table 3. Maximum deflection of the front and back faces of the sandwich panel under two-point impulsive loading

حداکثر جابجایی با توجه به نوع ساختار سلولی هسته (mm)						مقدار d (mm)	بارگذاری (kg)
هشت‌ضلعی		دایره		مربع			
صفحه عقبی	صفحه جلویی	صفحه عقبی	صفحه جلویی	صفحه عقبی	صفحه جلویی		
۱۱۲	۱۲۵/۹	۱۱۷	۱۳۰/۷	۱۱۳	۱۳۳/۹	دو بار ۱	۸
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	۱۰
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	۱۲
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	

۱۳ تا ۱۵ نشان داده شده است.

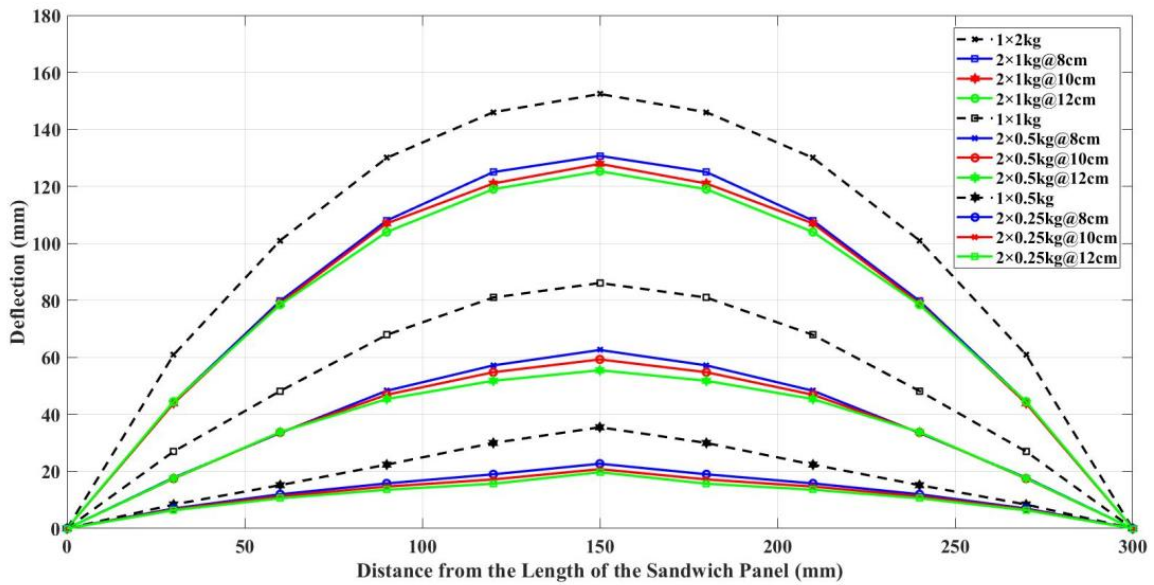
مطابق شکل‌های ۱۰ تا ۱۲، جابجایی در بارگذاری انفجاری دونقطه‌ای با وزن کمتر ماده منفجره، نزدیک به بارگذاری تک‌نقطه‌ای است. با افزایش وزن بارهای انفجاری، اختلاف جابجایی بین بارگذاری تک‌نقطه‌ای و دونقطه‌ای نیز افزایش می‌یابد. علاوه بر این، با افزایش فاصله بارهای انفجاری، نقطه حداکثر جابجایی کاهش می‌یابد و فاصله آن تا حداکثر جابجایی تک‌نقطه‌ای زیادتر می‌شود. برای یک ساندویچ پنل با ساختار سلولی هسته مربعی، جابجایی سطح جلویی در بارگذاری انفجاری تک‌نقطه‌ای 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 هشت‌ضلعی 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

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



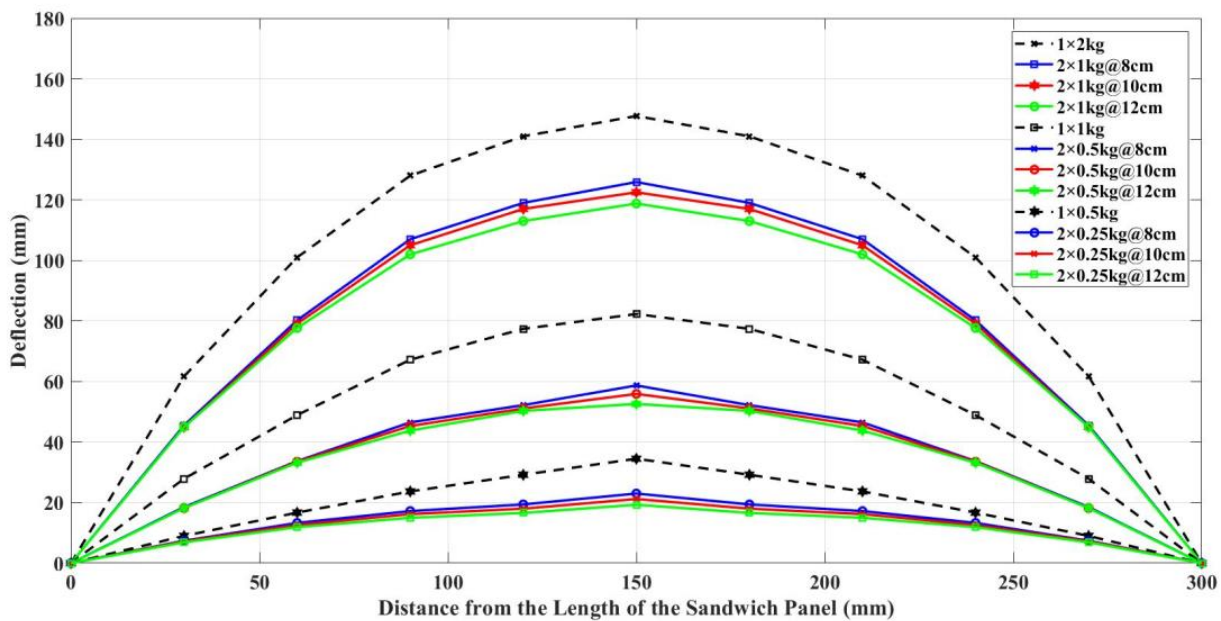
شکل ۱۰. مقایسه جابجایی صفحه جلویی ساندویچ پنل با ساختار هسته مربعی تحت بارگذاری انفجار تک نقطه‌ای و متقارن همزمان دونقطه‌ای

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 تک نقطه‌ای 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 هشت ضلعی تحت بارگذاری انفجار تک نقطه‌ای و متقارن هم‌زمان دونقطه‌ای

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

مقارن 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 به صورت عددی با استفاده از نرم افزار المان محدود ال‌اس داین انجام شده است. از مهم‌ترین نتایج این تحقیق می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

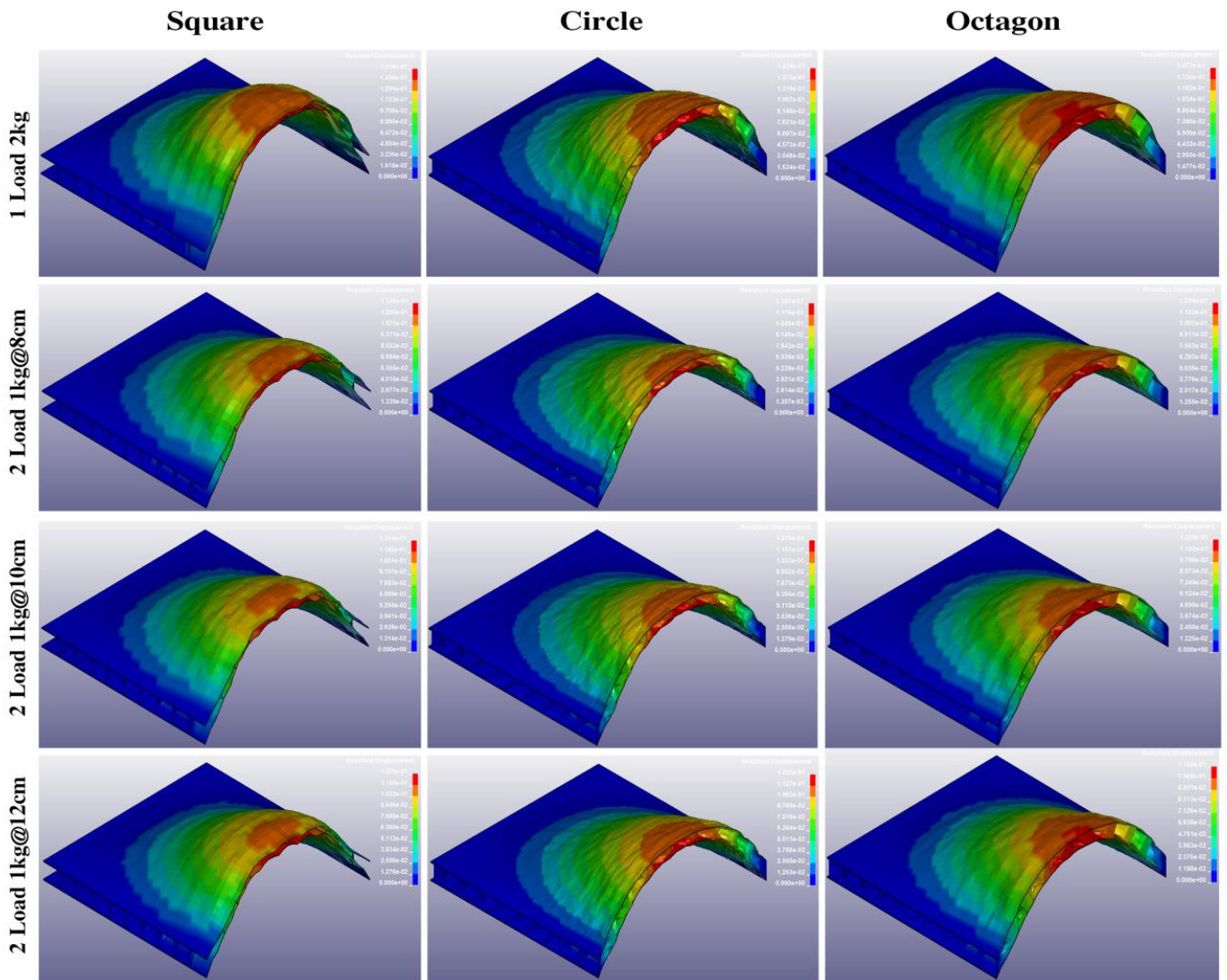
- بارهای انفجاری تک نقطه‌ای در همه موارد تغییر شکل بزرگتری نسبت به بارگذاری دونقطه‌ای دارند.
- ساندویچ پنل با ساختار سلولی هشت ضلعی بهترین عملکرد را در جذب بارهای انفجاری دارد.
- ساندویچ پنل با هسته مربعی، ضعیف‌ترین عملکرد را در بارگذاری

درصد تغییرات جابجایی برای صفحات جلو و عقب در بارگذاری‌های مذکور در جدول ۴ آورده شده است.

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 به وضوح 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.

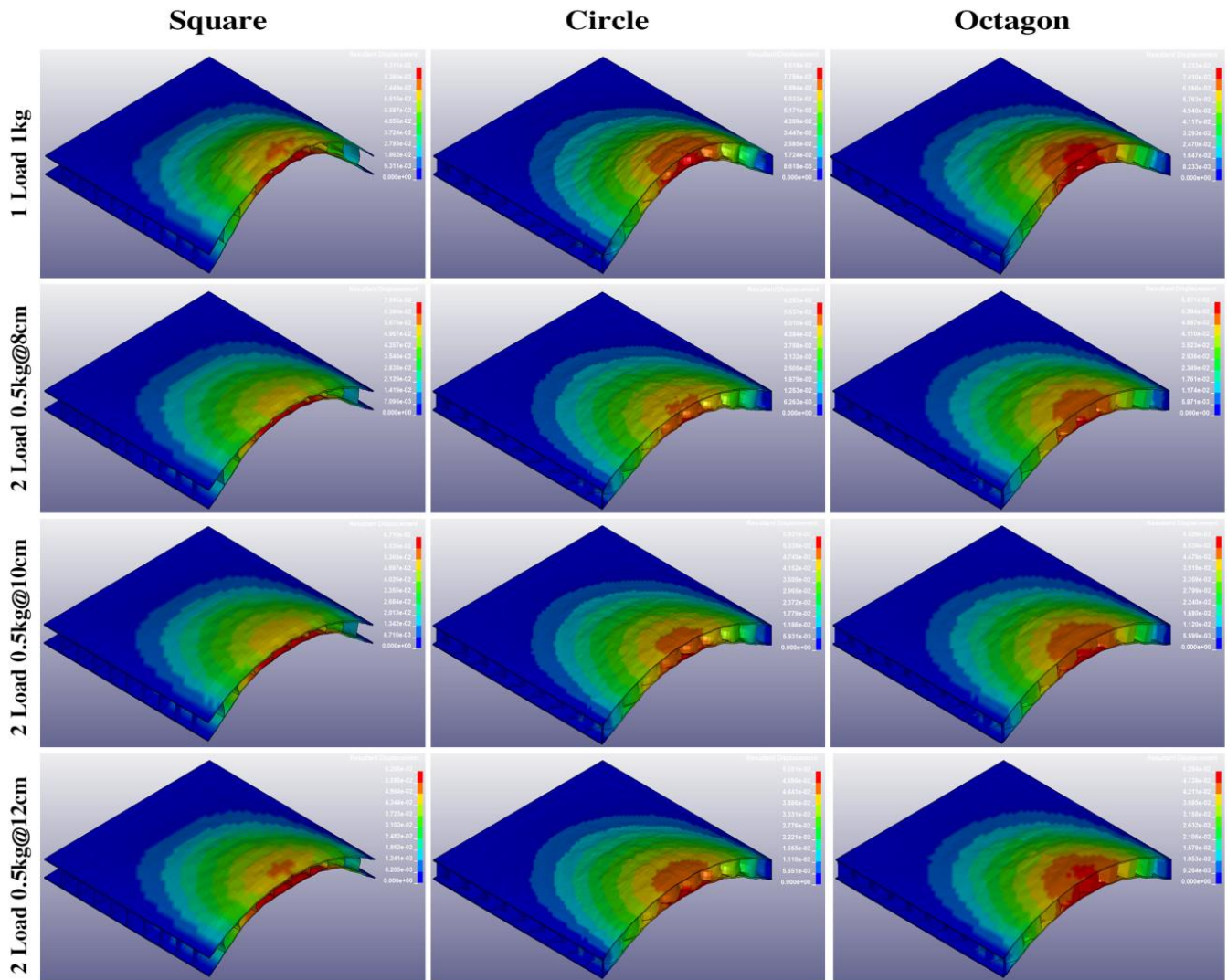
۴- جمع بندی

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



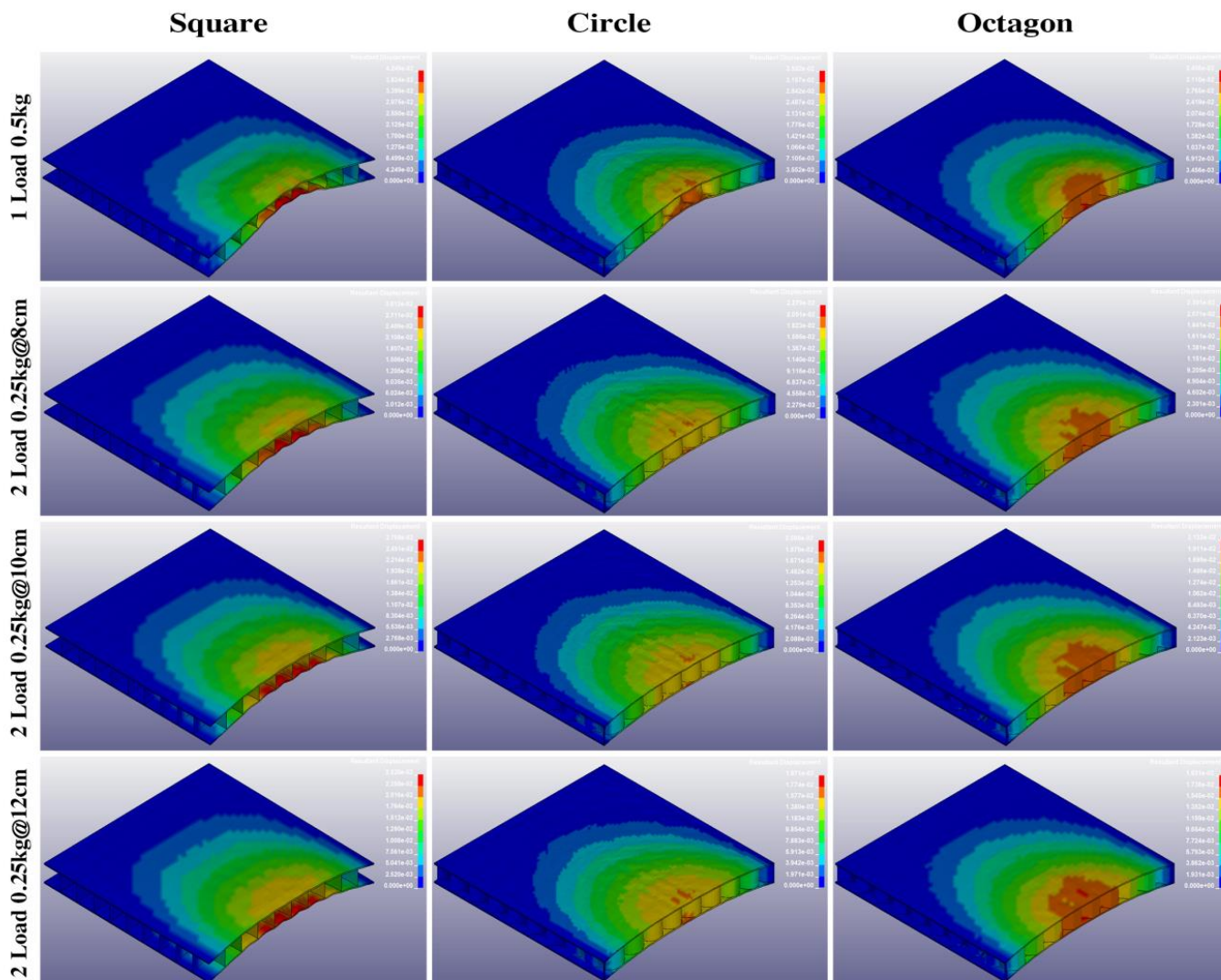
شکل ۱۳. تغییر شکل پلاستیک ساندویچ پنل در بارگذاری تک نقطه‌ای و متقارن هم‌زمان دونقطه‌ای با ۲ کیلوگرم ماده منفجره

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 0.5 کیلوگرم ماده منفجره

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

جدول ۴. جزئیات درصد افزایش جابجایی بارگذاری تک‌نقطه‌ای 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	

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. Kiakojoori, 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.

انفجاری تک‌نقطه‌ای 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 تک‌نقطه‌ای افزایش می‌یابد.
- بنابراین می‌توان گفت ساختار سلولی هشت‌ضلعی برای هسته ساندویچ پل بهترین انتخاب برای حفاظت در برابر بارهای انفجاری است. لذا با توسعه استفاده از آن در هسته ساندویچ پل، می‌توان سازه‌های مختلف را در برابر بارگذاری ضربه‌ای بهتر محافظت نمود.

منابع

- [1] K.P. Dharmasena, H.N. Wadley, Z. Xue, J.W. Hutchinson, Mechanical response of metallic honeycomb sandwich

- 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.
- [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*

- (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.
- (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-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

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Niajalili, M. Alitavoli, R. Ansari, M. Haghgoo, Investigating the effects of simultaneous symmetrical impulsive loading on honeycomb sandwich panels with different core topologies, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 56(9) (2024) 1227-1248.

DOI: [10.22060/mej.2025.23581.7783](https://doi.org/10.22060/mej.2025.23581.7783)

