



Experimental and Numerical Investigation into the Effect of Core Density on the Energy Absorption of Sandwich Panels with Aluminum Face Sheets and Polyurethane Foam Core

R. Khondabi¹, H. Khodarahmi¹, R. Hosseini^{1*}, M. Zia Shamami²

¹Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran

²Department of Mechanical Engineering, Guilan University, Rasht, Iran

ABSTRACT: Sandwich panels with metallic face-sheets and foam core are of great importance in aerospace, naval and automotive industries due to high strength to weight ratio and high energy absorption characteristics. In this article, several aluminum sandwich panels with polyurethane foam core with different densities were designed and tested using a shock tube facility. Some of blast tests were defined in order to determine the effects of foam density on the back face-sheet displacement and energy absorption of sandwich structures. Also using the results of compression test performed on different foams, numerical simulation using Autodyn software was performed. There was a good agreement between experimental investigation and numerical results. The results show that increasing foam density can lead to reducing the back face-sheet displacement of the sandwich panel, but the energy absorption of the panel also decreases. Moreover, increasing the density of the foam, in addition to reducing the shape of the back face of the panel, leads to more uniform profile. So, if the sandwich panel is the main structure, it is advisable to use high-density foam, but if the panel is to be installed as an absorber structure on another structure, lower density foam should be used to reduce the pressure transferred to the back face of the panel. Also, the results show that the changes of the back face-sheet displacement versus impulse are linear and increasing impulse can lead to increasing the energy absorption of the core and decreasing the energy absorption of the face-sheets.

Review History:

Received: 11 Jul. 2018

Revised: 26 Apr. 2019

Accepted: 5 May. 2019

Available Online: 25 Aug. 2019

Keywords:

Blast loading

Sandwich panel

Polyurethane foam

Energy absorption

Shock tube

1- Introduction

In the early 20th century, sandwich structures made from metal or Fiber Reinforced Polymer (FRP) skins separated by a core have broad significant applications in different industries, such as aerospace, building, naval, automobile, sporting goods, etc. [1]. This could be due to their attractive properties in terms of high strength and stiffness to weight ratios, aerodynamic smoothness, low thermal conductivity, impressive acoustic insulation, ease of manufacture and design ability in comparison to other structural materials. For blast loading experiments, the properties help in scattering the impulse transferred to the panel and therefore protect anything placed behind it. It is worth mentioning that the characteristic stress-strain curve of the low-density foam core controls the amount of blast energy transferred to the structure under compression. The change of the equivalent stiffness and mass of the sandwich panel play vital roles in the dynamic response of the structure while changing the core properties. Thus, it is important for engineers to find the best core configuration. Over the past few years, stepwise graded materials in which the properties of material change layer-by-layer or gradually within the material itself have been used as a core in sandwich panels. Due to design and control of the layered/graded core structure properties, these materials represent great potential to consider as an effective core materials in energy absorption

systems to absorb the blast energy and improve the overall performance and blast resistance of sandwich panels where the face sheets or skins are designed for carrying the bending load and the core carries the shear load [2]. The Review of literature shows that there is a research gap in the investigations on the effects of polyurethane foam density (as the core of sandwich panels) on the sandwich panel behavior against the explosive loading. In this study, some sandwich panels with aluminum sheets and polyurethane foam cores with different densities are prepared. Then some explosive tests using shock-tube were defined and based on the experimental and numerical results, effect of foam density on the displacement of the backward surface and amount of the absorbed energy is studied.

2- Methodology

The explosive material used for explosive experimental tests is C4. The amount of explosive material in all tests was 4 g. An electric detonator was used for explosion. In this study, aluminum face-sheets and polyurethane foam core were used for manufacturing sandwich panels (Fig. 1). Aluminum face-sheets for sandwich panel samples were selected from the 6061-T6 series and had 1 mm thickness. For each sandwich panel, a circular plate of 154 mm in diameter for the front surface and a square plate of 250mm×250 mm were provided for the back panel. The core of the sandwich panels was also made of closed-cell polyurethane foam with densities of 4%, 8% and 12%. The core thickness of all panels is considered to be equal to 30 mm.

*Corresponding author's email: nozar@ssau.ac.ir



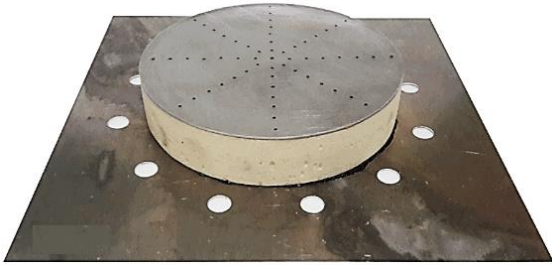


Fig. 1. An isometric view of a sandwich panel sample



Fig. 2. A view of the shock-tube

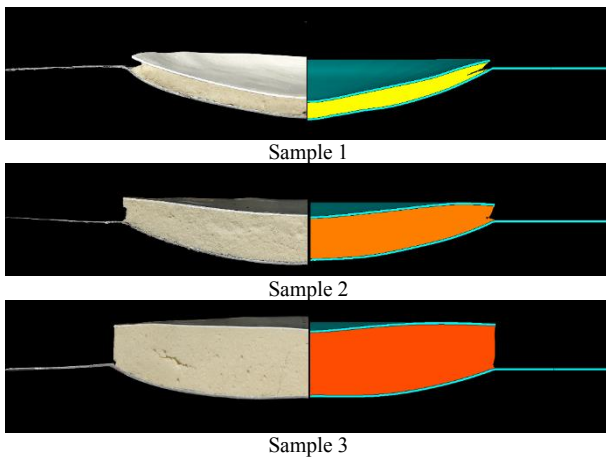


Fig. 3. Comparison of the cross-sectional area of experimental samples with numerical simulation models

In this study, an explosive shock tube device was used to create the explosive loading (Fig. 6). The specimens are fastened to the shock-tube opening by means of fixtures and screws so that the boundary conditions are fully clamped at the back edges of the sandwich structure. The explosive material is also placed behind the shock-tube using a Teflon holder.

The numerical simulation of the problem is made using ANSYS Autodyn software. Correct selection of the material model and the equation of state, as well as the correct application

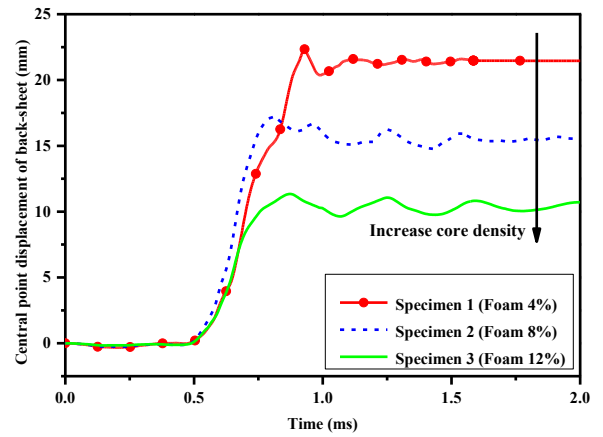


Fig. 4. Time history of backward displacement of structures intended to investigate the effect of the core density

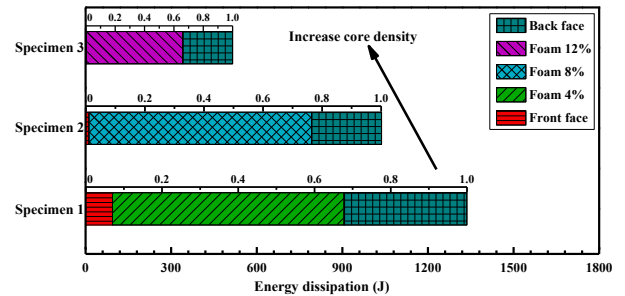


Fig. 5. The amount of energy absorbed in the components of structures to investigate the effect of the core density

of the physical conditions of the problem, such as boundary conditions, and the use of contact surfaces and elements appropriate to the type of problem, allow the correct simulation to be performed.

3- Results and Discussion

In order to check the correlation between the numerical and experimental results in terms of deformation modes, the crosscut deformation profiles for all sandwich panels with different configurations obtained from numerical simulations were compared to the experiments and are illustrated in Fig. 3. As shown in Fig. 3, there is good agreement between the numerical and experimental results.

Fig. 4 shows the timing history of the back-displacement of the desired sandwich panels. As can be seen, as the density of the core increases, both the maximum amount of displacement and residual displacement of the back surface decrease. For example, the maximum displacement and rear displacement of the sandwich panel 3 are both about 49 percent lower than the corresponding values for the sandwich panel 1. Also, as seen in this figure, the oscillations of the surfaces increase with increasing core density, which is due to the increase in the foam modulus of elasticity and its damping effect.

Fig. 5 reports the amount of energy absorbed in the components of the investigated panels. According to the figure, as the density of the cores increases, the amount of energy absorbed by the face-sheets and cores decreases, as

well as the total amount of energy absorbed. The results show that by increasing foam density, the back-surface displacement decreases due to the increased flexural rigidity of the foam (and thus the panel), while the same density reduces the foam porosity and its ability to absorb the energy of the blasting.

4- Conclusions

In this paper, by defining a number of explosive tests on some sandwich panels with aluminum face-sheets and polyurethane foam cores, the effect of foam density on the displacement of the back surface of the sandwich panels, has been studied. Also, the mechanical properties of the foam have been extracted using axial pressure tests on the foam and numerical parametric studies have been done which show that the numerical results are in good agreement with the experimental data. Using numerical simulations, the energy absorption in the sandwich panels was calculated. The results are as follows:

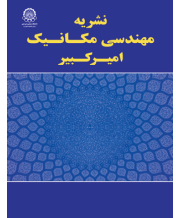
1. The polyurethane foam core has a significant effect on the amount of back face-sheet displacement and energy

absorption.

2. Increasing the density of the polyurethane foam core in the sandwich structure reduces the maximum displacement of the back face-sheet, but also decreases the amount of absorbed energy. This indicates that if the sandwich panel is used as the main structure, increasing the density will be positive, but if the panel is to be installed as an absorber on the main structure and play as a sacrificial structure role, it would be better to use lower density foams. If it is necessary to balance the goals (displacement of the back face-sheets and energy absorption), polyurethane foam with a density of 8.3% is the best choice.

References

- [1] W. Hou, F. Zhu, G. Lu, D.-N. Fang, Ballistic impact experiments of metallic sandwich panels with aluminum foam core, *International journal of impact engineering*, 37(10) (2010) 1045-1055.
- [2] M.F. Ashby, T. Evans, N.A. Fleck, J. Hutchinson, H. Wadley, L. Gibson, *Metal foams: a design guide*, Elsevier, 2000.



تحلیل تجربی و عددی تأثیر چگالی هسته بر روی قابلیت جذب انرژی پانل‌های ساندویچی با رویه صفحات آلومینیومی و هسته فوم پلی‌یورتان

رضا خندابی^۱، حسین خدارحمی^۱، روح‌اله حسینی^{۱*}، مجتبی ضیاء شمایی^۲

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

^۲ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۲۰
بازنگری: ۱۳۹۸/۰۲/۰۶
پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۱۵
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۶/۰۳

کلمات کلیدی:

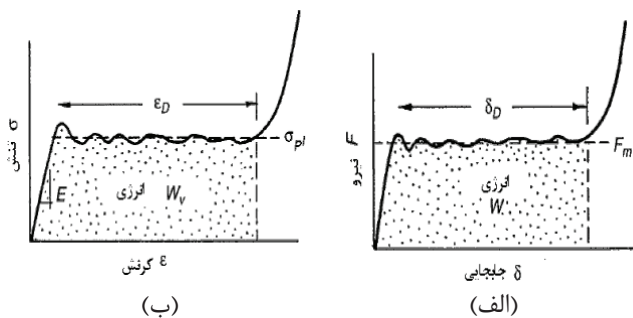
بارگذاری انفجاری
پانل ساندویچی
فوم پلی‌یورتان
جذب انرژی
لوله شاک

خلاصه: پانل‌های ساندویچی با رویه فلزی و هسته فومی، به دلیل نسبت استحکام به وزن مناسب و جذب انرژی بالا، در صنایع مختلف هوافضا، دریایی، خودروسازی و غیره اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده‌اند. در این مقاله، با تهیه فوم‌های پلی‌یورتان با چگالی‌های مختلف و ساخت پانل‌های ساندویچی از ورق‌های آلومینیومی و هسته فوم پلی‌یورتان، با استفاده از دستگاه لوله شاک انفجاری، تعدادی آزمایش‌های انفجاری تعریف شده و اثر چگالی فوم در مقدار جابجایی سطح پشتی ساختار ساندویچی و میزان جذب انرژی آن مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین با استفاده از نتایج آزمایش فشار انجام شده بر روی فوم‌های مختلف، شبیه‌سازی سازه ساندویچی تحت بار انفجاری به کمک نرم‌افزار اتوداین انجام شده است. بین نتایج تجربی و عددی تطابق خوبی وجود دارد. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش چگالی فوم مقدار جابجایی سطح پشتی پانل ساندویچی کمتر می‌شود، ولیکن میزان جذب انرژی پانل نیز کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش چگالی فوم علاوه بر این که جابجایی رویه پشتی پانل کاهش می‌یابد، پروفیل آن نیز یکنواخت‌تر می‌گردد. بنابراین اگر پانل ساندویچی به عنوان سازه اصلی باشد، بهتر است که از فوم با چگالی بالا استفاده گردد، ولی در صورتی که نیاز است پانل به عنوان سازه فناشونده بر روی یک سازه دیگر نصب شود، باید از فوم با چگالی پایین‌تر استفاده گردد تا فشار منتقل شده به پشت پانل کاهش یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که تغییرات جابجایی رویه پشتی برحسب تکانه وارده به صورت خطی می‌باشد و با افزایش تکانه، سهم انرژی جذب شده توسط هسته افزایش یافته، ولی سهم جذب انرژی رویه‌ها کاهش می‌یابد.

۱- مقدمه

موادی که منحنی‌های کشیده‌تری داشته باشند، مقدار انرژی بیشتری را نیز می‌توانند جذب کنند [۱].

ساختارهای ساندویچی با رویه فلزی و هسته فومی به دلیل نسبت استحکام به وزن مناسب و جذب انرژی بالا اهمیت ویژه‌ای در صنایع مختلف هوافضا، دریایی، خودروسازی و غیره پیدا کرده‌اند. مواد و سازه‌هایی که به عنوان جاذب‌های انرژی به کار می‌روند عموماً دارای منحنی‌های تنش-کرنش کشیده و یکنواخت می‌باشند. این مواد در تنشی که به تنش پایا^۱ معروف است، دچار تغییر شکل پلاستیک شده و انرژی زیادی را جذب می‌نمایند. یک قطعه یا سازه هنگامی به عنوان جاذب انرژی محسوب می‌شود که بتواند بیش‌ترین مقدار کرنش و یا تغییر شکل را داشته باشد. به همین دلیل اکثر جاذب‌های انرژی اولاً دارای مقدار تنش پایایی بالایی بوده و علاوه بر این منحنی تنش-کرنش آن‌ها نیز بسیار کشیده است (شکل ۱). سطح زیر منحنی بیانگر مقدار انرژی جذب شده در واحد حجم اولیه است. بنابراین



شکل ۱: الف) منحنی نیرو-جابجایی، ب) منحنی تنش-کرنش

Fig. 1. a) force-displacement curve, b) stress-strain curve

1 Plateau Stress

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: kprhosseini@ihu.ac.ir

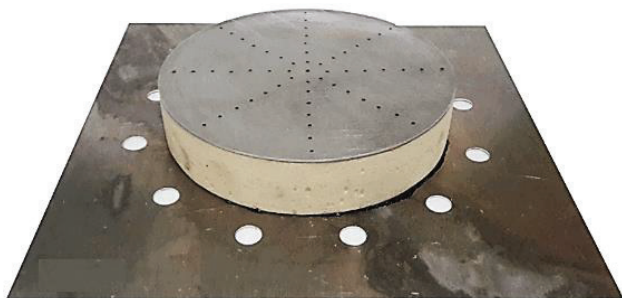


اکثر کارهای انجام گرفته بر روی سازه‌های ساندویچی با هسته فوم فلزی یا هسته لانه زنبوری بوده است. گوروپراساد و ماخرجی [۲ و ۳] برنامه آزمایش‌های خود را با انفجار خرج تی‌ان‌تی در بالای سطح رویی سازه چندلایه سلولی ساخته شده از فولاد نرم انجام دادند. نتایج حاصل بیانگر عملکرد موفق سپر فناشونده مورد استفاده در کنترل و میرا نمودن امواج تابشی می‌باشد. دیگر گزارش مهم آزمایش‌های انفجاری بر روی سازه‌های مرکب فناشونده، ماحصل پژوهش میدانی هانسن و همکاران می‌باشد [۴]. این محققین آزمایش‌های خود را با نصب پانل‌های فوم آلومینیوم بر روی یک آونگ بالستیک و انفجار خرج انفجاری در فاصله از پیش تعیین شده به سرانجام رساندند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها حاکی از آن بوده است که در همه نمونه‌های همراه با پوشش فولادی و نیز در نمونه‌های بدون پوششی که فوم متلاشی نشده است، پانل فومی و ورق فولادی به شکل دوقوسی^۱ درآمده‌اند. ما و یه [۵] نیز با ارائه مدل تحلیلی و المان محدود یک سپر فناشونده با دولایه فوم آلومینیوم با چگالی‌های مختلف، ظرفیت بهبود یافته جذب انرژی و اثرات مثبت آن در جلوگیری از وقوع حالت تقویت امواج شوک را بررسی نمودند. باهی‌الدین و همکاران [۶] یک پانل ساندویچی شامل یک لایه نازک پلی‌اوره در بین رویه ب‌برونی (سمت بارگذاری) و هسته فوم طراحی کردند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تحت بارگذاری انفجاری سازه ساندویچی اصلاح شده، لهیدگی فوم، کرنش رویه و تغییر شکل کلی را نسبت به طرح سازه معمولی کاهش می‌دهد و همچنین جذب انرژی بهتری خواهد داشت. نوریک و همکاران [۷]، کاراگیزوا و همکاران [۸] و تئوبالد و همکاران [۹] رفتار سازه‌های ساندویچی را تحت بارگذاری انفجاری شدید به صورت تجربی و عددی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که ضخامت رویه به‌طور چشمگیری بر مقاومت انفجاری سازه‌های ساندویچی تأثیر گذار است. آن‌ها همچنین مصالحه بین بهبود جذب انرژی و انتقال بار از طریق هسته به رویه زیرین را مورد بحث و بررسی قرار دادند. کاراگیزوا و همکاران [۱۰] نیز نتایج تجربی و عددی پژوهش خود بر روی بارگذاری انفجاری سازه‌های ساندویچی دایروی با ورق‌های فولادی و هسته‌های لانه‌زنبوری آلومینیومی و پلی‌استایرن را گزارش نمودند. مطالعه خیز پوسته پستی و چگونگی تغییر آن با تکانه دریافتی، محققین را به این باور رسانده است که برای پانل‌های با جرم برابر، هسته لانه‌زنبوری عملکرد بهتری نسبت به هسته پلی‌استایرن از خود نشان می‌دهد. شن و همکاران [۱۱] با استفاده از پاندول بالستیک رفتار پانل‌های ساندویچی انحنادار را تحت بارگذاری انفجاری بررسی کردند.

آن‌ها به این نتیجه رسیدند که این پانل‌ها با توجه به انحنای اولیه، نسبت به سازه‌های یکپارچه و پانل‌های ساندویچی مسطح عملکرد بهتری دارند. هاسان و همکاران [۱۲] به‌صورت تجربی و عددی رفتار پانل‌های ساندویچی با هسته فوم پلی‌وینیل کلراید^۲ را در برابر انفجار بررسی کردند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در پانل‌های دارای فوم با چگالی کم، هیچ‌گونه شکست یا جدایشی اتفاق نیفتاده است و انرژی حاصل از انفجار از طریق تغییر شکل پلاستیک در رویه‌ها و لهیدگی هسته فومی صورت گرفته است. در حالی که در پانل‌های دارای فوم با چگالی بالا، آسیب قابل توجهی در هسته و جدایش در سطح بین رویه‌ها و هسته مشاهده می‌شود. یازبسی و همکاران [۱۳] برای بررسی تأثیر تریق فوم در داخل هسته لانه‌زنبوری بر روی مقاومت انفجاری پانل‌های ساندویچی، سه نوع پانل با هسته‌های لانه‌زنبوری، فومی و ترکیب لانه‌زنبوری و فومی در نظر گرفتند. مطالعات این محققین نشان می‌دهد که مقدار ماکزیمم جابجایی رویه جلویی و پستی پانل با پر کردن فوم در لانه‌زنبوری کاهش ۵۰ درصدی خواهد داشت. اودی و همکاران [۱۴] بر روی پانل‌های ساندویچی با پوسته کامپوزیتی و هسته فوم پلی‌یورتان با چگالی‌های مختلف آزمایش انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش چگالی فوم صلبیت سازه افزایش می‌یابد و برای رسیدن به جابجایی‌های یکسان نیاز به اعمال نیروی بیشتری می‌باشد. داگرا و همکاران [۱۵] تأثیر پلی‌یورتان ترموپلاستیک تقویت شده با نانو لوله کربنی را بر روی پوتین سربازان بررسی کردند. آن‌ها از پلی‌یورتان به عنوان جاذب انرژی و از کامپوزیت کربن-کولار برای کاهش تأثیر بار انفجاری استفاده کردند. بهترین خواص مکانیکی با درصد وزنی ۱ درصد نانو لوله کربنی بدست آمده است. در نتیجه پژوهش آن‌ها، بهترین کاهش بار انفجار ۱۲ درصد بدست آمده، که با پوتین سرباز به طور کامل خنثی شده است. ژانگ و همکاران [۱۶] برای افزایش مقاومت انفجاری سازه‌های انفجاری با هسته لانه‌زنبوری، سه حالت مختلف برای پر کردن فوم در داخل سلول‌ها را بررسی کردند. نتایج تجربی آن‌ها نشان داده که پانل‌های با سلول‌های پر شده جلویی و کامل نسبت به پانل‌هایی که سلول‌های پستی آن‌ها پر شده، عملکرد بهتری را نشان می‌دهد. دلیل این موضوع لهیدگی مناسب فوم پرکننده و افزایش مقاومت خمشی صفحات هسته لانه‌زنبوری می‌باشد. دیشر و همکاران [۱۷] به صورت تجربی رفتار سه نوع سازه ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی و هسته‌های پلیمری متفاوت استایرن آکریلونیتریل^۳، پلی‌وینیل کلراید و پلی‌متاکریلامید^۴

2 Polyvinylchloride (PVC)
3 Styrene Acrylonitrile (SAN)
4 Polymethacrylimide (PMI)

1 Double-Curved Shape



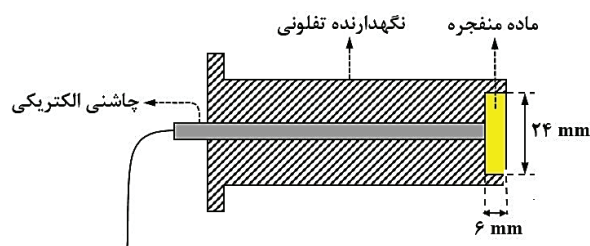
شکل ۳: نمایی ایزومتریک از یکی از نمونه‌های ساندویچی

Fig. 3. Isometric view of a sandwich specimen

هر آزمایش به شکل یک دیسک استوانه‌ای شکل در نظر گرفته شده و قطر و ارتفاع آن به ترتیب برابر ۲۴ و ۶ میلی‌متر می‌باشد. جهت انفجار ماده منفجره از چاشنی الکتریکی استفاده شده است. این چاشنی در وسط نگهدارنده تفلونی و پشت دیسک خراج قرار می‌گیرد. در شکل ۲ نگهدارنده تفلونی به همراه ماده منفجره و چاشنی الکتریکی قرار گرفته در داخل آن نشان داده شده است.

در این پژوهش از رویه‌های آلومینیومی و هسته فوم پلی‌یورتان جهت ساخت پانل‌های ساندویچی استفاده شده است (شکل ۳). برای اطمینان بهتر از صحت نتایج طبق استاندارد، آزمایش‌ها بر روی هر نمونه باید چهار مرتبه تکرار شود و از میانگین نتایج استفاده نمود. رویه‌های آلومینیومی برای نمونه‌های ساندویچی از سری ۶T-۶۰۶۱ انتخاب شده و دارای ضخامت ۱ میلی‌متر می‌باشند. برای هر پانل ساندویچی یک ورق دایروی با قطر ۱۵۴ میلی‌متر برای رویه جلویی و یک ورق مربعی با ابعاد ۲۵۰×۲۵۰ میلی‌متر برای رویه پشتی پانل تهیه شده است. همچنین هسته پانل‌های ساندویچی مورد نظر از فوم پلی‌یورتان با سلول‌های بسته و نسبت چگالی ۸ درصد می‌باشد. ضخامت هسته در همه پانل‌ها یکسان و برابر ۳۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. برای اتصال رویه‌ها به هسته از چسب کرافت رازی استفاده شده است.

برای تعیین رفتار مکانیکی فوم پلی‌یورتان از استاندارد OO-ASTMD۶۱۲۱ استفاده شده است [۱۸]. مطابق این استاندارد نمونه با ابعاد ۷۰×۸۰×۵۰ میلی‌متر ساخته شده است. پس از آماده‌سازی نمونه فوم‌های پلی‌یورتان (شکل ۴) آزمایش فشار محوری با دستگاه آزمایش فشار ستام بر روی آن‌ها انجام شده است. شکل ۵ منحنی فشاری برای سه نوع فوم



شکل ۲: شماتیک نگهدارنده تفلونی به همراه ماده منفجره و چاشنی الکتریکی قرار گرفته در داخل آن

Fig. 2. A schematic of a Teflon-retainer with explosive and electric detonator located inside it

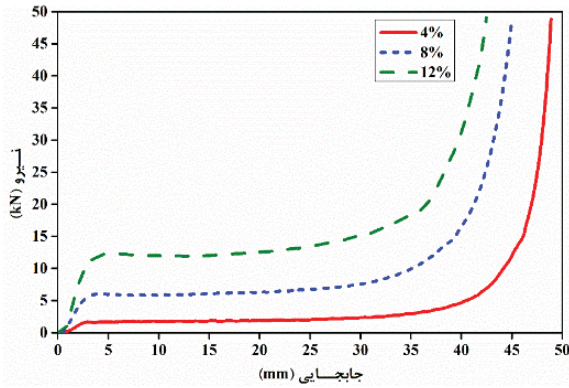
را تحت بار انفجاری مورد بررسی قرار داده و مشاهده کردند که تغییر شکل و آسیب به وجود آمده در سازه با هسته استایرن آکریلونیتریل نسبت به دو سازه دیگر کمتر می‌باشد.

بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد خلاء تحقیقاتی در زمینه اثر چگالی فوم پلی‌یورتان به عنوان هسته پانل ساندویچی با رویه‌های فلزی بر روی رفتار پانل تحت مقادیر مختلف تکانه ناشی از بارگذاری انفجاری به چشم می‌خورد. در این تحقیق، با تهیه فوم پلی‌یورتان با چگالی‌های مختلف و ساخت پانل‌های ساندویچی از ورق‌های آلومینیومی و هسته فوم پلی‌یورتان، به کمک دستگاه لوله شاک انفجاری، تعدادی آزمایش انفجاری تعریف شده و با توجه به نتایج تجربی و عددی اثر چگالی فوم در مقدار جابجایی سطح پشتی ساختار ساندویچی و میزان جذب انرژی آن مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین، در این تحقیق، ارائه یک مدل شبیه‌سازی عددی منطبق بر شرایط واقعی مسئله با توجه به نتایج آزمایش‌های تجربی نیز دنبال شده است تا در انجام بیش‌تر آزمایش‌های تجربی صرفه‌جویی گردد.

۲- آزمایش‌های تجربی

۲-۱- خصوصیات مواد اولیه

ماده منفجره مورد استفاده برای آزمون‌های تجربی انفجار، از نوع C۴ می‌باشد. این ماده منفجره حالت خمیری دارد و به راحتی قابل شکل‌دهی و قالب‌گیری است. برای ثابت نگه داشتن و همچنین قالب‌گیری و ایجاد دیسک خراج با شکل موردنظر، برای هر آزمایش یک نگهدارنده از جنس تفلون ساخته شده است. مقدار ماده منفجره در تمامی آزمایش‌ها ثابت و برابر ۴ گرم در نظر گرفته شده است. شکل دیسک خراج و قالب آن برای



شکل ۵: منحنی فشاری فوم پلی‌یورتان با نسبت چگالی‌های مختلف



شکل ۴: نمونه‌های مختلف تهیه شده با نسبت چگالی‌های متفاوت برای انجام آزمایش‌های فشار تک‌محوری

Fig.5. Compressive curves of polyurethane foams with different density ratios

Fig. 4. Different specimens with different density ratios prepared for uniaxial compression tests

نمونه نصب شده بر روی دهانه دستگاه آزمایش و همچنین نحوه قرار گرفتن نگهدارنده تفلونی و چاشنی الکتریکی در بخش پشتی دستگاه آزمایش نشان داده شده است.

۳- شبیه‌سازی عددی

در این مقاله، برای شبیه‌سازی عددی مسئله از اتوداین^۱ که یک نرم‌افزار اجزاء محدود غیرخطی صریح با قابلیت‌های دو و سه‌بعدی می‌باشد، استفاده شده است. این نرم‌افزار، برای شبیه‌سازی فرآیندهای با تغییر شکل‌های شدید و به خصوص فرآیندهای انفجاری بسیار ایده‌آل می‌باشد.



شکل ۶: نمایی از دستگاه لوله شاک انفجاری

Fig.6. A view of the explosive shock tube apparatus

پلی‌یورتان با نسبت چگالی‌های مختلف تحت نیروی فشار محوری را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، فوم سه مرحله کاملاً مجزا را در خلال آزمایش فشار سپری می‌کند. در ابتدا، خمش الاستیک دیواره سلول‌ها، باعث ظهور یک ناحیه الاستیک در منحنی نیرو-جابجایی ماده می‌گردد. کماتش و فروریزش پلاستیک^۱ سلول‌ها باعث تشکیل یک ناحیه وسیع و نسبتاً هموار در ادامه ناحیه الاستیک اولیه می‌گردد. پس از پایان فروریزش پلاستیک سلول‌ها، ناحیه موسوم به چگالش^۲ فوم آغاز شده که در آن، نزدیک‌تر شدن چگالی فوم به چگالی ماده سازنده خود باعث افزایش ناگهانی نیرو می‌گردد.

۲-۲- نحوه انجام آزمایش‌ها

در این تحقیق از دستگاه لوله شاک انفجاری جهت تست انفجار استفاده شده است (شکل ۶). موج فشاری تولید شده توسط دستگاه لوله شاک انفجاری نسبت به موج انفجار آزاد واقع‌گرایانه‌تر است و همچنین با استفاده از ماده منفجره کم‌تر، موج شاک شدیدتری را تولید می‌کند. نمونه‌ها بر روی دهانه لوله به وسیله فیکسچر و پیچ‌هایی محکم شده‌اند، به طوری که شرایط مرزی کاملاً گیردار در لبه‌های رویه پشتی سازه ساندویچی تأمین گردد. ماده منفجره نیز با استفاده از نگهدارنده تفلونی در پشت لوله قرار می‌گیرد. مقدار ماده منفجره در تمامی آزمایش‌ها ثابت و برابر ۴ گرم در نظر گرفته شده است. با انفجار ماده منفجره موج شاک تولید شده از طریق لوله هدایت شده و به پانل برخورد کرده و باعث تغییر شکل آن می‌شود. در شکل ۷ نمایی از

- 1 Plastic Collapse
- 2 Densification



(ب)



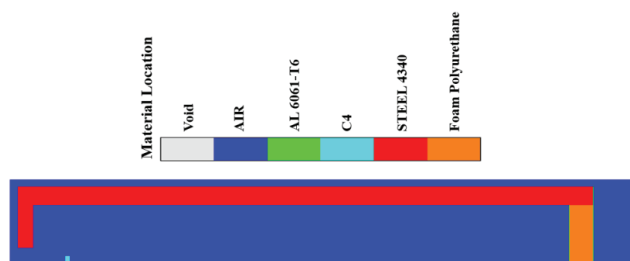
(الف)

شکل ۷: نمای از دستگاه آزمایش، الف) نمونه نصب شده بر روی دهانه دستگاه، ب) نحوه قرارگیری نگهدارنده تفلونی

Fig.7. A view of the experiment setup, a) specimen mounted on the apparatus, b) Teflon-retainer placement

برای تعیین وضعیت تماس بین اجزاء سازه ساندویچی و لوله شاک برهم‌کنش سازه- سازه^۲ و برای برهم‌کنش هوای محیط اطراف و ماده منفجره با سازه ساندویچی و لوله شاک از نوع سیال-سازه^۳ استفاده شده است. با توجه به عدم جدایش سطوح مشترک هسته و رویه‌ها در نمونه‌های آزمایش شده، برای مدل نمودن اتصال بین لایه‌ها، گره‌های مشترک هسته و رویه‌های آلومینیومی به یکدیگر متصل شده است.

با توجه به این که لبه‌های بیرونی رویه پشتی پانل کاملاً گیردار می‌باشد، درجات آزادی لبه بیرونی این رویه در تمام جهات، مقید شده است. شرط مرزی لبه‌های هسته و رویه جلویی پانل به صورت آزاد بوده و دیواره بیرونی لوله شاک به صورت کاملاً گیردار در نظر گرفته شده است. همچنین در مرزهای هوا که در تماس با محیط نامتناهی می‌باشد، از شرط مرزی خروج سیال^۴ استفاده شده است.



شکل ۸: مدل شبیه‌سازی شده

Fig.8. Simulated model

از دیگر ویژگی‌های خوب این نرم‌افزار می‌توان به بانک اطلاعاتی کامل آن که در بردارنده اطلاعات کاملی از مواد پرکاربرد صنعتی است، اشاره کرد. در گام اول به نحوه ایجاد مدل اشاره شده و سپس به تعریف خصوصیات مواد، ویژگی‌ها، شرایط مرزی و معین کردن ابزارهای کنترلی در محیط نرم‌افزار اتوداین پرداخته شده است. صحت‌سنجی نتایج عددی نیز به کمک نتایج تست‌های تجربی انجام گردیده است.

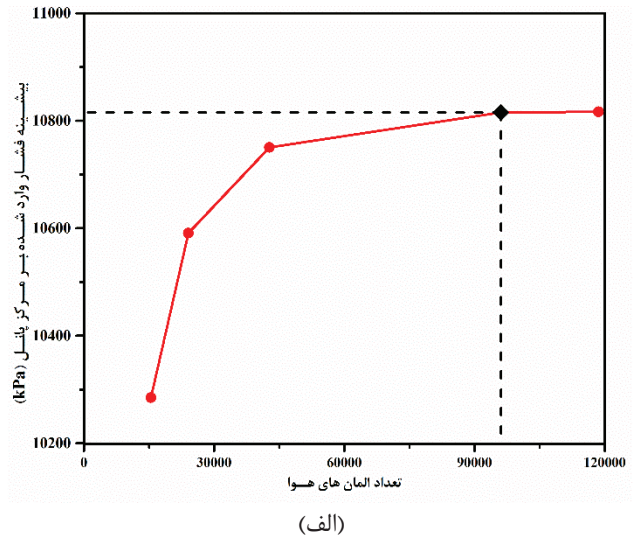
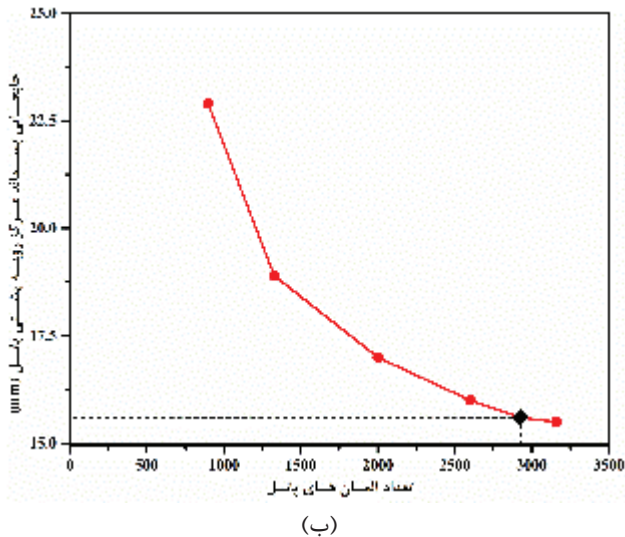
۳-۱- مدل هندسی

با توجه به متقارن بودن مسئله، برای صرفه‌جویی در زمان حل، از حالت دوبعدی تقارن محوری^۱ استفاده شده است (شکل ۸). مش مورد نظر در این تحلیل دوبعدی و چهارگره‌ای می‌باشد. برای بررسی همگرایی شبکه از پانل ساندویچی^۲ و در برابر ۴ گرم ماده منفجره استفاده شده است. نتایج به صورت نمودار در شکل ۹ نمایش داده شده‌اند. نتایج شکل ۹-الف حاکی از آن است که برای تعداد المان‌های ۸۸۰۰۰ و ۱۰۸۶۴۰ بیشینه فشار ایجاد شده در مرکز پانل تقریباً یکسان‌اند و شیب خط متصل‌کننده این دو نقطه تقریباً صفر است. به همین دلیل تعداد المان مناسب برای هوا، ۸۸۰۰۰ در نظر گرفته می‌شود. به همین ترتیب با توجه به نتایج شکل ۹-ب تعداد المان مناسب برای پانل ساندویچی ۲۹۲۶ انتخاب می‌شود.

حلگر استفاده شده برای اجزاء سازه ساندویچی و لوله شاک از نوع لاگرانژی و برای هوا از نوع اولیری می‌باشد. یکی دیگر از نکات مهم در شبیه‌سازی، تعریف و اعمال برهم‌کنش مناسب است. در این شبیه‌سازی،

- 1 Lagrange/Lagrange
- 2 Euler/Lagrange
- 3 Flow-out

- 1 2D Axial Symmetry



شکل ۹: الف) نمودار بیشینه فشار وارد شده بر مرکز پانل برحسب تعداد المان های هوا، ب) نمودار جابجایی پسماند مرکز رویه پشتی پانل ساندویچی برحسب تعداد المان های پانل

Fig.9. a) The plot of maximum pressure entered on the center of the panel versus number of air elements, b) The plot of permanent back face-sheet central displacement versus number of panel elements

۳-۲-۲- ماده منفجره

برای ماده منفجره از معادله حالت JWL^۱ استفاده شده است. این معادله حالت، انفجار کامل را مدل سازی می کند و به صورت غیرخطی رابطه ای مابین متغیرهای ترمودینامیکی ماده منفجره چه در حالت جامد و چه در حالت تبدیل شده به گازهای حاصل از انفجار ایجاد می کند. هنگام استفاده از این معادله حالت لازم است که زمان شروع انفجار و محل آن توسط کاربر تعریف شود. این معادله حالت فشار حاصل از انفجار (P) را بر اساس حجم نسبی (V) و انرژی داخلی به حجم اولیه (E) تعیین می نماید [۱۹ و ۲۱]:

$$p = A \left(1 - \frac{w}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{w}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{wE}{V} \quad (2)$$

که A ، B ، R_1 ، R_2 و w پارامترهای ورودی هستند. این معادله حالت معمولاً برای برهم کنش بین فلزات با فشار حاصل از انفجار توصیه می شود. متغیرهای ورودی این معادله حالت برای ماده منفجره C۴ در جدول ۱ ارائه شده است.

لازم به ذکر است در شبیه سازی های انجام شده قدرت چاشنی الکتریکی معادل ۰/۶ گرم ماده منفجره C۴ در نظر گرفته شده است.

۳-۲- انتخاب مدل های مادی و معادلات حالت

برای بدست آوردن نتایج مطلوب در شبیه سازی، انتخاب مدل مادی و معادله حالت مناسب برای تعریف خواص مواد از اهمیت ویژه ای برخوردار است. مدل های مادی رفتار تنش-کرنش و سیلان ماده را بیان می کنند و معادلات حالت ارتباط فشار را با تغییر حجم یا دانسیته نشان می دهند. در اغلب مسائل ضربه از قبیل نفوذ و انفجار که با انتشار موج شاک همراه است، به دلیل تراکم پذیری مواد، علاوه بر مدل های مادی، معادلات حالت نیز استفاده می شوند. در ادامه، معادلات حالت و استحکام به کار رفته به اختصار توضیح داده شده اند.

۳-۲-۱- هوا

برای هوا از معادله حالت گاز ایده آل استفاده شده است که به شکل زیر بیان می شود [۱۹ و ۲۰]:

$$p = 0.4 \rho e \quad (1)$$

که p فشار، ρ چگالی و e انرژی داخلی و برابر $e = \gamma \gamma T / \gamma T$ می باشد که T معرف دما است.

4 Jons-Wilkins-Lee EOS (JWL)

به صورت مستقل انجام می‌شود، ضریب پواسون در این مدل برابر صفر فرض می‌گردد

$$\text{if: } \sigma_i^{*,n+1} \geq \sigma_i^{\text{compaction}}(\varepsilon_v) \rightarrow \sigma_i^{n+1} = \sigma_i^{\text{compaction}}(\varepsilon_v) \frac{\sigma_i^{*,n+1}}{|\sigma_i^{*,n+1}|} \quad (6)$$

کرنش حجمی نیز از طریق رابطه (۷) بدست می‌آید:

$$\varepsilon_v = \ln\left(\frac{V_0}{V}\right) \quad (7)$$

در رابطه بالا V_0 حجم اولیه و V حجم پس از انجام تغییر شکل است. چون این مدل ماده معیاری برای خرابی و حذف المان ندارد از تکنیک فرسایش^۲ المان کرنش هندسی^۳ استفاده شده است. کرنش هندسی مقداری از تغییر شکل المان است که از طریق محاسبه مؤلفه‌های اصلی کرنش بدست می‌آید و عبارتست از:

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{2}{3} \left[\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{yy}^2 - \varepsilon_{xx} \varepsilon_{yy} + 3\varepsilon_{xy}^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

این نوع تنظیم خوردگی به نرم‌افزار اجازه می‌دهد زمانی که مقدار کرنش هندسی یک المان محلی از یک مقدار خاص بیش‌تر شد برداشته و حذف شود [۱۹، ۲۳، ۲۴].

۳-۲-۴- ورق آلومینیومی

برای ورق آلومینیومی، از معادله حالت شوک و معادله استحکام جانسون-کوک استفاده شده است. معادله حالت شوک برای مدل‌سازی شرایط شوک در کرنش‌های بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد که به صورت رابطه (۹) می‌باشد [۱۹]:

Table 1. JWL equation-of-state parameters for C4 explosive [21]

جدول ۱: پارامترهای معادله حالت JWL برای ماده منفجره C۴ [۲۱]

A (GPa)	B (GPa)	R ₁	R ₂	w
۶۰۹/۷۷	۱۲/۹۵	۴/۵	۱/۴	۰/۲۵

۳-۲-۳- فوم

برای معرفی فوم به نرم‌افزار، از معادله حالت خطی و معادله استحکام فشردگی فوم^۱ استفاده شده است.

در معادله حالت گاز ایده‌آل فشار تابعی از حجم مخصوص و آنتروپی می‌باشد. در بسیاری از موارد تأثیر تغییرات آنتروپی بسیار کم و قابل صرف‌نظر کردن است. بنابراین فشار، تابعی از دانسیته و یا حجم مخصوص می‌باشد. این رابطه به شکل زیر بیان می‌شود [۱۹ و ۲۰]:

$$p = K \left[\left(\rho / \rho_0 \right) - 1 \right] = K \mu \quad (3)$$

که در آن p فشار، K مدول بالک، $\mu = (\rho / \rho_0) - 1$ و ρ / ρ_0 نسبت چگالی ثانویه به چگالی اولیه است.

مدل فشردگی فوم معادله‌ای نسبتاً ساده برای مدل نمودن رفتار فوم‌های خردشونده تحت بارهای ضربه‌ای می‌باشد. در این مدل فشار و تنش بر اساس روابط (۴) و (۵) با توجه به نرخ کرنش اصلاح می‌گردند [۱۹ و ۲۲]:

$$P^{n+1} = P^n + K \dot{\varepsilon}_v^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2} \quad (4)$$

$$\sigma_{ij}^{n+1} = \sigma_{ij}^n + 2G \left(\dot{\varepsilon}_{ij}^{n+1/2} - \delta_{ij} \dot{\varepsilon}_v^{n+1/2} \right) \Delta t^{n+1/2} \quad (5)$$

در معادلات بالا P فشار، σ تنش، K مدول بالک، G مدول برشی، δ_{ij} دلتای کروئکر و $\dot{\varepsilon}_v$ نرخ کرنش حجمی می‌باشد. مقدار تنش‌های اصلی بدست آمده در هر المان و در یک کرنش حجمی معین، با تنش فشردگی مجاز مقایسه می‌شود. در صورت تجاوز مقدار تنش اصلی اولیه (در رابطه (۶)) با علامت ستاره مشخص شده است) از ماکزیمم مقدار مجاز، تنش به مقدار مجاز بازگردانده می‌شود. از آن‌جا که این عمل در هر یک از جهت‌های اصلی

2 Erosion
3 Geometric Strain

1 Crushable Foam

Table 3. Johnson-Cook parameters for 6061-T6 [27]

جدول ۳: مقادیر پارامترهای مدل جانسون-کوک برای آلومینیوم ۶۰۶۱-T6 [۲۷]

A (MPa)	B (MPa)	n	C	m	$\dot{\epsilon}_0$ (1/s)
۳۲۴/۱	۱۱۳/۸	۰/۴۲	۰/۰۰۲	۱/۳۴	۱

$$\sigma = [A + B \epsilon_p^n] [1 + C \ln \dot{\epsilon}_p^*] [1 - T^{*m}] \quad (۱۳)$$

که A، B، C، m و ثابت ماده، T^* نرم‌شوندگی حرارتی، ϵ_p کرنش

پلاستیک مؤثر، $\dot{\epsilon}_p^*$ برابر $\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0$ می‌باشد که $\dot{\epsilon}_0$ نرخ کرنشی است که ثابت ماده در آن نرخ کرنش بدست می‌آیند و به عنوان نرخ کرنش مرجع معرفی می‌شود. پارامترهای مدل فوق برای آلومینیوم T6-۶۰۶۱ در جدول ۳ ارائه شده است.

۳-۲-۵- لوله شاک

برای لوله شاک از معادله حالت خطی و معادله استحکام جانسون-کوک استفاده شده است. پارامترهای ورودی برای فولاد ۴۳۴۰ در جدول ۴ ارائه شده است.

نتایج و بحث

برای اطمینان بیش‌تر از صحت روند شبیه‌سازی عددی از مرجع [۱۲] استفاده شده است. در این مطالعه پانل‌های ساندویچی با هسته فومی تحت بار انفجاری حاصل از مقادیر مختلف ماده منفجره قرار گرفته و ماکزیمم جابجایی رویه جلویی و پشتی اندازه‌گیری شده است. چگالی و ضخامت هسته پانل‌ها یکسان می‌باشد. به دلیل تقارن محوری مسئله، مدل‌سازی به‌صورت دوبعدی و متقارن محوری انجام شده است. در جدول ۵ نتایج تجربی [۱۲] و نتایج عددی بدست آمده ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج تجربی و عددی با خطای نسبتاً کمی هم‌خوانی دارند. آزمایش‌های تجربی سازه ساندویچی تحت بار انفجاری، در سه چگالی متفاوت برای فوم پلی‌یورتان انجام شده که در جدول ۶ مقادیر آن‌ها آمده است. نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی، برای ماکزیمم جابجایی رویه جلویی و پشتی، به ترتیب در جداول ۷ و ۸ ارائه

Table 2. Shock equation-of-state parameters for Al 6061-T6 [25]

جدول ۲: پارامترهای معادله حالت شوک برای آلومینیوم T6-۶۰۶۱ [۲۵]

Γ	c_0 (m/s)	s
۱/۹۷	۵۲۴۰	۱/۴

$$p = p_H + \Gamma \rho (e - e_H) \quad (۹)$$

که در آن فرض شده که $\Gamma_p = \Gamma_0 \rho_0$

$$p_H = \frac{\rho_0 c_0^2 \mu (1 + \mu)}{[1 - (s - 1)\mu]^2} \quad (۱۰)$$

$$e_H = \frac{1}{2} \frac{p_H}{\rho_0} \left(\frac{\mu}{1 + \mu} \right) \quad (۱۱)$$

که Γ پارامتر مای-گرونایزن، $\mu = (\rho / \rho_0) - 1$ ، ρ / ρ_0 نسبت چگالی ثانویه به چگالی اولیه، c_0 سرعت صوت بالک و s شیب نمودار هوگونویوت می‌باشد:

$$U_s = c + s U_p \quad (۱۲)$$

که، U_s سرعت موج شوک و U_p سرعت ذره می‌باشد. متغیرهای ورودی این معادله حالت برای آلومینیوم T6-۶۰۶۱ در جدول ۲ ارائه شده است.

معادله استحکام جانسون-کوک برای بیان رفتار مواد، در حالتی که تحت تأثیر کرنش بالا، تنش بالا و دمای بالا قرار می‌گیرند به کار می‌رود. این‌گونه رفتار در برخوردهای سرعت بالا و مواد منفجره اتفاق می‌افتد. در این مدل تنش تسلیم با تغییر کرنش، نرخ کرنش و دما تغییر می‌کند. در این مدل تنش سیلان مطابق رابطه (۱۳) می‌باشد [۱۹ و ۲۶].

Table 4. Johnson-Cook parameters for AISI 4340 [28]

جدول ۴: مقادیر پارامترهای مدل جانسون-کوک برای فولاد ۴۳۴۰ [۲۸]

A (MPa)	B (MPa)	n	C	m	$\dot{\epsilon}_0(1/s)$
۷۹۲	۵۱۰	۰/۲۶	۰/۰۱۴	۱/۰۳	۱

Table 5. Comparison of the experimental [12] and numerical results

جدول ۵: مقایسه نتایج تجربی [۱۲] با نتایج عددی انجام شده

ماکزیمم جابجایی رویه پشتی			ماکزیمم جابجایی رویه جلویی			مقدار ماده منفجره (g)
خطا (درصد)	تجربی [۱۲]	عددی	خطا (درصد)	تجربی [۱۲]	عددی	
۳/۵	۵/۷	۵/۹	۵	۱۰	۹/۵	۲
۵/۲	۹/۶	۹/۱	۶/۱	۱۳/۱	۱۲/۳	۳
۶/۲	۱۱/۳	۱۲	۴/۹	۱۶/۱	۱۵/۳	۵
۷/۷	۱۴/۳	۱۳/۲	۱۵/۴	۱۴/۹	۱۷/۲	۷

Table 7. Comparison of the experimental and numerical results- maximum displacement of front face-sheet

جدول ۷: مقایسه نتایج تجربی و عددی - ماکزیمم جابجایی رویه جلویی

درصد اختلاف	ماکزیمم جابجایی رویه جلویی (میلی متر)		نمونه
	تجربی	عددی	
۳/۷	۴۳/۴	۴۵	۱
۲/۸	۲۸/۲	۲۹	۲
۱۰	۱۴	۱۵/۴	۳

Table 6. Specifications of prepared specimens for experimental investigations

جدول ۶: مشخصات نمونه‌های تهیه شده برای آزمایش‌های تجربی

نمونه	نسبت چگالی فوم (درصد)
۱	۴
۲	۸
۳	۱۲

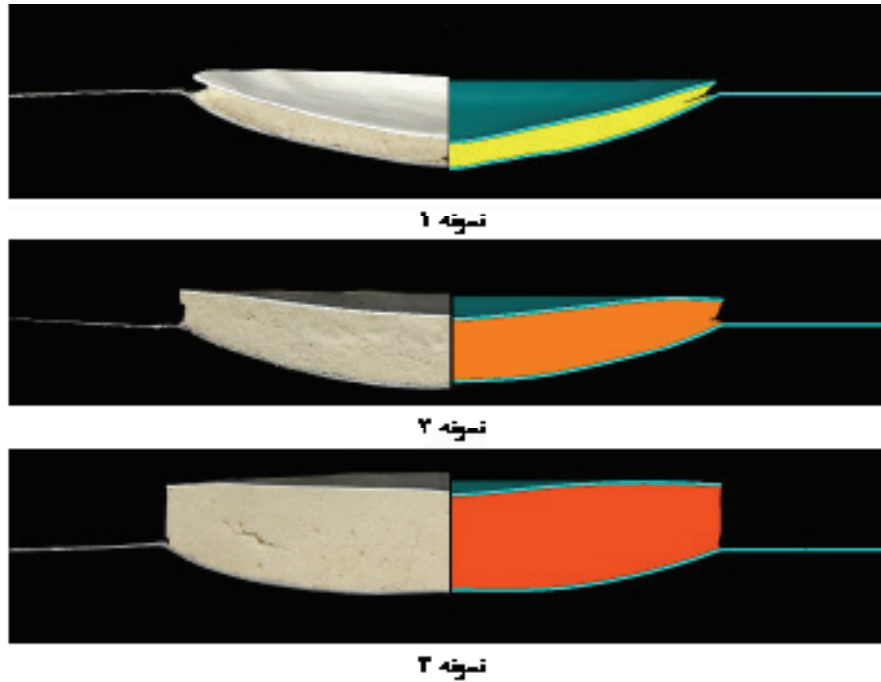
و مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بین نتایج آزمایش‌های تجربی و عددی هم‌خوانی قابل قبولی برقرار است.

به منظور مقایسه بهتر نتایج تجربی و عددی، نمونه‌های تجربی برش داده شده و سطح مقطع عرضی آن‌ها در کنار مدل‌های شبیه‌سازی قرار داده شده و در شکل ۱۰ نمایش داده شده‌اند. این شکل نیز نشان‌دهنده تطابق خوب بین نتایج تجربی و عددی می‌باشد. اختلاف بین نتایج عددی و تجربی به این دلیل است که خواص فوم‌های استفاده شده مقدار اندکی غیریکنواختی داشته، و در نتیجه خواص فوم‌های استفاده شده در تست‌های تجربی با خواصی که از آزمایش فشار بر روی نمونه‌های فوم بدست آمده و

Table 8. Comparison of the experimental and numerical results- maximum displacement of back face-sheet

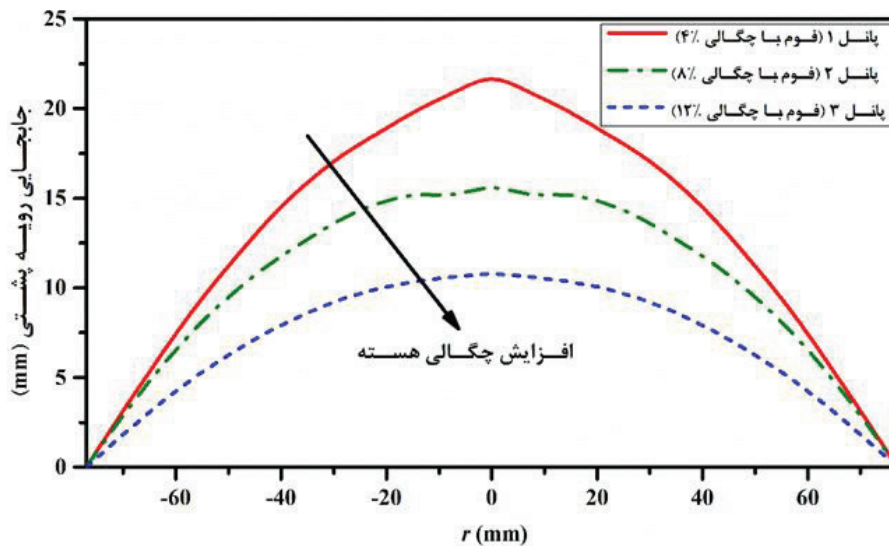
جدول ۸: مقایسه نتایج تجربی و عددی - ماکزیمم جابجایی رویه پشتی

درصد اختلاف	ماکزیمم جابجایی رویه پشتی (میلی متر)		نمونه
	تجربی	عددی	
۴/۴	۲۰/۵	۲۱/۴	۱
۸/۲	۱۷	۱۵/۶	۲
۱/۹	۱۰/۶	۱۰/۸	۳



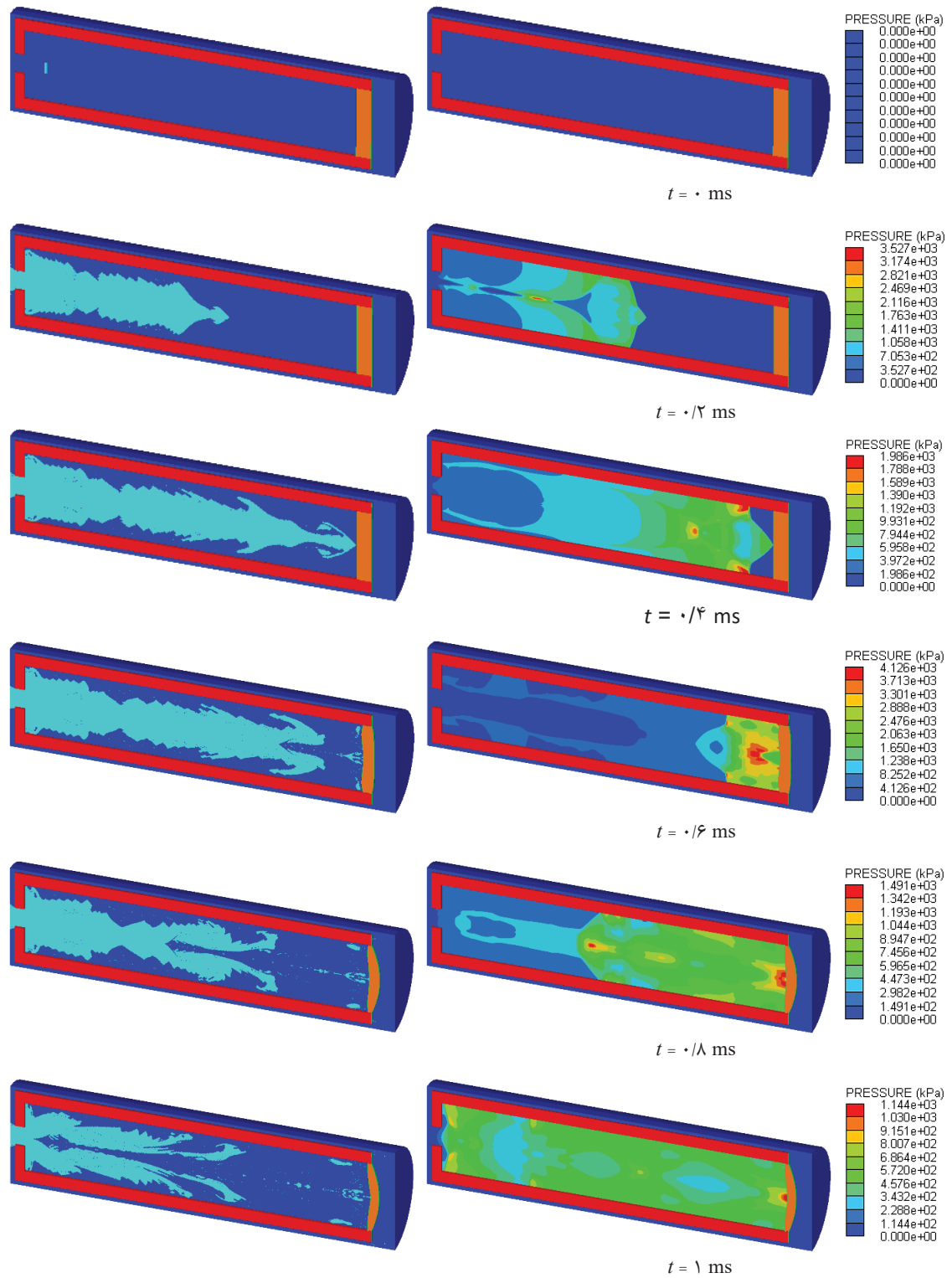
شکل ۱۰: مقایسه سطح مقطع عرضی نمونه‌های تجربی با مدل‌های شبیه‌سازی عددی

Fig.10. Comparison of experimental specimens cross sections with numerical simulation models



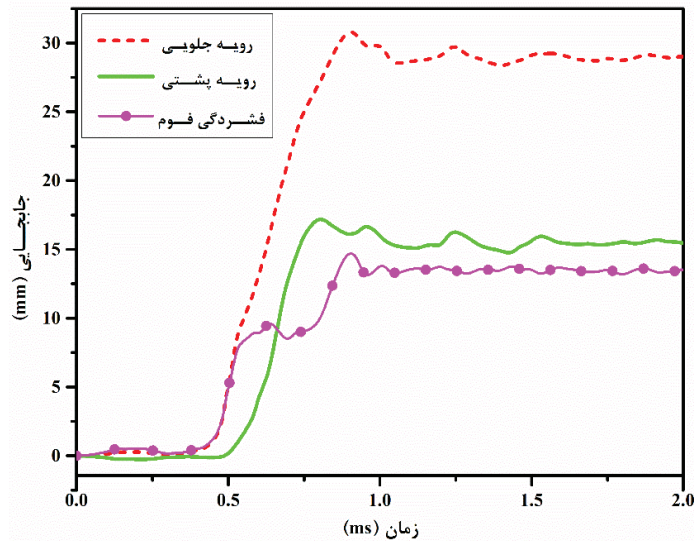
شکل ۱۱: نمودار فشار-زمان حاصل از ۴ گرم ماده منفجره C۴ در مرکز پانل ساندویچی

Fig.11. Pressure-time curve due to 4g C4 explosive material in the center of the sandwich panel



شکل ۱۲: توزیع فشار (سمت راست) و نحوه انتشار محصولات (سمت چپ) حاصل از انفجار

Fig.12. Pressure distribution (right) and product release (left) resulting from the explosion



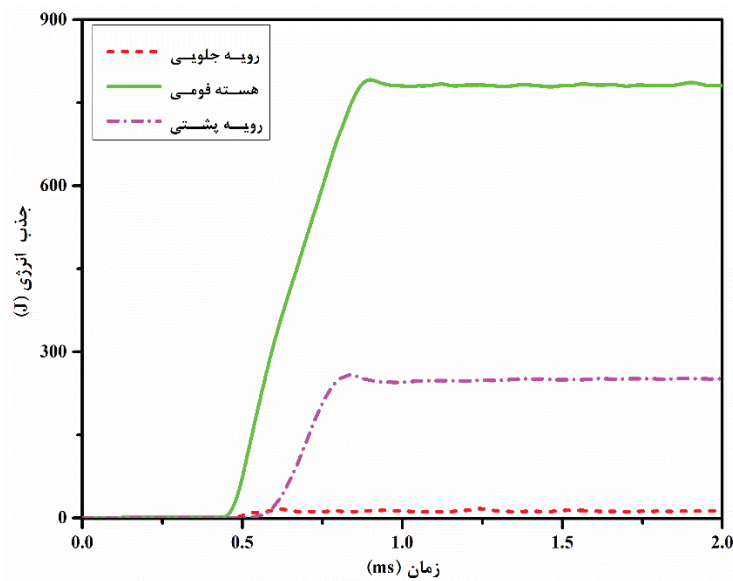
شکل ۱۳: تاریخچه زمانی جابجایی مرکز رویه‌های جلویی و پشتی و فشرده‌گی هسته پانل ساندویچی شماره ۲

Fig.13. Time history of central displacement of back face-sheet and crushing the sandwich panel foam core of the specimen 2

جلویی و پشتی محاسبه شده است. با توجه به شکل، قابلیت فشرده‌گی هسته فومی به طور قابل توجهی جابجایی عرضی رویه پشتی را کاهش داده است. همچنین پس از بیشینه مقدار جابجایی، نوساناتی جزئی در رویه‌های جلویی و پشتی مشاهده می‌شود، که در نهایت به یک مقدار ثابت همگرا می‌گردند. لازم بذکر است که چنین نموداری برای سایر پانل‌ها نیز روند مشابهی را دارد و به همین دلیل از آوردن نمودار برای بقیه پانل‌ها صرف‌نظر شده است. در شکل ۱۴ تاریخچه زمانی جذب انرژی رویه‌های جلویی و پشتی و هسته فومی برای پانل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سهم جذب انرژی رویه جلویی کم‌تر از رویه پشتی است که دلیل آن متفاوت بودن شرط مرزی آن‌ها می‌باشد. شرط مرزی رویه جلویی آزاد است و می‌تواند آزادانه به همراه هسته به سمت عقب حرکت کند و به همین دلیل تغییر شکل کم‌تری در آن رخ داده و در نتیجه جذب انرژی آن کم‌تر خواهد بود. با توجه به شکل، تا قبل از زمان $0/6$ میلی‌ثانیه رویه جلو و هسته مقداری از انرژی را جذب کرده‌اند، در حالی که رویه پشتی تقریباً هیچ سهمی در جذب انرژی ندارد و جذب انرژی در آن پس از زمان $0/6$ میلی‌ثانیه آغاز می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار انرژی جذب شده در هر سه جزء پانل با گذشت زمان افزایش یافته و در نهایت به یک مقدار ثابت همگرا می‌گردد. لازم به ذکر است که چنین نموداری برای سایر پانل‌ها نیز روند مشابهی دارد و به همین دلیل از آوردن نمودار برای بقیه پانل‌ها صرف‌نظر شده و در ادامه

در شبیه‌سازی استفاده شده، اندکی تفاوت داشته است. شکل ۱۱ نمودار فشار-زمان حاصل از ۴ گرم ماده منفجره C۴ را نشان می‌دهد که بر مرکز پانل ساندویچی وارد می‌شود. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، بیشینه فشار ناشی از موج انفجار در مرکز پانل برابر با $10/8$ مگاپاسکال می‌باشد و در زمان $0/48$ میلی‌ثانیه اتفاق می‌افتد. در شکل ۱۲ توزیع فشار و نحوه انتشار محصولات حاصل از انفجار ۴ گرم ماده منفجره C۴ در فاصله‌های زمانی $0/2$ میلی‌ثانیه و تا زمان 1 میلی‌ثانیه نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود پس از انفجار، موج حاصل از آن از طریق لوله شاک هدایت شده و در زمان $0/4$ میلی‌ثانیه به پانل ساندویچی می‌رسد و باعث تغییر شکل آن می‌شود. همچنین پس از برخورد موج شاک به پانل، موج منعکس شده و به سمت مخالف شروع به حرکت کرده و پس از رسیدن به ابتدای لوله شاک مقداری از آن از سوراخ تعبیه شده برای قرارگیری ماده منفجره خارج شده و مابقی دوباره منعکس شده و به سمت پانل ساندویچی حرکت کرده است. پس از چندین بار رفت و برگشت موج، فشار آن کاهش یافته و در نهایت مستهلک می‌شود.

در شکل ۱۳ تاریخچه زمانی جابجایی مرکز رویه‌های جلویی و پشتی و همچنین فشرده‌گی هسته برای یک نمونه از پانل‌ها (پانل شماره ۲) نشان داده شده است. فشرده‌گی هسته فوم از اختلاف بین جابجایی عرضی مرکز رویه



شکل ۱۴: تاریخچه زمانی جذب انرژی رویه‌های جلویی و پشتی و هسته پانل ساندویچی شماره ۲

Fig.14. Time history of the energy absorption of front face-sheet, back face-sheet and foam core of sandwich panel of the specimen 2

جذب انرژی بر واحد جرم سازه دارای هسته ۱۱/۲ درصد نسبت به سازه بدون هسته افزایش یافته است.

برای مقایسه جذب انرژی در اجزاء پانل‌های ساندویچی مختلف از مقدار نهایی انرژی جذب شده در هر جزء استفاده شده است.

۳-۴- تأثیر چگالی هسته

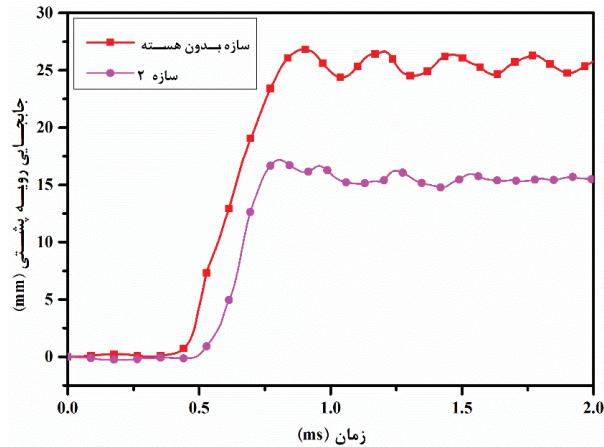
شکل ۱۸ تاریخچه زمانی جابجایی رویه پشتی پانل‌های ساندویچی موردنظر را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش چگالی هسته مقدار ماکزیمم جابجایی و جابجایی پسماند رویه پشتی هر دو کاهش می‌یابند. به عنوان مثال ماکزیمم جابجایی و جابجایی رویه پشتی پانل ساندویچی ۳، هر دو حدوداً ۴۹ درصد کم‌تر از مقادیر متناظر برای پانل ساندویچی ۱ می‌باشند. همچنین همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود نوسانات رویه‌ها با افزایش چگالی هسته افزایش می‌یابد، که به دلیل افزایش مدول الاستیسیته فوم و کاهش اثر مستهلک کننده آن می‌باشد.

در شکل ۱۹ پروفیل تغییر شکل پسماند رویه پشتی پانل‌های ساندویچی مختلف نسبت به فاصله از مرکز پانل نشان داده شده است. با توجه به شکل، با افزایش چگالی فوم علاوه بر این که تغییر شکل رویه پشتی پانل کاهش یافته، پروفیل آن نیز یکنواخت‌تر شده است.

در شکل ۲۰ میزان انرژی جذب شده در اجزاء پانل‌های مورد بررسی گزارش شده است. با توجه به شکل با افزایش چگالی هسته مقدار انرژی

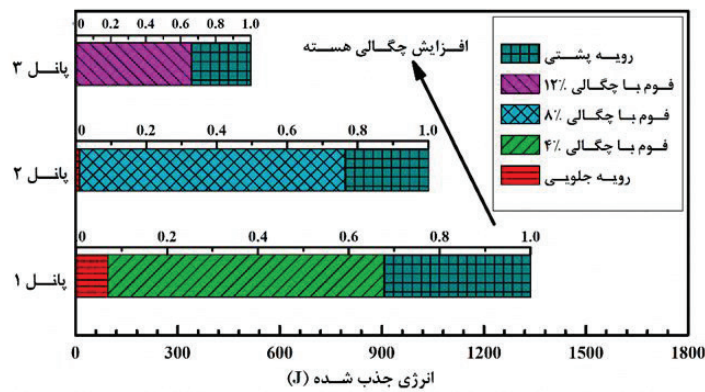
۳-۳- تأثیر وجود هسته فومی

اگر هسته فوم از سازه ساندویچی حذف شود تنها دو صفحه باقی می‌ماند. با بررسی جابجایی رویه پشتی و جذب انرژی این دو صفحه و مقایسه آن با یک سازه ساندویچی می‌توان تأثیر هسته را مشاهده نمود. در این‌جا از پانل ساندویچی ۲ برای مقایسه استفاده می‌شود. نتایج عددی مربوط به تاریخچه زمانی جابجایی مرکز رویه پشتی و میزان انرژی جذب شده به ترتیب در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است. با دقت در این شکل‌ها می‌توان متوجه شد که هسته در مقدار جابجایی رویه پشتی و میزان جذب انرژی اثر بسزایی دارد، به‌طوری‌که مقدار ماکزیمم جابجایی رویه پشتی سازه ساندویچی کاهش ۳۸/۶ درصدی و جذب انرژی آن افزایش ۷۲/۸ درصدی را نشان می‌دهد. همچنین همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود نوسانات رویه پس از بیشینه مقدار جابجایی، در حالتی که دارای هسته است، کم‌تر از حالتی است که فاقد هسته می‌باشد، که به دلیل اثرات مستهلک کننده فوم می‌باشد. در شکل ۱۷ نیز جذب انرژی بر واحد جرم دو سازه نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود،



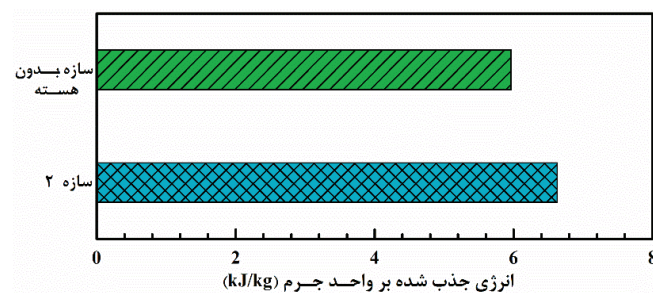
شکل ۱۵: تاریخچه زمانی جابجایی مرکز رویه پشتی سازه بدون هسته و سازه ساندویچی شماره ۲

Fig.15. Time history of the central displacement of back face-sheet of coreless structure and sandwich panel of the specimen 2



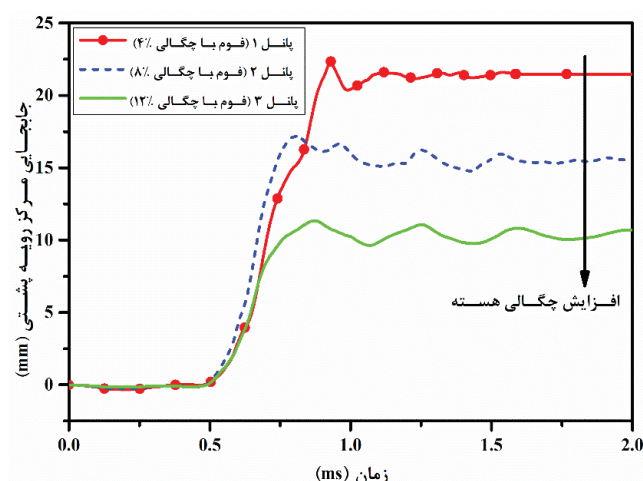
شکل ۱۶: میزان جذب انرژی در اجزاء سازه بدون هسته و سازه ساندویچی شماره ۲

Fig.16. The amount of the energy absorption by different components of coreless structure and sandwich panel of the specimen 2



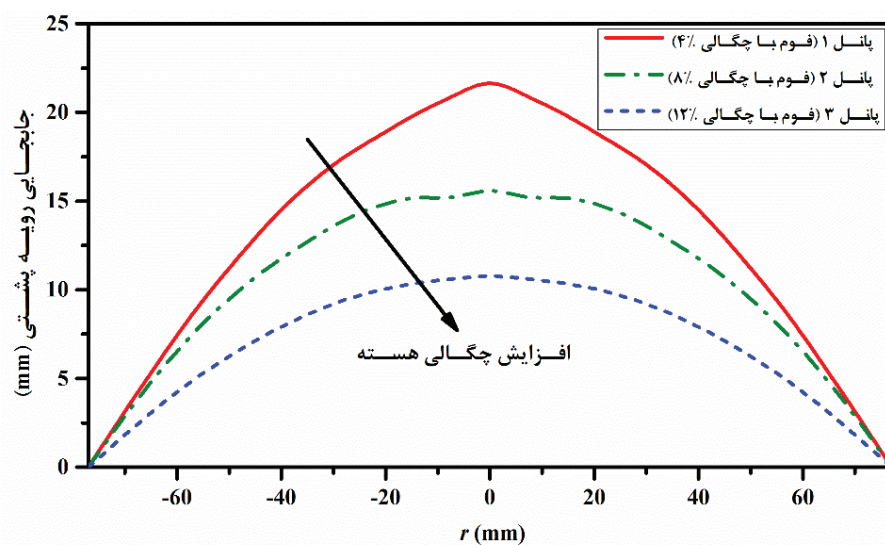
شکل ۱۷: میزان کلی انرژی جذب شده بر واحد جرم در سازه بدون هسته و سازه ساندویچی شماره ۲

Fig.17. The total energy absorbed per unit mass of coreless structure and sandwich panel of the specimen 2



شکل ۱۸: تاریخچه زمانی جابجایی رویه پشتی سازه‌های در نظر گرفته شده برای بررسی اثر چگالی هسته

Fig.18. Time history of the displacement of back face-sheet structures intended to investigate the effect of the core density

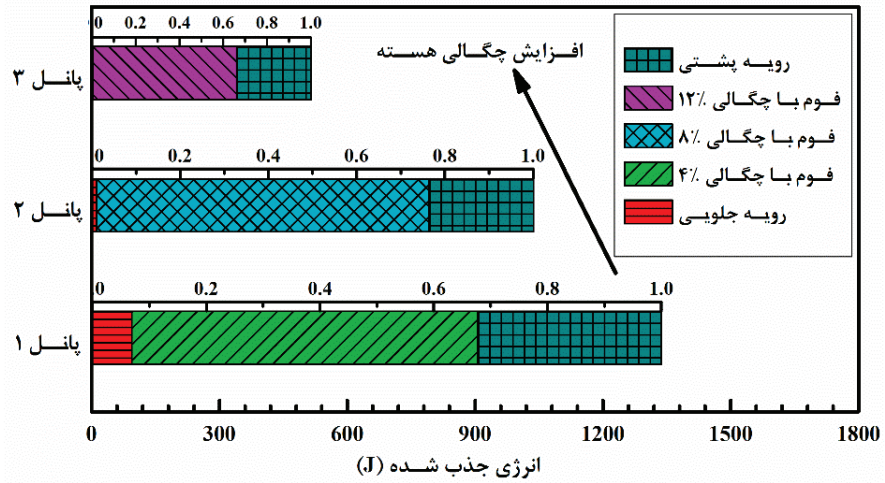


شکل ۱۹: پروفیل تغییر شکل پسماند رویه پشتی نسبت به فاصله از مرکز برای سازه‌های در نظر گرفته شده برای بررسی اثر چگالی هسته

Fig.19. The permanent back face-sheet deflection versus central distance profile intended to investigate the effect of the core density

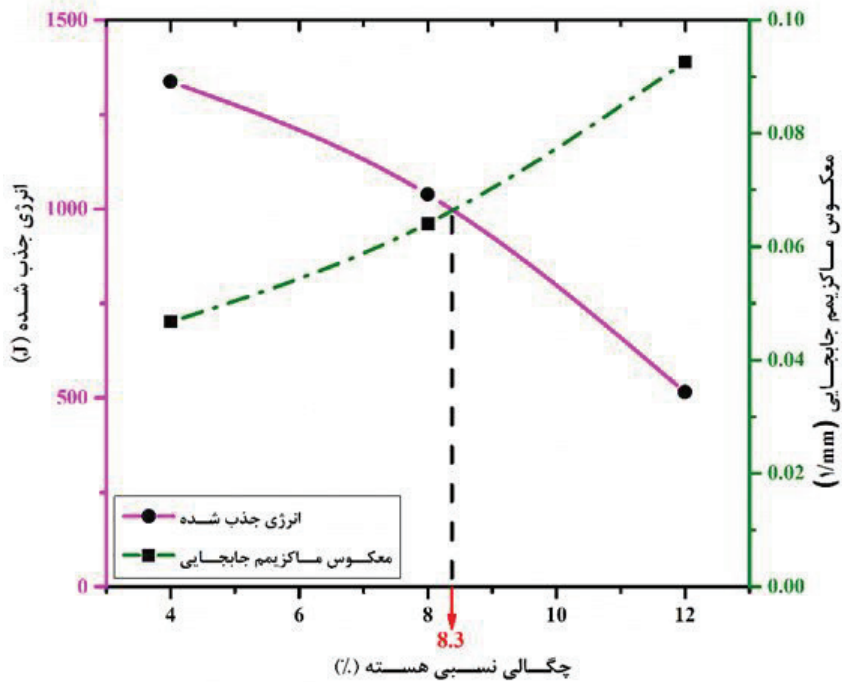
می‌دهد. بنابراین باید با توجه به نوع کاربرد پانل ساندویچی، فوم با چگالی مناسب را انتخاب کرد. به این صورت که اگر پانل ساندویچی به عنوان سازه اصلی باشد، مقدار جابجایی رویه پشتی اهمیت داشته و بهتر است که از فوم با چگالی بالا استفاده گردد، ولی در صورتی که نیاز است پانل به عنوان سازه فناشونده بر روی یک سازه دیگر نصب شود، مقدار انرژی جذب شده توسط

جذب شده توسط رویه‌ها و هسته و همچنین مقدار کلی انرژی جذب شده کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج بدست آمده مشخص است که با افزایش چگالی فوم، جابجایی رویه پشتی به علت افزایش صلیبیت خمشی فوم (و در نتیجه پانل) کاهش می‌یابد، در حالی که همین افزایش چگالی سبب کاهش تخلخل فوم شده و توانایی آن را در جذب انرژی ناشی از انفجار کاهش



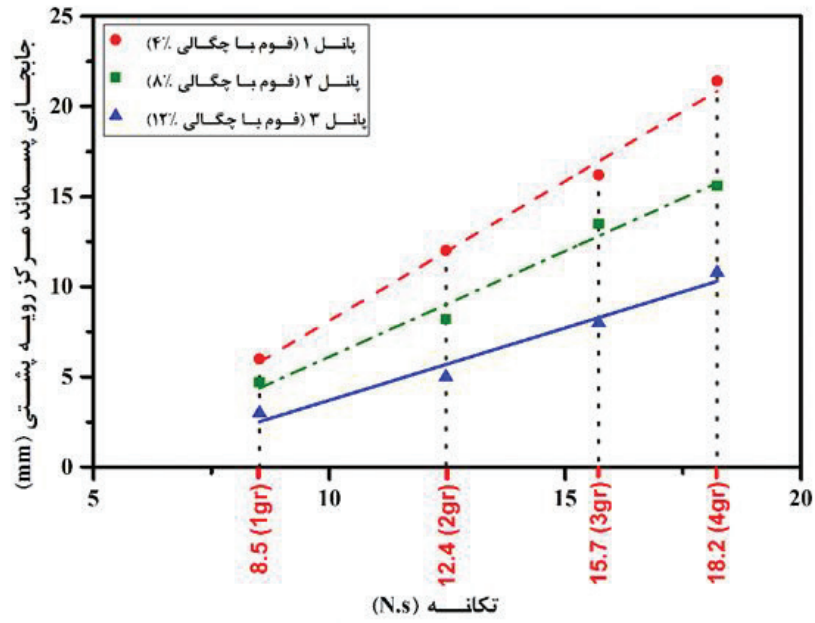
شکل ۲۰: میزان انرژی جذب شده در اجزاء سازه‌های در نظر گرفته شده برای بررسی اثر چگالی هسته

Fig.20. The amount of the absorbed energy by different components of structures intended to investigate the effect of the core density



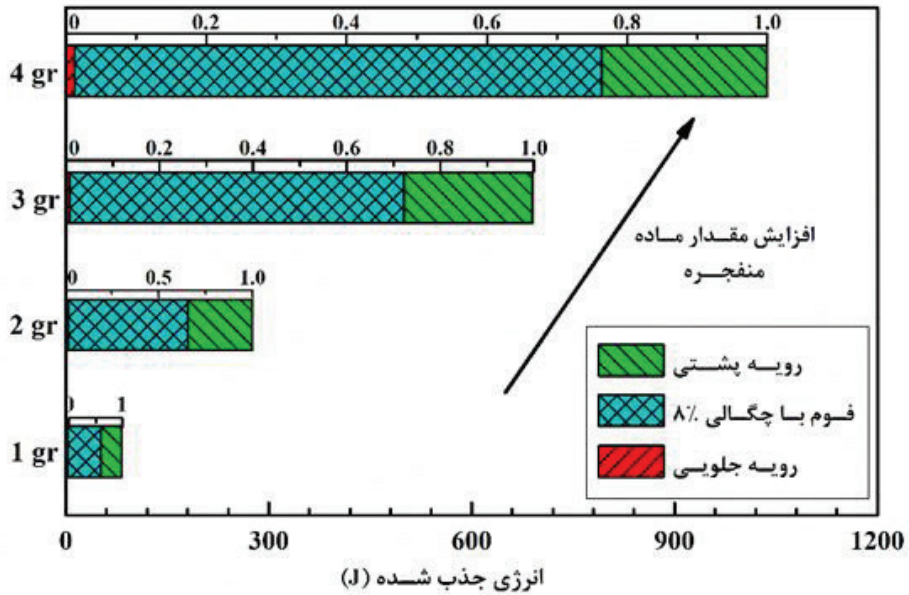
شکل ۲۱: روند تغییرات مقدار انرژی جذب شده و معکوس ماکزیمم جابجایی رویه پشتی پانل برحسب تغییر چگالی هسته

Fig21. Trend of the absorbed energy and reversed maximum displacement of the back face-sheet versus the core density changes



شکل ۲۲: مقدار جابجایی پسماند مرکز رویه پشتی پانل‌های ساندویچی برحسب تکانه وارد شده

Fig.22. The amount of the permanent central displacement of the back face-sheet versus impulse



شکل ۲۳: میزان انرژی جذب شده در اجزاء پانل ساندویچی ۲ تحت مقادیر ماده منفجره مختلف

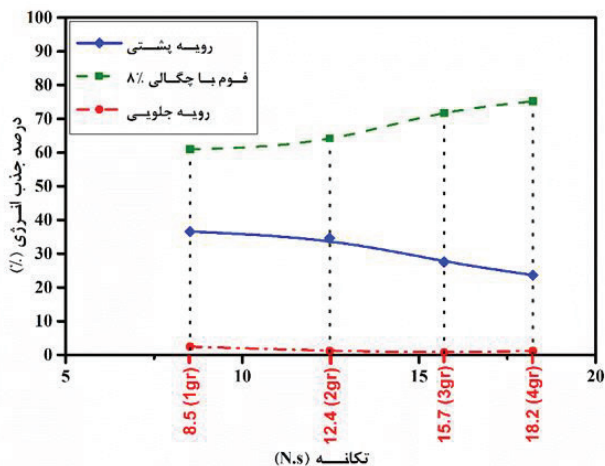
Fig.23. The amount of the absorbed energy by different components of sandwich panel of the specimen 2 under different explosive amounts

فوم استخراج شده و مطالعات پارامتری عددی صورت گرفته است که نتایج عددی بدست آمده تطابق خوبی با نتایج تجربی نشان می‌دهند. با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی میزان جذب انرژی در پانل‌های ساندویچی بدست آمده است. نتایج حاصل به شرح زیر می‌باشد:

هسته فوم پلی‌یورتان در مقدار جابجایی رویه پشتی پانل و جذب انرژی آن اثر چشمگیری دارد.

با افزایش چگالی هسته فوم پلی‌یورتان در سازه ساندویچی، مقدار ماکزیمم جابجایی رویه پشتی کمتر می‌شود، ولی مقدار انرژی جذب شده نیز کاهش می‌یابد. این موضوع نشان‌دهنده این نکته است که در صورت استفاده از پانل ساندویچی به عنوان سازه اصلی، افزایش چگالی نتیجه‌ای مثبت خواهد داشت؛ ولی اگر قرار است که پانل به عنوان جاذب بر روی یک سازه اصلی نصب گردد و نقش سازه فناشونده داشته باشد، بهتر است که چگالی خیلی زیاد نباشد. در صورتی که نیاز باشد تا بین مقدار ماکزیمم جابجایی رویه پشتی و مقدار جذب انرژی تعادل برقرار کرد، می‌توان از فوم پلی‌یورتان با چگالی ۸/۳ درصد استفاده کرد.

تغییرات جابجایی مرکز رویه پشتی برحسب تکانه وارده به صورت خطی می‌باشد و با افزایش تکانه سهم انرژی جذب شده توسط هسته افزایش یافته، ولی سهم جذب انرژی رویه‌ها کاهش می‌یابد.



شکل ۲۴: درصد انرژی جذب شده در اجزاء پانل ساندویچی ۲ تحت مقادیر ماده منفجره مختلف

Fig.24. The percent of absorbed energy by different components of sandwich panel of the specimen 2 under different explosive amounts

پانل مهم بوده و باید از فوم با چگالی پایین‌تر استفاده گردد تا فشار منتقل شده به پشت پانل کاهش یابد. البته می‌توان با انتخاب فوم با چگالی مناسب، بین مقدار جذب انرژی و جابجایی سطح پشتی پانل تعادل برقرار کرد. در شکل ۲۱ روند تغییرات مقدار انرژی جذب شده و معکوس ماکزیمم جابجایی سطح پشتی پانل برحسب تغییر چگالی فوم نشان داده شده است. با توجه به شکل حدوداً در چگالی نسبی ۸/۳ درصد نوعی تعادل در مقادیر پارامترهای مذکور برقرار است و با افزایش یا کاهش چگالی در حالی که یکی از پارامترها بهبود می‌یابد، پارامتر دیگر دچار ضعف می‌گردد.

۳-۵- تأثیر مقدار ماده منفجره (تکانه)

در این قسمت به بررسی اثر مقدار تکانه وارد شده، بر جابجایی رویه پشتی و میزان جذب انرژی سازه پرداخته می‌شود. برای این منظور سازه‌های ساندویچی گروه اول و دوم در برابر چهار مقدار مختلف ماده منفجره ۱، ۲، ۳ و ۴ گرم در نظر گرفته شده‌اند. در شکل ۲۲ مقدار جابجایی پسماند مرکز رویه پشتی پانل‌های ساندویچی برحسب مقدار تکانه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تغییرات جابجایی پسماند مرکز رویه پشتی برحسب تکانه وارده در چگالی‌های مختلف هسته به صورت خطی می‌باشد و همچنین با افزایش چگالی، شیب تغییرات جابجایی رویه پشتی کاهش می‌یابد. این موضوع بیانگر این است که حساسیت جابجایی رویه پشتی برحسب تکانه با افزایش چگالی کاهش می‌یابد.

در شکل ۲۳ میزان انرژی جذب شده در اجزاء پانل ساندویچی ۲ تحت مقدار ماده منفجره مختلف و در شکل ۲۴ این مقادیر به صورت درصدی از انرژی کل جذب شده گزارش شده است. با توجه به شکل ۲۳ با افزایش مقدار ماده منفجره مقدار انرژی جذب شده توسط رویه‌ها و هسته و همچنین مقدار کلی انرژی جذب شده، افزایش می‌یابد. همچنین مطابق شکل ۲۴ سهم انرژی جذب شده توسط هسته با افزایش تکانه افزایش یافته، ولی سهم جذب انرژی رویه‌ها کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که مقدار تکانه برای هر مقدار ماده منفجره از حاصل ضرب سطح زیر منحنی فشار-زمان در مساحت سطحی که فشار بر روی آن وارد شده، محاسبه شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله با تعریف تعدادی آزمایش انفجاری بر روی پانل ساندویچی با رویه ورق آلومینیومی و هسته فوم پلی‌یورتان، مطالعاتی بر روی تأثیر چگالی فوم بر مقدار جابجایی سطح پشتی سازه ساندویچی انجام شده است. همچنین، به کمک آزمایش‌های فشار محوری بر روی فوم، خواص مکانیکی

- metallic foam and honeycomb core sandwich panels to blast loading, *Composite structures*, 92(10) (2010) 2465-2475.
- [10] D. Karagiozova, G. Nurick, G. Langdon, S.C.K. Yuen, Y. Chi, S. Bartle, Response of flexible sandwich-type panels to blast loading, *Composites Science and Technology*, 69(6) (2009) 754-763.
- [11] J. Shen, G. Lu, Z. Wang, L. Zhao, Experiments on curved sandwich panels under blast loading, *International Journal of Impact Engineering*, 37(9) (2010) 960-970.
- [12] M. Hassan, Z. Guan, W. Cantwell, G. Langdon, G. Nurick, The influence of core density on the blast resistance of foam-based sandwich structures, *International Journal of Impact Engineering*, 50 (2012) 9-16.
- [13] M. Yazici, J. Wright, D. Bertin, A. Shukla, Experimental and numerical study of foam filled corrugated core steel sandwich structures subjected to blast loading, *Composite structures*, 110 (2014) 98-109.
- [14] C. Uday, C.S.T. Varma, B.N.K. Varma, M. Ramya, K. Padmanabhan, The influence of rigid foam density on the flexural properties of glass fabric/epoxy-polyurethane foam sandwich composites, *International Journal of ChemTech Research*, 6(6) (2014) 3314-3317.
- [15] M. Doğru, İ. Güzelbey, Investigation of the impact effects of thermoplastic polyurethane reinforced with multi-walled carbon nanotube for soldier boot under the blast load, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, (2018) 0892705717734599.
- [16] P. Zhang, Y. Cheng, J. Liu, Y. Li, C. Zhang, H. Hou, C. Wang, Experimental study on the dynamic response of foam-filled corrugated core sandwich panels subjected to air blast loading, *Composites Part B: Engineering*, 105 (2016) 67-81.
- [1] M.F. Ashby, T. Evans, N.A. Fleck, J. Hutchinson, H. Wadley, L. Gibson, *Metal foams: a design guide*, Elsevier, 2000.
- [2] S. Guruprasad, A. Mukherjee, Layered sacrificial claddings under blast loading Part I—analytical studies, *International Journal of Impact Engineering*, 24(9) (2000) 957-973.
- [3] S. Guruprasad, A. Mukherjee, Layered sacrificial claddings under blast loading Part II—experimental studies, *International Journal of Impact Engineering*, 24(9) (2000) 975-984.
- [4] A. Hanssen, L. Enstock, M. Langseth, Close-range blast loading of aluminium foam panels, *International Journal of Impact Engineering*, 27(6) (2002) 593-618.
- [5] G. Ma, Z. Ye, Energy absorption of double-layer foam cladding for blast alleviation, *International Journal of Impact Engineering*, 34(2) (2007) 329-347.
- [6] Y.A. Bahei-El-Din, G.J. Dvorak, O.J. Fredricksen, A blast-tolerant sandwich plate design with a polyurea interlayer, *International Journal of Solids and Structures*, 43(25-26) (2006) 7644-7658.
- [7] G. Nurick, G. Langdon, Y. Chi, N. Jacob, Behaviour of sandwich panels subjected to intense air blast—Part 1: Experiments, *Composite Structures*, 91(4) (2009) 433-441.
- [8] D. Karagiozova, G. Nurick, G. Langdon, Behaviour of sandwich panels subject to intense air blasts—Part 2: Numerical simulation, *Composite Structures*, 91(4) (2009) 442-450.
- [9] M. Theobald, G. Langdon, G. Nurick, S. Pillay, A. Heyns, R. Merrett, Large inelastic response of unbonded

- Zerbino, G. Giaccio, M. Torrijos, Experimental and numerical analysis of blast response of High Strength Fiber Reinforced Concrete slabs, *Engineering Structures*, 175 (2018) 113-122.
- [24] P. Tan, Ballistic protection performance of curved armor systems with or without debondings/delaminations, *Materials & Design*, 64 (2014) 25-34.
- [25] D. Steinberg, Equation of state and strength properties of selected materials, (1996).
- [26] G.R. Johnson, W.H. Cook, Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures, *Engineering fracture mechanics*, 21(1) (1985) 31-48.
- [27] A. Sharma, R. Mishra, S. Jain, S.S. Padhee, P.K. Agnihotri, Deformation behavior of single and multi-layered materials under impact loading, *Thin-Walled Structures*, 126 (2018) 193-204.
- [28] T. Mabrouki, J.-F. Rigal, A contribution to a qualitative understanding of thermo-mechanical effects during chip formation in hard turning, *Journal of Materials Processing Technology*, 176(1-3) (2006) 214-221.
- [17] J.P. Dear, E. Rolfe, M. Kelly, H. Arora, P.A. Hooper, Blast performance of composite sandwich structures, *Procedia engineering*, 173 (2017) 471-478.
- [18] A. International, Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics, ASTM International, 2010.
- [19] T. AUTODYN, Theory Manual Revision 4.3, Concord, CA: Century Dynamics, in, Inc, 2003.
- [20] Z. Zhu, B. Mohanty, H. Xie, Numerical investigation of blasting-induced crack initiation and propagation in rocks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(3) (2007) 412-424.
- [21] B. Dobratz, LLNL explosives handbook: properties of chemical explosives and explosives and explosive simulants, Lawrence Livermore National Lab., CA (USA), 1981.
- [22] S. Yang, C. Qi, D. Wang, R. Gao, H. Hu, J. Shu, A comparative study of ballistic resistance of sandwich panels with aluminum foam and auxetic honeycomb cores, *Advances in Mechanical Engineering*, 5 (2013) 589216.
- [23] B. Luccioni, F. Isla, R. Codina, D. Ambrosini, R.