



Study on Performance of Sandwich Panel Structures with Honeycomb Core Subjected to Impulsive Loading

M. S. Badkhor¹, M. Hasanzadeh², T. Mirzababaie Mostofi^{1*}

¹ Faculty of Mechanical Engineering, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran.

² Department of Textile Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

ABSTRACT: In this paper, the effect of differed loading conditions, as well as structure geometries on the behavior of sandwich panel structures under uniform impulsive loading, has been investigated. For this, a full 3-Dimensional numerical model by using ABAQUS/Explicit commercial software was employed in order to simulate the dynamic response and plastic deformation of sandwich panel structures with a honeycomb core. The available experimental results were used to validate the numerical model. Afterward, in a rigorous parametric study, the influences of several effective parameters on the resistance of structure such as the front and back metallic layer thicknesses, the number of webs, and thickness of honeycomb core cell wall under three different mass weights of 0.5, 1 and 1.5 kg were studied. In the following, by using response surface methodology, an appropriate equation was developed to predict the central permanent deflection of back and front layers. The obtained results showed that there is a well-agreement between experimental and numerical results predicted by the regression model. The high correlation coefficient between the studied parameters and the structure behavior ($R^2 = 0.99$) indicates that the proposed model has great accuracy.

Review History:

Received: 14 Jun. 2019

Revised: 9 Agu. 2019

Accepted: 2 Sep. 2019

Available Online: 4 Sep. 2019

Keywords:

Impulsive loading

Metallic sandwich panels

Numerical simulation

Response surface methodology.

1. Introduction

Sandwich structures with a core made of porous materials (often honeycomb or aluminum foams), as an emerging protective structure, have the capability of dissipating considerable energy by large plastic deformation. The cellular microstructures offer them with the ability to undergo large plastic deformation at nearly constant nominal stress and thus can absorb a large amount of kinetic energy before collapsing into a more stable configuration or fracture [1-3]. So far, the response of sandwich structures under quasi-static loading or impact at a wide range of velocities has been extensively investigated and documented [4-7]. In recent years, increasing attention has been paid to such structures under impulsive loading due to enhanced chance of threats by an incident or terrorist attacks [8, 9]. In 2008, Dharmasena et al. [10] studied the dynamic behavior of sandwich structures with honeycomb made of stainless-steel material under free impulsive loading. Experiments were carried out at three loading levels on sandwich structures and single-layer sheets with similar surface densities. The impulse load and the dynamic load intensity were changed by varying the amount of charge load at a constant distance. At the lowest loading rate, in the center of the panel near the source of the loading, the bending of the front plate, and also the buckling of the cell wall, was observed to be remarkable and increasing, as with increasing impulse, the buckling in the cell wall and core

density increased.

Despite extensive research on sandwich structures with honeycomb core under uniform impulsive loading, numerical simulations and statistical optimization of parameters that affect these structures, such as the thickness of metallic face sheets, the thickness of the honeycomb cell walls, and the number of webs in the core have not been studied. Therefore, in this paper, ABAQUS finite element commercial software was used to simulate the dynamic response and large plastic deformation of sandwich structures with honeycomb core under uniform impulsive and the experimental results of Dharmasena et al. [10] were also used to validate the numerical model. In this study, design-expert statistical software package and the response surface methodology were used to investigate the parameters affecting the resistance of the sandwich structure with the honeycomb core such as the thickness of metallic face sheets, the thickness of the honeycomb cell walls, and the number of webs in the core. This software was also applied to obtain a relationship between these factors and find optimal values of each mentioned parameter.

2. Methodology

The geometry of the sandwich structure and loading condition were modeled and based on the research paper by Dharmasena et al. [10] in ABAQUS finite element commercial software. According to Fig. 1, this sandwich structure was

*Corresponding author's email: t.m.mostofi@eyc.ac.ir



made of three layers. The front and back face sheets were made of a 5 mm thick plate made of super austenitic stainless steel called AL6XN. The middle layer was also made of a honeycomb core with a thickness of 0.76 mm, welded to the front and back face sheets. The sandwich structure was secured between two 19 mm thick steel supporting clamps. Then, this test fixture system is fixed with 8 bolts on two beams. The charge was placed at a distance of 100 mm above the sandwich structure. This sandwich structure is shown in Fig. 1.

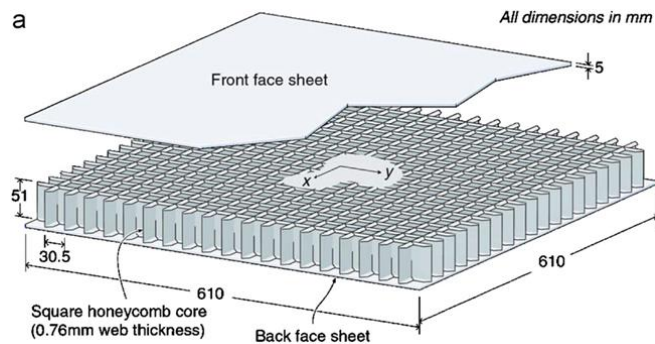


Fig. 1. A view of the sandwich structure examined [10]

To validate numerical simulation results, the results were compared with the experimental results reported by Dharmasena et al. [10]. In Fig. 2, a comparison between the actual and simulated models is shown. The comparison of the deformation profile shows that a satisfactory agreement between the simulated model and the experimental values is established; therefore, the proposed model can be used for further studies.

3. Results and Discussion

Due to the high number of effective parameters on the permanent and transient deformations of structures under extreme dynamic loading, it is very difficult and time consuming to study the effect of each of them individually. Using simple methods, such as changing a parameter at any time cannot illustrate the interaction between the mentioned parameters and its effect well. To this end, the design-expert statistical software package is suggested. In this method,

by performing a number of experiments or numerical simulations, the effect of the effective parameters on the final output is determined. Among the test design methods, the response surface method for high performance is more commonly used by researchers. In this paper, the response function is the central permanent transverse deflections of front and back face sheets, and the independent variables affecting them which include the thickness of metallic face sheets, the thickness of the honeycomb cell walls, the number of webs in the core, and the mass of charge.

Based on the results obtained from the statistical software and analysis of the variance of the results of the regression model, the optimal sandwich panel construction conditions with the purpose of achieving the highest resistance and the least deflections in the front and back face sheets of the sandwich structure were determined as Table 1 with a desirability of 0.96.

Table 1. Optimum conditions

| Independent parameters | Desirability |
|--|--------------|
| The thickness of metallic face sheets (mm) | 3.82 |
| Number of the web in the core | 7 |
| The thickness of honeycomb core (mm) | 0.8 |
| Charge mass (kg) | 0.5 |

4. Conclusions

In this paper, the dynamic plastic response of sandwich structures with honeycomb core under uniform impulsive loading was studied numerically. In the numerical section, in order to reduce the computations, a Three-Dimensional (3D) quarter symmetry model was generated due to the symmetry of the problem. The CONWEP model was used to exert pressure and shock of the uniform impulsive loading. Also, Johnson-Cook plasticity material model was applied to model behavior of metallic materials, with its damage criterion. The design-expert software was used to analyze the results obtained from numerical simulations. In order to examine the significance of the regression models from the software, the confidence level was considered 95%, which means that if the p-value for the model is less than 0.05, then the considered model is meaningful. Using the variance analysis of the numerical

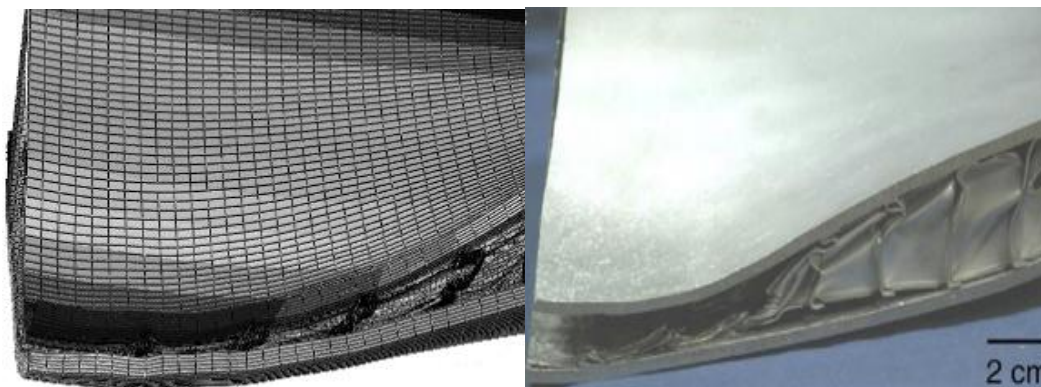


Fig. 2. Comparison between the results of experiments and the simulated model.

values of the coefficients of variables, p-value, as well as R^2 and R_{adj}^2 were obtained. A comparison of numerical simulation results with the corresponding experimental results showed that the simulated numerical model has very good accuracy. Regarding the high correlation coefficient ($R^2=0.99$) obtained from the response surface methodology method, it can be concluded that the results of the regression model are very consistent with the experimental results related to the deformation of the front and back face sheets of the sandwich structure under the impulsive loading. Also, the results of optimization of the studied parameters showed that the sandwich structure with the highest resistance should have 3.82 mm thick face seven webs in the core, a honeycomb core with a thickness of 0.8 mm and a charge mass of 0.5 kg.

References

- [1] G. Lu, T. Yu, Energy absorption of structures and materials, Elsevier, 2003.
- [2] L.J. Gibson, M.F. Ashby, Cellular solids: structure and properties, Cambridge university press, 1999.
- [3] M.F. Ashby, T. Evans, N.A. Fleck, J. Hutchinson, H. Wadley, L. Gibson, Metal foams: a design guide, Elsevier, 2000.
- [4] S. Abrate, Impact on composite structures, Cambridge university press, 2005.
- [5] H. Wen, T. Reddy, S. Reid, P. Soden, Indentation, penetration and perforation of composite laminate and sandwich panels under quasi-static and projectile loading, in: Key Engineering Materials, Trans Tech Publ, 1998, pp. 501-552.
- [6] M. Meo, R. Vignjevic, G. Marengo, The response of honeycomb sandwich panels under low-velocity impact loading, International journal of mechanical sciences, 47(9) (2005) 1301-1325.
- [7] W. Goldsmith, J.L. Sackman, An experimental study of energy absorption in impact on sandwich plates, International Journal of Impact Engineering, 12(2) (1992) 241-262.
- [8] D. Radford, N. Fleck, V. Deshpande, The response of clamped sandwich beams subjected to shock loading, International Journal of Impact Engineering, 32(6) (2006) 968-987.
- [9] D. Radford, G. McShane, V. Deshpande, N. Fleck, The response of clamped sandwich plates with metallic foam cores to simulated blast loading, International Journal of solids and structures, 43(7-8) (2006) 2243-2259.
- [10] 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.



مطالعه‌ای بر رفتار ساختارهای ساندویچی با هسته لانه‌زنوری تحت بارگذاری دفعی

مصطفی سیاح بادخور^۱، مهدی حسن‌زاده^۲، توحید میرزابابای مستوفی^{۱*}

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ایوان کی، ایوان کی، ایران

^۲ دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۲۴
بازنگری: ۱۳۹۸/۰۵/۱۸
پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۱۱
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۶/۱۳

کلمات کلیدی:

بارگذاری دفعی
ساختار ساندویچی فلزی
شبیه‌سازی عددی
روش سطح پاسخ
جدول آنوا

خلاصه: ساختارهای ساندویچی یکی از اهداف مورد استفاده برای کاهش خسارت‌ها است. در این مقاله، اثر شرایط مختلف بارگذاری و همچنین هندسه ساختار بر رفتار ساختار ساندویچی تحت بارگذاری دفعی یکنواخت مورد مطالعه قرار گرفته است. بنابراین، در ابتدا یک مدل عددی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، جهت شبیه‌سازی پاسخ دینامیکی و تغییر شکل پلاستیک سازه‌های ساندویچی ساخته شده است. جهت صحت‌سنجی مدل عددی از داده‌های تجربی موجود در ادبیات تحقیق استفاده شد. سپس در بحث مطالعه پارامتریک، تأثیر پارامترهای مؤثر بر مقاومت این ساختار ساندویچی نظیر ضخامت صفحات بالا و پایین فلزی، تعداد صفحات در هسته و همچنین ضخامت آن‌ها تحت بارگذاری دفعی با جرم خرج‌های مختلف ۱/۵ و ۱ و ۱/۵ کیلوگرم مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه با استفاده از طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ، مدلی مناسب جهت پیش‌بینی میزان تغییر شکل مرکزی صفحات بالا و پایین ساختار ساندویچی توسعه داده شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده مطابقت بسیار خوب داده‌های تجربی و داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل رگرسیونی است. مقدار بالای ضریب همبستگی بین پارامترهای مورد مطالعه و رفتار سازه حاکی از آن است که مدل ارائه شده از دقت بسیار بالایی برخوردار بوده است. حالت بهینه این ساختار ساندویچی در محدوده مورد بررسی، با همین مدل رگرسیونی به‌دست آمده است.

۱- مقدمه

ساختارهای ساندویچی با هسته لانه‌زنوری از جنس فولاد ضدزنگ آستنیتی تحت بارگذاری انفجاری آزاد پرداختند. آزمایش‌ها در سه سطح بارگذاری روی ساختارهای ساندویچی و ورق‌های تک‌لایه با چگالی سطحی مشابه انجام شد. میزان ایمپالس و شدت بار دینامیکی وارد شده با تغییر میزان وزن بار ماده منفجره در فاصله استقرار ثابت تغییر داده شد. در پایین‌ترین میزان شدت بارگذاری، در مرکز پانل نزدیک به منبع انفجار، خمش ورق جلویی و همچنین کمناش دیواره سلولی به‌طور برجسته و رو به رشد مشاهده شد به‌طوری‌که با افزایش ایمپالس، کمناش در دیواره سلولی و تراکم هسته افزایش یافت.

در طی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۰، ژو و همکاران [۱۱ و ۱۲] تعداد زیادی آزمایش روی سازه‌های ساندویچی با هسته لانه‌زنوری و فوم آلومینیومی تحت بار انفجاری یکنواخت انجام دادند. نتایج کمی بر اساس اندازه‌گیری انجام شده در آزمایش نمونه‌ها با پاندول بالستیک به‌دست آمد. همچنین، در این سری از آزمایش‌ها، حالت‌های مختلف تغییر شکل پلاستیک سازه و مکانیزم شکست آن‌ها طبقه‌بندی شد و اثرات ضخامت ورق جلویی و عقبی،

ساختارهای ساندویچی با هسته ساخته شده از مواد متخلخل (اغلب لانه‌زنوری و یا فوم‌های آلومینیومی) به‌عنوان یک ساختار محافظ در حال ظهور، توانایی جذب انرژی قابل‌توجهی را با تغییر شکل پلاستیک بزرگ تحت بارگذاری ضربه‌ای و انفجاری دارند. ریزساختارهای سلولی آن‌ها را قادر به تغییر شکل پلاستیک بزرگ در تنش تقریباً ثابت می‌کنند؛ بنابراین، این سازه‌ها می‌توانند مقدار زیادی انرژی جنبشی را قبل از فروپاشی به پیکربندی یا شکستگی پایدارتر تجربه کنند [۳-۱]. تاکنون، پاسخ ساختارهای ساندویچی تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی یا تأثیر آن در طیف گسترده‌ای از سرعت‌ها به‌طور گسترده مورد مطالعه و مستندسازی شده است [۴-۷]. در سال‌های اخیر، افزایش توجه به این‌گونه سازه‌ها تحت بار انفجاری به دلیل افزایش احتمال تهدید انفجار به‌وسیله حادثه یا حملات تروریستی صورت گرفته است [۸ و ۹].

در سال ۲۰۰۸، ده‌ماسنا و همکاران [۱۰] به مطالعه رفتار دینامیکی

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: t.m.mostofi@eyc.ac.ir



جرم خرج انفجاری، نوع کامپوزیت استفاده شده، ضخامت ورق لانه زنبوری و اندازه سلول آن بر رفتار پلاستیک لایه های جلویی و هسته بررسی شدند. نتایج تجربی ارائه شده بیان گر تأثیر بسیار زیاد چگالی نسبی هسته و ضخامت لایه جلویی بر میزان تغییر شکل پلاستیک لایه عقبی بود. به طور دقیق تر می توان این گونه بیان کرد که به کارگیری لایه جلویی ضخیم همراه با هسته لانه زنبوری با چگالی بیشتر موجب کاهش زیاد میزان خیز دائمی لایه عقبی می شود. همچنین این نتیجه حاصل شد که برای یک هسته مشخص، خیز دائمی لایه عقبی با افزایش ایمپالس به صورت خطی افزایش می یابد [۱۵-۱۳].

در سال ۲۰۰۹، نوریک و همکاران [۱۶] و کاراگیزوا و همکاران [۱۷] با انجام تعداد زیادی آزمایش به بررسی پاسخ غیرالاستیک سازه های ساندویچی تحت بار انفجاری یکنواخت پرداختند که سازه ها متشکل از ورق های جلویی و عقبی از جنس فولادی نرم و با هسته لانه زنبوری آلیاژ آلومینیوم بودند. شایان توجه است که در این تحقیق، بار دفعی یکنواخت با منفجر کردن دیسکی از مواد منفجره و هدایت انفجار از طریق یک لوله به سمت هدف ایجاد شد. در ادامه این تحقیق، سه فاز تعامل برای هر ساختار ساندویچی بر اساس حالت تغییر شکل، تماس، لهیدگی و گسیختگی اجزای ساندویچی، شناسایی شدند.

در سال ۲۰۱۵، زمانی و گودرزی [۱۸] به بررسی تجربی و عددی ماکزیمم خیز ورق های دایروی تحت اثر موج شوک حاصل از انفجار پرداختند. آن ها دو سری آزمایش انجام دادند که در سری اول موج شوک رسیده به سازه، غیریکنواخت و در سری دوم موج شوک رسیده به سازه یکنواخت بود. هدف آن ها از طراحی و اجرای آزمایش ها، بررسی تاثیر نحوه برخورد موج بر میزان تغییر شکل و استخراج دو مدل نیمه تجربی برای پیش بینی میزان خیز ماکزیمم وسط ورق دایروی در دو حالت موج شوک یکنواخت و غیریکنواخت بود.

در سال ۲۰۱۸، میرفلاح نصیری و همکاران [۱۹]، به بررسی تاثیر دما و نرخ کرنش بر شکل دهی ورق های آلومینیومی پرداختند. آن ها دریافتند که سطح نمودار حد شکل دهی ورق های آلومینیومی با افزایش دما افزایش و با افزایش نرخ کرنش کاهش پیدا می کند.

در سال ۲۰۱۸، چنگ و همکاران [۲۰] و در سال ۲۰۱۹، چن و همکاران [۲۱] با هدف مشخص نمودن اثرات پر کردن فوم بر پاسخ دینامیکی پانل های ساندویچی با هسته موج دار به بررسی پاسخ دینامیکی این ساختارها تحت بار انفجاری آزاد پرداختند. این ساختارها به منظور بررسی تأثیرات پارامترهای

خاص مانند چگالی فوم پرکننده، پیکربندی هسته و مواد پرکننده بر روی عملکرد انفجاری از جنبه مود تغییر شکل دائم، مود شکست و مکانیزم های مربوطه طراحی شدند. نتایج تجربی نشان داد که پر کردن فوم یک روش مؤثر برای بهبود مقاومت در برابر انفجار پانل های ساندویچی است. نتایج همچنین نشان داد که مزایای حاصل از فوم پرکننده برای کاهش سطوح خرابی و تغییر شکل پلاستیک در صفحات با افزایش چگالی اسفنج بهبود می یابد. مقایسه پانل با پیکربندی های مختلف هسته تأیید کرد که پانل ساندویچی پر شده با فوم تحت بار انفجار با شدت پایین بهترین رفتار را نشان داده است و همچنین پانل های پر شده با فوم های پی.وی.سی^۱ در مقایسه با ساختارهای پر شده از فوم های آلومینیومی با چگالی یکسان مقاومت بسیار بالایی نشان دادند.

در سال ۲۰۱۹، احمدی و همکاران [۲۲] به بررسی تغییر شکل پانل های ساندویچی به کار رفته در بدنه شناورها تحت بارگذاری انفجار پرداختند. آن ها دریافتند که مقدار تنش وارد شده در لایه های میانی بیشتر از سایر قسمت های پانل است و شکست نیز از همین قسمت شروع می گردد.

علی رغم تحقیقات بسیار زیاد انجام شده بر روی ساختارهای ساندویچی با هسته لانه زنبوری تحت بار انفجاری یکنواخت، تاکنون مطالعه ای بر روی شبیه سازی عددی و بهینه سازی آماری پارامترهای مؤثر بر این سازه نظیر ضخامت صفحات فلزی، ضخامت صفحات در هسته و تعداد صفحات در هسته مشاهده نشده است. لذا در این مقاله در ابتدا استفاده از نرم افزار تجاری المان محدود آباکوس به شبیه سازی پاسخ دینامیکی و تغییر شکل پلاستیک سازه های ساندویچی با هسته لانه زنبوری تحت بار انفجاری یکنواخت پرداخته شده و صحت گذاری مدل با استفاده از نتایج تجربی دهاماسنا و همکاران [۱۰] انجام گرفته است. در ادامه این تحقیق، از طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ^۲ به منظور بررسی پارامترهای مؤثر بر مقاومت ساختار ساندویچی با هسته لانه زنبوری نظیر ضخامت صفحات فلزی، تعداد صفحات در هسته و ضخامت آن ها در هسته و همچنین تعیین ارتباط بین این عوامل با استفاده از طرح مرکب مرکزی^۳ و پیدا کردن مقدار بهینه هر پارامتر استفاده شده است.

۲- شبیه سازی عددی

ساختارهای چندلایه یا ساختار ساندویچی با یک لایه مرکزی مشبک به عنوان جاذب انرژی عمل می کنند. یکی از کاربردهای این صفحات

1 PVC
2 Response Surface Method
3 Central Composite Design

جامد^۱ انتخاب شده است. همچنین، به منظور کاهش محاسبات با توجه به متقارن بودن مسئله، مدل هندسی سازه به صورت سه بعدی و یک چهارم مدل شده و قسمت لانه زنبوری نیز به صورت پوسته با ضخامت ۰/۷۶ میلی متر انتخاب شده است. با توجه به اتصال بین لانه زنبوری و صفحات بالا و پایین و با فرض عدم شکست در جوش ها، از قید تای^۲ استفاده شده است. به منظور همگرایی جواب مسئله اندازه مش به صورت ۱۲ المان در جهت ضخامت، مطابق نمودار شکل ۲ انتخاب شده است.

۲-۲- مدل سازی رفتاری مواد

رفتار ساختار ساندویچی به گونه ای در نظر گرفته شده است که المان ها در صورت افزایش مقدار انرژی آن ها از سطح ماده حذف شوند. به این منظور از مدل گسیختگی جانسون-کوک استفاده شده است. این مدل قابلیت پیش بینی شروع شکست یا گسیختگی را دارا است. پارامترهای ثابت ماده در جدول ۱ آورده شده است.

Table 1. Material constants for AL6XN [23]

جدول ۱: ثابت های ماده برای AL6XN [۲۳]

| α (K ⁻¹) | C_p (J/kgK) | ρ (kg/m ³) | ν | E (GPa) |
|--------------------------------|------------------|--------------------------------|-------|--------------|
| ۰/۰۰۰۰۱۵ | ۵۰۰ | ۸۰۶۰ | ۰/۳ | ۱۹۵ |

معادله جانسون-کوک برای تغییر شکل ها با وابستگی به نرخ کرنش و تغییرات دما مطابق رابطه (۱) است [۲۴ و ۲۵]:

$$\sigma_{eq} = (A + B \varepsilon_{eq}^n) (1 + \dot{\varepsilon}_{eq}^*)^c (1 - T^*{}^m) \quad (1)$$

$$T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$$

$$\dot{\varepsilon}_{eq}^* = \frac{\dot{\varepsilon}_{eq}}{\dot{\varepsilon}_0}$$

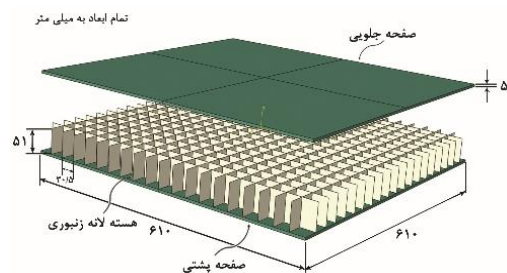
در این رابطه $\dot{\varepsilon}_0$ نرخ کرنشی است که مقادیر A، B و n در آن نرخ، اندازه گیری می شوند. این سه ثابت با تست کشش استاتیکی تعیین می شوند و به همین دلیل به آن ها ثوابت شبه استاتیکی می گویند. ثوابت C و m توسط

به عنوان دیواره محافظ در برابر انفجار است. در این قسمت، مقدار تغییر شکل یک ساختار ساندویچی تحت فشار ناشی از انفجار مورد بررسی قرار گرفته و برای شبیه سازی عددی از نرم افزار آباکوس استفاده شده است. برای به دست آوردن میزان تغییر شکل های ساختار ساندویچی از روش صریح در آباکوس استفاده شده است.

۲-۱- هندسه و حساسیت به مش

شرایط ساختار ساندویچی و مواد منفجره مطابق مقاله دهارماسنا و همکاران [۱۰] در نرم افزار آباکوس، مدل سازی و تحلیل شده است. مطابق با شکل ۱، این ساختار ساندویچی از سه لایه ساخته شده است. لایه بالایی و پایینی از یک ورق با ضخامت ۵ میلی متر و از جنس فولاد زنگ نزن سوپر آستینیتی به نام AL6XN ساخته شده است. لایه وسط نیز از یک ساختار لانه زنبوری با همان جنس و ضخامت ۰/۷۶ میلی متر که به صفحه های بالایی و پایینی جوش داده، ساخته شده است. ساختار ساندویچی با استفاده از گیره، روی یک صفحه فولادی به ضخامت ۱۹ میلی متر بسته می شود. سپس این مجموعه با استفاده از ۸ پیچ بر روی دو عدد تیر بسته می شود. ماده منفجره نیز در فاصله ۱۰۰ میلی متری در بالای صفحه ساختار ساندویچی قرار داده می شود.

دور تا دور لبه های صفحه بالایی و پایینی مقید شده است. بنابراین در مدل سازی تمامی درجت آزادی لبه های بیرونی باید بسته شود. در این شبیه سازی، صفحه های فلزی با ضخامت های مختلف به صورت تغییر شکل پذیر مدل شده و مش مورد نظر ساختار نیز از نوع المان خطی چهاروجهی

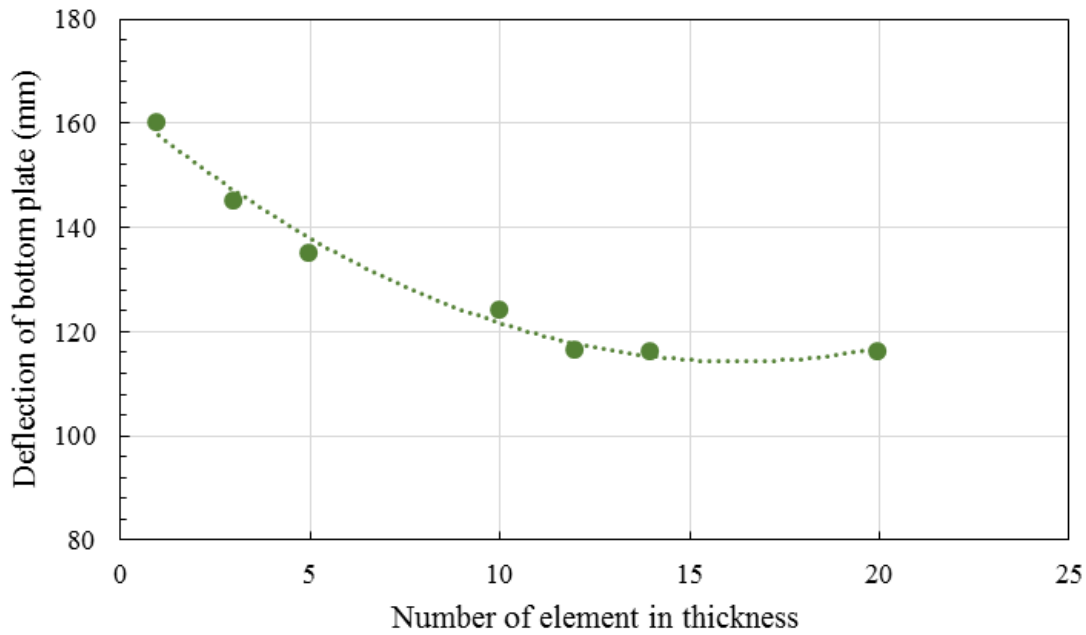


شکل ۱: نمایی از ساختار ساندویچی مورد بررسی [۱۰]

Fig. 1. A view of the sandwich structure examined [10]

1 C3D4

2 Tie



شکل ۲: همگرایی جواب مسئله با تغییر تعداد المان

Fig. 2. Convergence of the results by changing the number of elements

Table 2. Constants of the Johnson-Cook equation for AL6XN [23]

جدول ۲: ثوابت معادله جانسون-کوک برای AL6XN [۲۳]

| T_m (K) | T_r (K) | $\dot{\epsilon}_0$ | m | C | n | B (MPa) | A (MPa) |
|--------------|--------------|--------------------|------|-------|------|--------------|--------------|
| ۱۷۰۰ | ۲۹۶ | ۰/۰۰۱ | ۱/۰۳ | ۰/۰۲۴ | ۰/۸۲ | ۱۹۰۲ | ۴۱۰ |

تولید یک موج شوک به سمت بیرون از نقطه انفجار می‌کند. این موج شوک به صورت کروی از مرکز انفجار انتشار می‌یابد و سبب اعمال نیروی زیادی بر اجسام اطراف خود می‌شود. این نیرو اصطلاحاً انفجار هوا^۲ نامیده می‌شود و امواج حاصله نیز امواج بلست نامیده می‌شوند. زمان رسیدن این موج به نقطه‌ای با فاصله R از مرکز انفجار، T_a است. پس از این که موج به این نقطه برسد، فشار آن از P_{atm} به سرعت تا P_{max} افزایش می‌یابد. مقدار فشار ماکزیمم در این نقطه از رابطه (۲) به دست می‌آید [۲۶].

تست‌های پیچش در نرخ کرنش‌های و دماهای متفاوت و تست فشار میله هایپکینسون^۱ تعیین می‌شوند. $\dot{\epsilon}_{eq}$ ، کرنش پلاستیک معادل است. T ، دمای مطلق، T_r ، دمای محیط و T_m دمای ذوب ماده است. در جدول ۲ ثوابت رابطه (۱) برای AL6XN نشان داده شده است.

۲-۳ مدل سازی فشار و نیروی انفجار

زمانی که یک انفجار در هوا به وقوع می‌پیوندد، یک توده بسیار بزرگ از هوای فشرده و داغ تشکیل می‌شود. این هوای فشرده، در هوای محیط بیرون

2 Air Blast

1 Hopkinson Bar

که مقدار آن بر واحد سطح، برابر مساحت زیر منحنی فشار-زمان موج بلست است. مقدار ضربه با استفاده از رابطه تجربی (۴) قابل محاسبه است [۲۶].

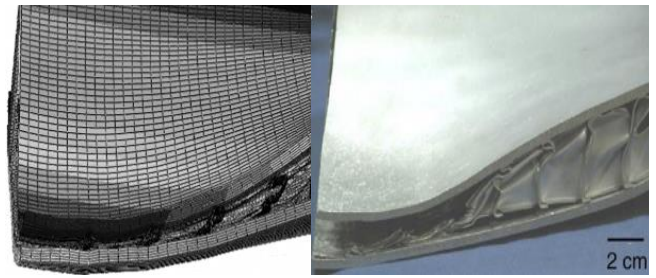
$$\frac{I}{A} = \frac{0.067 \times \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.23}\right)^4}}{Z^2 \times \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{1.55}\right)^3}} \quad (3)$$

I ایمپالس موج و A سطح مقطع وارد شدن موج است. در نرم افزار آباکوس اثرات موج بلست بر روی ساختار ساندویچی توسط مدل کانوپ^۲ اعمال شده است. این مدل مبتنی بر داده‌های تجربی است و توسط ارتش ایالات متحده آمریکا مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل برای محاسبه فاصله نقطه اثر نیرو تا مرکز انفجار، از فاصله مقیاس شده $(Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}})$ استفاده می‌کند. پس از محاسبه فاصله مقیاس شده، مدل کانوپ از داده‌های تجربی موجود، موارد زیر را تخمین می‌زند: زمان رسیدن فشار به نقطه مورد نظر (T_a) با فاصله مشخص ماکزیمم فشار اعمال شده در آن فاصله (P_{max}) زمان فاز مثبت (T_d) توان تابع کاهش نمایی در فاز مثبت برای فشار تابع^۳ و فشار بازتاب شده برای مدل سازی جرم ماده منفجره از جرم معادل تی‌ان‌تی آن، استفاده شده است.

۴-۲- صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی شده

برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی عددی، نتایج حاصل با نتایج تجربی گزارش شده توسط دهارماسنا و همکاران [۱۰] مقایسه شد. در شکل ۳، مقایسه‌ای بین مدل واقعی و شبیه‌سازی شده در بار انفجار ۳ کیلوگرم تی‌ان‌تی نشان داده شده است. مقایسه پروفیل تغییر شکل نشان می‌دهد که مطابقت مطلوبی میان مدل شبیه‌سازی شده با مقادیر تجربی برقرار است؛ لذا می‌توان بر مدل ارائه شده صحت‌گذاری کرد.

در شکل ۴ نیز مقایسه‌ای بین نتایج شبیه‌سازی عددی و تجربی برای میزان تغییر شکل مرکزی نمونه انجام شده است. در این مقایسه، مقدار جابجایی صفحات بالایی و پایینی در فشارهای مختلف ناشی از انفجار مواد تی‌ان‌تی مقایسه شده است. این نمودار نشان‌دهنده دقت مدل کانوپ در پیش‌بینی فشار انفجار و تطابق قابل قبول آن با نتایج واقعی است.



شکل ۳: مقایسه بین نتایج آزمایش تجربی و مدل شبیه‌سازی شده

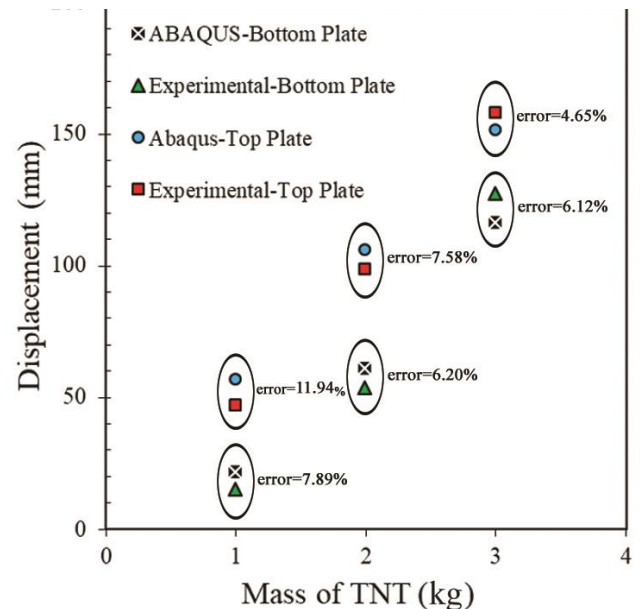
Fig. 3. Comparison between the results of experiments and simulated model

$$P_{max} = \begin{cases} \frac{6.7}{Z^3} & : P_{max} > 10 \text{ kg/cm}^2 \\ \frac{0.975}{Z} + \frac{1.455}{Z^2} + \frac{5.85}{Z^3} - 0.019 & : 0.1 < P_{max} < 10 \text{ kg/cm}^2 \end{cases} \quad (2)$$

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}}$$

Z در این رابطه W وزن معادل ماده منفجره بر حسب تی‌ان‌تی^۱ است. علاوه بر فشار، یک ویژگی دیگر موج بلست، ضربه یا ایمپالس آن است

1 TNT



شکل ۴: نمودار مقایسه جابجایی صفحات بالا و پایین ساختار ساندویچی

Fig. 4. Comparison diagram of the top and bottom plates displacement of sandwich structures

2 CONWEP

3 Incident

Table 3. Independent variables in the design of the experiment and their levels

جدول ۳: متغیرهای مستقل در طراحی آزمایش و سطوح آنها

| بازه و سطوح متغیرها | | | واحد | متغیرهای طراحی | متغیرهای مستقل |
|---------------------|-----|-----|------|----------------|---------------------|
| -۱ | ۰ | ۱ | | | |
| ۲ | ۳ | ۴ | mm | X_1 | ضخامت صفحات فلزی |
| ۳ | ۵ | ۷ | - | X_2 | تعداد صفحات در هسته |
| ۰/۴ | ۰/۶ | ۰/۸ | mm | X_3 | ضخامت لانه زنبوری |
| ۰/۵ | ۱ | ۱/۵ | kg | X_4 | جرم خرج |

Table 4. Independent variables in the design of the experiment and their levels

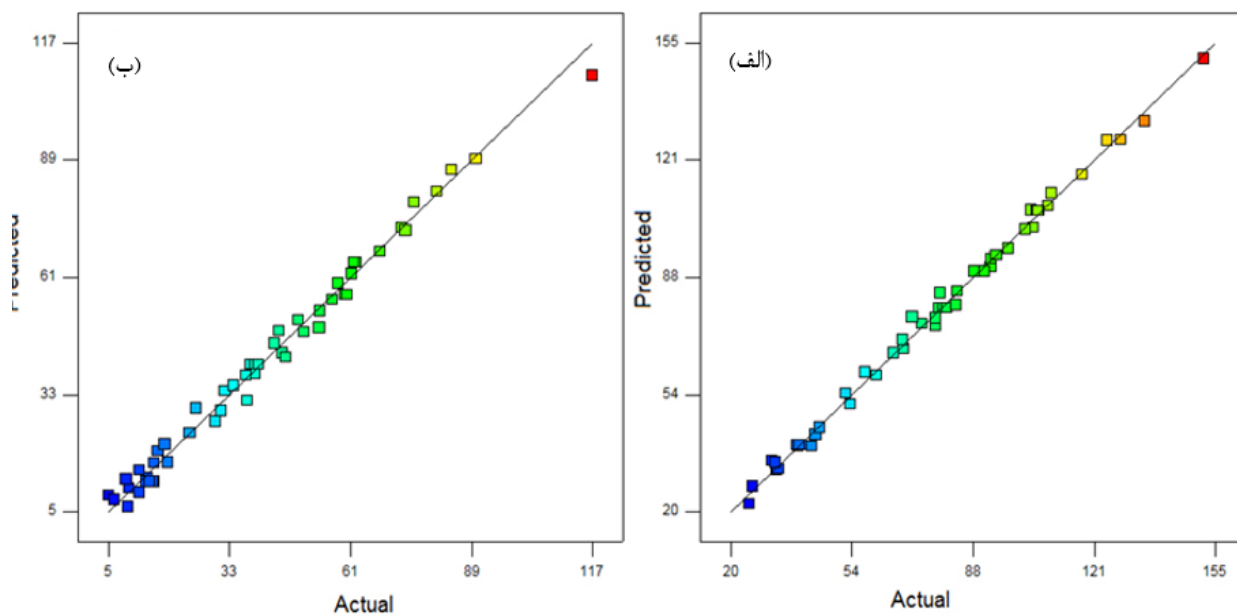
جدول ۴: جدول آنوا مربوط به مدل سطح پاسخ جابجایی صفحات بالا (Y_1) و پایین (Y_2).

| Probe > F | F-value | متوسط مربعات | درجه آزادی | مجموع مربعات | منبع |
|-----------|---------|--------------|------------|--------------|------------------------------------|
| <۰/۰۰۰۱ | ۸۶۸/۲۸ | ۳۹۴۰/۹۵ | ۱۴ | ۵۵۱۷۳/۲۹ | مدل (Y_1) |
| <۰/۰۰۰۱ | ۱۴۱۱/۴۸ | ۶۴۰۶/۴۲ | ۱ | ۶۴۰۶/۴۲ | X_1 (ضخامت صفحات بالا و پایین) |
| <۰/۰۰۰۱ | ۶۵/۷۹ | ۲۹۸/۶۰ | ۱ | ۲۹۸/۶۰ | X_2 (تعداد صفحات در لانه زنبوری) |
| <۰/۰۰۰۱ | ۸۷/۵۹ | ۳۹۷/۵۷ | ۱ | ۳۹۷/۵۷ | X_3 (ضخامت صفحات در لانه زنبوری) |
| <۰/۰۰۰۱ | ۵۰۵۸/۰۹ | ۲۲۹۵۷/۶۳ | ۲ | ۴۵۹۱۵/۲۶ | X_4 (جرم تی‌ان‌تی) |
| ۰/۰۰۴۷ | ۸/۸۷ | ۴۰/۲۶ | ۱ | ۴۰/۲۶ | X_1X_2 |
| <۰/۰۰۰۱ | ۳۳/۶۵ | ۱۵۲/۷۳ | ۱ | ۱۵۲/۷۳ | X_1X_3 |
| <۰/۰۰۰۱ | ۱۱۶/۳۸ | ۵۲۸/۲۱ | ۲ | ۱۰۵۶/۴۱ | X_1X_4 |
| ۰/۰۱۱۲ | ۷/۰۰ | ۳۱/۷۹ | ۱ | ۳۱/۷۹ | X_2X_3 |
| <۰/۰۰۰۱ | ۵۰/۲۱ | ۲۲۷/۸۷ | ۲ | ۴۵۵/۷۵ | X_3X_4 |
| <۰/۰۰۰۱ | ۷۳/۰۸ | ۳۳۱/۶۷ | ۱ | ۳۳۱/۶۷ | X_1^2 |
| ۰/۰۰۷۶ | ۷/۸۲ | ۳۵/۵۰ | ۱ | ۳۵/۵۰ | X_3^2 |
| - | - | ۴/۵۴ | ۴۵ | ۲۰۴/۲۵ | باقیمانده |
| - | - | ۰/۲۸ | ۱۵ | ۴/۱۳ | خطای خالص |
| <۰/۰۰۰۱ | ۴۲۰/۲۲ | ۳۵۲۳/۸۵ | ۱۰ | ۳۵۲۳۸/۴۸ | مدل (Y_2) |
| <۰/۰۰۰۱ | ۶۸۳/۸۹ | ۵۷۵۱/۲۳ | ۱ | ۵۷۵۱/۲۳ | X_1 (ضخامت صفحات بالا و پایین) |
| ۰/۰۰۲۷ | ۹/۹۷ | ۸۳/۸۰ | ۱ | ۸۳/۸۰ | X_2 (تعداد صفحات در لانه زنبوری) |
| <۰/۰۰۰۱ | ۲۳/۰۵ | ۱۹۳/۸۵ | ۱ | ۱۹۳/۸۵ | X_3 (ضخامت صفحات در لانه زنبوری) |
| <۰/۰۰۰۱ | ۱۶۱۷/۸۴ | ۱۳۶۰۵/۳۲ | ۲ | ۲۷۲۱۰/۶۵ | X_4 (جرم تی‌ان‌تی) |
| <۰/۰۰۰۱ | ۶۲/۹۲ | ۵۲۹/۱۵ | ۲ | ۱۰۵۸/۲۹ | X_1X_4 |
| <۰/۰۰۰۱ | ۲۵/۰۳ | ۲۱۰/۴۹ | ۲ | ۴۲۰/۹۷ | X_3X_4 |
| <۰/۰۰۰۱ | ۷۳/۶۹ | ۶۱۹/۶۹ | ۱ | ۶۱۹/۶۹ | X_1^2 |
| - | - | ۸/۴۱ | ۴۹ | ۴۱۲/۰۷ | باقیمانده |
| - | - | ۰/۴۰ | ۱۵ | ۵/۹۵ | خطای خالص |

Table 5. Second-order regression model for the displacement of the top and bottom plates of the structure

جدول ۵: مدل رگرسیونی مرتبه دوم برای جابجایی صفحات بالا و پایین سازه

| معادله | جرم خرج kg | پاسخ |
|--|------------------|--------------------------------|
| $Y_1 = 122/29 - 29/45 X_1 - 1/46 X_2 - 39/19 X_3 + 0/65 X_1 X_2 + 12/61 X_1 X_3 - 2/88 X_2 X_3 + 2/05 X_1^2 - 16/75 X_3^2$ | ۰/۵ | جابجایی صفحات بالا (Y1) |
| $Y_1 = 152/97 - 33/67 X_1 - 1/46 X_2 - 3/69 X_3 + 0/65 X_1 X_2 + 12/61 X_1 X_3 - 2/88 X_2 X_3 + 2/05 X_1^2 - 16/75 X_3^2$ | ۱/۵ | جابجایی صفحات پائین (Y2) |
| $Y_2 = 49/82 - 21/81 X_1 - 0/66 X_2 - 21/70 X_3 + 2/76 X_1^2$ | ۰/۵ | جابجایی صفحات پائین (Y2) |
| $Y_2 = 113/87 - 27/33 X_1 - 0/66 X_2 - 21/70 X_3 + 2/76 X_1^2$ | ۱ | جابجایی صفحات پائین (Y2) |
| $Y_2 = 154/52 - 33/30 X_1 - 0/66 X_2 - 19/30 X_3 + 2/76 X_1^2$ | ۱/۵ | جابجایی صفحات پائین (Y2) |



شکل ۵: مقایسه مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده توسط مدل سطح پاسخ جابجایی صفحات بالا (الف) و پایین (ب).

Fig. 5. Comparison of actual and predicted values by the surface response method of the plates displacement (a) top (b) bottom

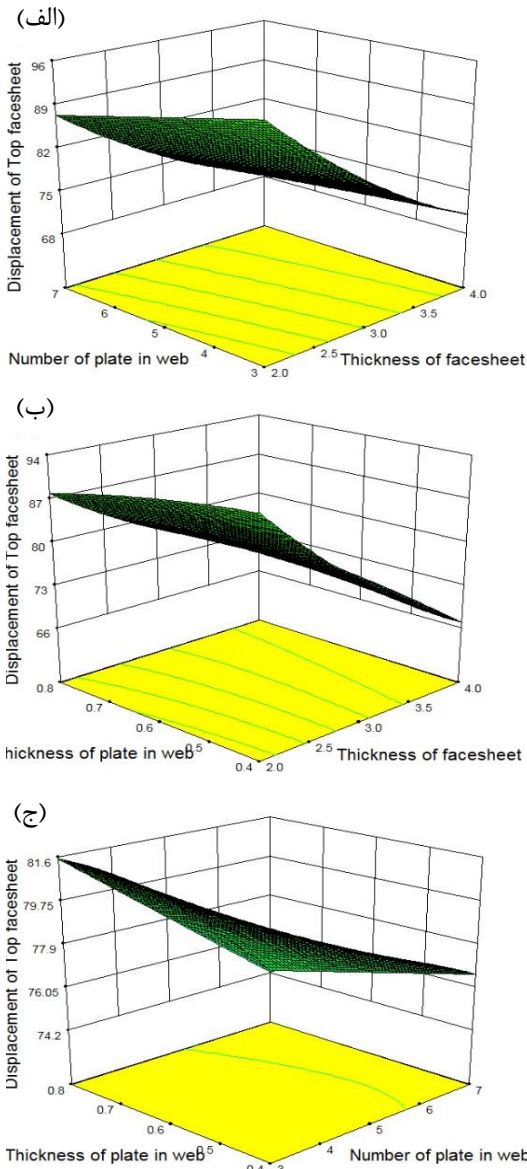
۳- طراحی آزمایش

با توجه به تعداد زیاد پارامترهای موثر در جابجایی صفحات، بررسی تاثیر هر کدام از آن‌ها به صورت جداگانه کار بسیار دشوار و زمان‌بری است. استفاده از روش‌های ساده مانند تغییر یک پارامتر در هر زمان نیز، نمی‌تواند به خوبی تاثیر آن و برهم‌کنش بین آن‌ها را نشان دهد. به همین جهت استفاده از روش طراحی آزمایش پیشنهاد شده است. در این روش با انجام تعدادی آزمایش یا شبیه‌سازی عددی، تاثیر پارامترهای موثر بر خروجی نهایی مشخص می‌گردد. در بین روش‌های مختلف طراحی آزمایش مانند روش‌های چند عاملی، فاکتوریل جزئی، فاکتوریل کامل، سطح پاسخ، تاگوچی، روش سطح پاسخ به علت کارایی بالا بیشتر مورد استفاده محققان قرار می‌گیرد. منظور از کارایی، توانمندی‌های روش در اعتباربخشی، قابلیت برآزش و بهینه‌سازی است. در این تحقیق یک طرح مرکب مرکزی^۱ چهار متغیره به منظور بررسی تاثیر پارامترهای مختلف و بهینه‌سازی ساختار ساندویچی در برابر بارهای انفجاری در نظر گرفته شد و در خروجی آن، تعداد ۶۰ آزمایش مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج مربوط به آزمایش‌ها در جدول پیوست آمده است. در این مقاله تابع پاسخ، جابجایی صفحات بالا (Y_1) و پایین (Y_p) است و متغیرهای مستقل موثر بر آن نیز عبارت‌اند از ضخامت صفحات فلزی (X_1)، ضخامت صفحات هسته (X_p)، تعداد صفحات هسته (X_p) و جرم خرج (X_p). در این بین جرم خرج به دلیل شرایط آزمایش به صورت متغیر گسسته و سایر متغیرها به صورت پیوسته در نظر گرفته شده است. مدل مرتبه دوم که به صورت رابطه (۴) بیان می‌شود بر روی داده‌های به دست آمده، اعمال گردید.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=2}^3 \beta_{ij} x_i x_j \quad (4)$$

که در آن Y پاسخ محاسبه شده، x_i و x_j متغیرهای کدگذاری شده، β ضریب ثابت، β_{ij} ضریب خطی، β_{ii} ضریب مرتبه دوم، و β_{ij} ضریب متقابل است [۲۷].

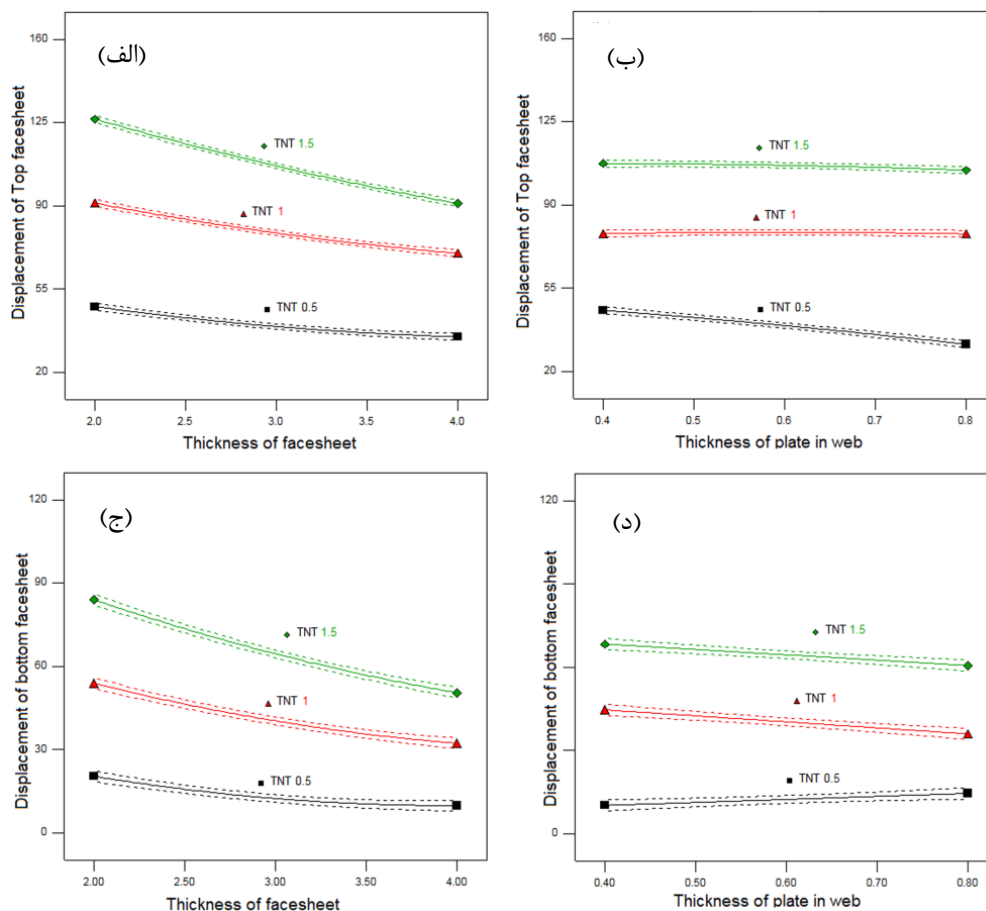
روش سطح پاسخ به منظور تجزیه و تحلیل نتایج، از ابزار قدرتمندی به نام تحلیل واریانس (آنوا^۲) استفاده می‌کند. نتایج تحلیل واریانس به طور معمول به صورت جدولی شامل مجموع مربعات هر عامل و خطا، درجه آزادی هر عامل و خطا، میانگین مربعات (واریانس) هر عامل و خطا، پارامتر معنی‌داری پاسخ برای عامل (F) و سهم هر عامل در پاسخ (p -value) ارائه می‌شود.



شکل ۶: نمودار سطح پاسخ مربوط به برهم‌کنش پارامترهای موثر در جابجایی صفحات بالا (الف) و (ب) و پایین (ج).

Fig. 6. The Response surface Chart for the interaction of effective parameters in plates displacement (a, b) top (c) bottom

در این تحقیق از نرم‌افزار طراح آزمایش^۳ به منظور پردازش و تحلیل نتایج به دست آمده استفاده گردید. در جدول ۳، متغیرهای مستقل با بازه مورد بررسی نشان داده شده است. همچنین نتایج حاصل از اندازه‌گیری میزان جابجایی در صفحات بالا (Y_1) و پایین (Y_p) به همراه شرایط انجام مربوط به هر کدام از آزمایش‌های انجام شده، در جدولی که در پیوست آمده، ارائه شده



شکل ۷: اثر برهم‌کنش تغییرات جرم خراج با ضخامت صفحات فلزی (X1X4) و ضخامت صفحات در هسته (X3X4) بر روی جابجایی صفحات بالا (الف) و (ب) و پایین (ج) و (د)

Fig. 7. The effect of the interaction of charge mass changes with the thickness of the metal plates (X1X4) and the thickness of the plates in the core (X3X4) on the displacement of the plates (a, b) top and (c, d) bottom

و مقادیر به‌دست آمده از آزمایش با مقادیر پیش‌بینی شده برای جابجایی صفحات بالا و پایین ساختار ساندویچی، بر اساس مدل مطابقت دارد. مقایسه مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده توسط مدل سطح پاسخ برای جابجایی صفحات بالا و پایین در شکل‌های ۵ (الف) و (ب) نشان داده شده است.

شکل‌های ۶ (الف) و (ب) تاثیر متغیرهای مورد بررسی بر میزان جابجایی صفحات بالا و شکل ۶ (ج) تاثیر متغیرهای مورد بررسی بر میزان جابجایی صفحات پایین را نشان می‌دهد. بر این اساس تاثیر متقابل و برهم‌کنش ضخامت صفحات فلزی (X_1) و تعداد صفحات در هسته (X_3) (شکل ۶ (الف))، برهم‌کنش ضخامت صفحات فلزی (X_1) و ضخامت صفحات در هسته (X_3) در شکل ۶ (ب) و برهم‌کنش تعداد صفحات در هسته (X_3) و

است. در این تحقیق به‌منظور بررسی معنی‌دار بودن مدل، سطح اطمینان ۹۵ درصد در نظر گرفته شد. بر این اساس، چنانچه سهم هر عامل در پاسخ برای مدل کمتر از ۰/۰۵ باشد، مدل در نظر گرفته شده معنی‌دار است. با استفاده از تحلیل واریانس مقادیر عددی ضرایب متغیرها، سهم هر عامل در پاسخ و همچنین R^2 و R^2_{adj} به دست آمد که در جدول ۴ مشاهده می‌شود.

مدل مرتبه دوم به‌دست آمده برای سطح پاسخ جابجایی صفحات بالا (Y_1) و پایین (Y_2) نیز به‌صورت نشان داده شده در جدول ۵ برای مقادیر واقعی متغیرهای مورد بررسی است. مقدار R^2 و R^2_{adj} به ترتیب برابر ۰/۹۹۶ و ۰/۹۹۵ برای جابجایی صفحات بالا (Y_1) و برابر ۰/۹۸۸ و ۰/۹۸۶ برای جابجایی صفحات پایین (Y_2) است. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که بازه‌های انتخاب شده و مدل ارائه شده برای این آزمایش مناسب بوده

Table 6. Optimum conditions for test variables in order to achieve the highest strength

جدول ۶: شرایط بهینه متغیرهای موردبررسی در آزمایش برای دستیابی به بیشترین مقاومت.

| متغیرهای مستقل | مقادیر بهینه برای جرم خرج ۰/۵ کیلوگرم | مقادیر بهینه برای جرم خرج ۱ کیلوگرم | مقادیر بهینه برای جرم خرج ۱/۵ کیلوگرم |
|--------------------------|---|---|---|
| ضخامت صفحات فلزی (mm) | ۳/۸۲ | ۳/۹۵ | ۴/۴۴ |
| تعداد صفحات در هسته | ۷ | ۷ | ۹ |
| ضخامت صفحات در هسته (mm) | ۰/۸ | ۰/۹ | ۰/۹ |

صفحات بالا و پایین سازه ساندویچی، با استفاده از مدل رگرسیون شرایط زیر تعیین گردید. به طوری که شرایط و متغیرهای موثر (ضخامت صفحات فلزی (X_1) ، ضخامت صفحات در هسته (X_2) ، تعداد صفحات در هسته (X_3) و جرم خرج (X_4) هر کدام در سطوح قبلی انتخاب شدند. مقادیر بهینه به دست آمده در جدول ۶ ارائه شده است.

بر اساس جرم خرج ۰/۵ کیلوگرم، سازه مورد بررسی دارای بیشترین مقاومت در برابر انفجار بوده و میزان جابجایی صفحات بالا و پایین آن به ترتیب برابر ۲۷/۱۱ و ۱۰/۷۸ میلی متر با میزان مطلوبیت ۰/۹۶ پیش بینی شد. به منظور بررسی نتایج به دست آمده برای جابجایی صفحات بالا و پایین، شرایط بهینه متغیرها در جرم خرج ۰/۵ کیلوگرم به دست آمده، برای مدل شبیه سازی شده، تعریف گردید. مقدار جابجایی صفحات بالا و پایین از نرم افزار آباکوس به ترتیب ۲۸/۷۵ و ۱۲/۱۳ میلی متر به دست آمد که حداکثر مقدار ۱۱ درصد خطا را نشان می دهد.

۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، پاسخ دینامیکی ساختارهای ساندویچی تحت بارگذاری انفجاری یکنواخت و همچنین بهینه سازی آماری پارامترهای موثر بر این سازه نظیر ضخامت صفحات فلزی، ضخامت صفحات در هسته و تعداد صفحات در هسته مورد مطالعه قرار گرفت. در گام اول در بخش عددی، با استفاده از نرم افزار المان محدود آباکوس به شبیه سازی رفتار دینامیکی ساختار ساندویچی با هسته لانه زنبوری و صحت سنجی آن با داده های تجربی دهارماسنا و همکاران [۱۰] پرداخته شد. در بخش شبیه سازی عددی، صفحه های فلزی با ضخامت های مختلف به صورت تغییر شکل پذیر مدل شده و مش مورد نظر ساختار نیز از نوع المان خطی چهاروجهی جامد انتخاب شده است. همچنین، به منظور کاهش محاسبات با توجه به مقارن

ضخامت صفحات در هسته (X_3) در شکل ۶ (ج) ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود، با افزایش ضخامت صفحات فلزی، ساختار ساندویچی از میزان جابجایی و تغییر شکل صفحات کاسته می شود و مقاومت بیشتری را در برابر بار آبی انفجاری یکنواخت نشان می دهد. همچنین بیشینه مقاومت سازه در برابر بارگذاری انفجاری و کمترین تغییر شکل در صفحات پایین در بیشترین ضخامت صفحات در هسته و همچنین بیشترین ضخامت صفحات فلزی سازه رخ داده است به طور مشابه در مورد صفحه بالایی سازه نیز نتایج مشابهی به دست آمد با این تفاوت که روند جابجایی صفحه بالا به صورت خطی و جابجایی صفحه پایین سازه به صورت غیرخطی بوده است. همچنین با بررسی نمودار پرفیدگی داده ها مشخص شد که ضخامت صفحات فلزی تأثیر بیشتری را بر روی بهبود مقاومت سازه در برابر بارگذاری انفجاری دارد و با افزایش ضخامت آن می توان به میزان قابل توجهی از جابجایی صفحات بالا و پایین سازه کاست.

به منظور بررسی اثر جرم خرج بر میزان مقاومت در برابر انفجار و جابجایی صفحات بالا و پایین سازه ساندویچی، و همچنین برهم کنش آن با سایر متغیرهای مورد بررسی، نمودار تأثیر متقابل جرم خرج و متغیرهای موثر بر روی پاسخ به دست آمد و در شکل ۷ نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می شود، افزایش جرم خرج سبب افزایش جابجایی صفحات بالا و پایین ساختار ساندویچی شده و از مقاومت انفجاری آن کاسته می شود. این تغییرات با متغیرهای موثر مورد بررسی نظیر ضخامت صفحات فلزی (X_1) و ضخامت صفحات در هسته (X_2) برهم کنش داشته و دارای تأثیر متقابل می باشند.

بر اساس نتایج به دست آمده و پس از تحلیل واریانس نتایج حاصل از مدل رگرسیون، به منظور تعیین شرایط بهینه ساخت ساندویچ پانل با هدف دستیابی به بیشترین مقاومت انفجاری و کمترین تغییر و جابجایی در

- in: Key Engineering Materials, Trans Tech Publ, 1998, pp. 501-552.
- [6] M. Meo, R. Vignjevic, G. Marengo, The response of honeycomb sandwich panels under low-velocity impact loading, International journal of mechanical sciences, 47(9) (2005) 1301-1325.
- [7] W. Goldsmith, J.L. Sackman, An experimental study of energy absorption in impact on sandwich plates, International Journal of Impact Engineering, 12(2) (1992) 241-262.
- [8] D. Radford, N. Fleck, V. Deshpande, The response of clamped sandwich beams subjected to shock loading, International Journal of Impact Engineering, 32(6) (2006) 968-987.
- [9] D. Radford, G. McShane, V. Deshpande, N. Fleck, The response of clamped sandwich plates with metallic foam cores to simulated blast loading, International Journal of solids and structures, 43(7-8) (2006) 2243-2259.
- [10] 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.
- [11] F. Zhu, L. Zhao, G. Lu, Z. Wang, Deformation and failure of blast-loaded metallic sandwich panels—experimental investigations, International Journal of Impact Engineering, 35(8) (2008) 937-951.
- [12] F. Zhu, L. Zhao, G. Lu, E. Gad, A numerical simulation of the blast impact of square metallic sandwich panels, International Journal of Impact Engineering, 36(5) (2009) 687-699.
- [13] F. Zhu, L. Zhao, G. Lu, Z. Wang, Structural response and energy absorption of sandwich panels with an aluminium foam core under blast loading, Advances in Structural Engineering, 11(5) (2008) 525-536.
- [14] F. Zhu, Z. Wang, G. Lu, L. Zhao, Analytical investigation and optimal design of sandwich panels subjected to shock loading, Materials & Design, 30(1) (2009) 91-100.
- [15] F. Zhu, Z. Wang, G. Lu, G. Nurick, Some theoretical بودن مسئله، مدل هندسی سازه به صورت سه بعدی و یک چهارم مدل شده و قسمت لانه زنبوری نیز به صورت پوسته با ضخامت $0/76$ میلی متر انتخاب شده است. همچنین در این بخش، از مدل کانوپ برای اعمال فشار و شوک ناشی از انفجار ماده تی ان تی استفاده شد. همچنین برای مدل سازی رفتار ماده، از مدل ماده پلاستیک جانسون-کوک همراه با معیار خسارت آن به کار گرفته شد. در این تحقیق از نرم افزار طراح آزمایش به منظور پردازش و تحلیل نتایج به دست آمده از شبیه سازی های عددی استفاده شد. در این تحقیق به منظور بررسی معنی دار بودن مدل، سطح اطمینان 95 درصد در نظر گرفته شد؛ بدان معناست که چنانچه سهم هر عامل در پاسخ برای مدل کمتر از $0/05$ باشد، مدل در نظر گرفته شده معنی دار است. با استفاده از تحلیل واریانس مقادیر عددی ضرایب متغیرها، سهم هر عامل در پاسخ و همچنین R^2 و R_{adj}^2 به دست آمد. مقایسه نتایج شبیه سازی عددی با نتایج تجربی متناظر با آن نشان داد که مدل عددی شبیه سازی شده دارای دقت بسیار خوبی بوده و قابلیت استناد دارد. با توجه به مقدار بالای ضریب همبستگی ($R^2=0/99$) به دست آمده از روش سطح پاسخ می توان نتیجه گرفت که نتایج حاصل از مدل رگرسیونی تطابق بسیار خوبی با نتایج تجربی مربوط به تغییر شکل صفحات بالا و پایین ساختار ساندویچی تحت بارگذاری انفجاری دارد. همچنین نتایج مربوط به بهینه سازی پارامترهای مورد مطالعه نشان داد که ساختار ساندویچی با بیشترین مقاومت در برابر بارگذاری انفجاری در ضخامت صفحات فلزی $3/82$ میلی متر، تعداد 7 صفحه در هسته، ضخامت صفحات در هسته $0/8$ میلی متر برای جرم خرج انفجاری $0/5$ کیلوگرم به دست می آید.

منابع

- [1] G. Lu, T. Yu, Energy absorption of structures and materials, Elsevier, 2003.
- [2] L.J. Gibson, M.F. Ashby, Cellular solids: structure and properties, Cambridge university press, 1999.
- [3] M.F. Ashby, T. Evans, N.A. Fleck, J. Hutchinson, H. Wadley, L. Gibson, Metal foams: a design guide, Elsevier, 2000.
- [4] S. Abrate, Impact on composite structures, Cambridge university press, 2005.
- [5] H. Wen, T. Reddy, S. Reid, P. Soden, Indentation, penetration and perforation of composite laminate and sandwich panels under quasi-static and projectile loading,

- response of aluminum foam core sandwich panels subjected to localized air blast loading, *Marine Structures*, 65 (2019) 343-361.
- [22] A. Maleki, S.A. Ahmadi, M.H. Pashaei, Three-dimensional Elastic-Plastic Deformation Analysis of Composite Sandwich Panel under blast loading, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, (2019) - (in Persian).
- [23] T. Børvik, L. Olovsson, A. Hanssen, K. Dharmasena, H. Hansson, H. Wadley, A discrete particle approach to simulate the combined effect of blast and sand impact loading of steel plates, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 59(5) (2011) 940-958.
- [24] G.R. Johnson, A constitutive model and data for materials subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures, *Proc. 7th Inf. Sympo. Ballistics*, (1983) 541-547.
- [25] 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.
- [26] G.F. Kinney, K.J. Graham, *Explosive shocks in air*, Springer Science & Business Media, 2013.
- [27] R.H. Myers, D.C. Montgomery, C.M. Anderson-Cook, *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*, John Wiley & Sons, 2016.
- considerations on the dynamic response of sandwich structures under impulsive loading, *International Journal of Impact Engineering*, 37(6) (2010) 625-637.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] J. Zamani, M. Goudarzi, Experimental and numerical investigation of the maximum deflection of circular aluminum plate subjected to free air explosion, *Modares Mechanical Engineering*, 15(1) (2015) 219-226.
- [19] S.m. Mirfalah nasiri, A. Basti, R. Hashemi, A. Darvizeh, Theoretical analysis of the temperature and strain rate effects on the forming limit diagram of AA3104, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, (2018) - (in Persian).
- [20] Y. Cheng, M. Liu, P. Zhang, W. Xiao, C. Zhang, J. Liu, H. Hou, The effects of foam filling on the dynamic response of metallic corrugated core sandwich panel under air blast loading–Experimental investigations, *International Journal of Mechanical Sciences*, 145 (2018) 378-388.
- [21] G. Chen, P. Zhang, J. Liu, Y. Cheng, H. Wang, Experimental and numerical analyses on the dynamic

جدول الف: مقادیر پارامترهای اندازه‌گیری شده و مورد بررسی .

Table A. Measured and examined parameters values

| ردیف | متغیرهای مستقل | | | | | | پاسخ |
|------|-----------------------|---------------------|-----------------------|--------------|-------------------------|--------------------------|------|
| | ضخامت صفحات فلزی (mm) | تعداد صفحات در هسته | ضخامت صفحات هسته (mm) | جرم خرج (kg) | جابجایی صفحات بالا (mm) | جابجایی صفحات پایین (mm) | |
| ۱ | ۲ | ۷ | ۰/۸ | ۰/۵ | ۳۳/۱۹۵ | ۱۸/۱۶۱ | |
| ۲ | ۲ | ۳ | ۰/۸ | ۱ | ۹۲/۵۵۷ | ۴۹/۰۷۷ | |
| ۳ | ۳ | ۵ | ۰/۶ | ۱/۵ | ۱۰۵/۵۴۷ | ۶۱/۸۲۴ | |
| ۴ | ۳ | ۹ | ۰/۶ | ۱ | ۷۶/۹۸۹ | ۳۶/۸۴ | |
| ۵ | ۳ | ۹ | ۰/۶ | ۱/۵ | ۱۰۴/۲۰۴ | ۶۱/۲۴۹ | |
| ۶ | ۴ | ۷ | ۰/۸ | ۰/۵ | ۲۵/۹۵ | ۹/۹۰۶ | |
| ۷ | ۳ | ۵ | ۰/۶ | ۱/۵ | ۱۰۵/۸۵۲ | ۶۲/۱۵۶ | |
| ۸ | ۵ | ۵ | ۰/۶ | ۱/۵ | ۸۲/۶۴۱ | ۴۶/۰۶۸ | |
| ۹ | ۲ | ۳ | ۰/۴ | ۱ | ۹۷/۳۷۵ | ۵۸/۱۲۷ | |
| ۱۰ | ۳ | ۵ | ۰/۶ | ۱/۵ | ۱۰۵/۹۱۶ | ۶۲/۳۸۲ | |
| ۱۱ | ۳ | ۵ | ۰/۶ | ۰/۵ | ۳۸/۵۴ | ۱۳/۹۴۱ | |
| ۱۲ | ۳ | ۱ | ۰/۶ | ۱ | ۸۳/۱۲۸ | ۴۵/۳۳۹ | |
| ۱۳ | ۳ | ۵ | ۰/۶ | ۱ | ۷۹/۳۳ | ۳۹/۱۰۸ | |
| ۱۴ | ۳ | ۵ | ۰/۶ | ۰/۵ | ۳۹/۱۳۵ | ۱۴/۶۲ | |
| ۱۵ | ۳ | ۵ | ۱ | ۱ | ۷۷/۰۹۵ | ۳۷/۲۵۳ | |
| ۱۶ | ۲ | ۷ | ۰/۴ | ۱/۵ | ۱۲۸/۷۴۶ | ۸۴/۳۹۳ | |
| ۱۷ | ۵ | ۵ | ۰/۶ | ۰/۵ | ۳۱/۳۹۱ | ۹/۲۰۲ | |
| ۱۸ | ۲ | ۷ | ۰/۴ | ۱ | ۹۲/۴۲۲ | ۵۹/۸۰۵ | |
| ۱۹ | ۳ | ۵ | ۰/۶ | ۰/۵ | ۳۹/۴۹۷ | ۱۵/۳۹۱ | |
| ۲۰ | ۳ | ۵ | ۰/۶ | ۰/۵ | ۳۹/۶۵۸ | ۱۵/۶۱۹ | |
| ۲۱ | ۲ | ۷ | ۰/۸ | ۱ | ۷۸/۲۷۸ | ۴۴/۴۲۱ | |

ادامه جدول الف: مقادیر پارامترهای اندازه‌گیری شده و مورد بررسی .

Continued table A.. Measured and examined parameters values

| پاسخ | | متغیرهای مستقل | | | | ردیف |
|-----------------------------|----------------------------|-----------------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|------|
| جابجایی صفحات پایین (mm) | جابجایی صفحات بالا (mm) | جرم خرج (kg) | ضخامت صفحات هسته (mm) | تعداد صفحات در هسته | ضخامت صفحات فلزی (mm) | |
| ۱۵/۷۴ | ۲۵/۱۰۴ | ۰/۵ | ۱ | ۵ | ۳ | ۲۲ |
| ۶۲/۲۳۱ | ۱۰۵/۹۳۹ | ۱/۵ | ۰/۶ | ۵ | ۳ | ۲۳ |
| ۳۹/۴۶۷ | ۷۹/۱۰۸ | ۱ | ۰/۶ | ۵ | ۳ | ۲۴ |
| ۳۸/۴۳۹ | ۷۸/۶۷۹ | ۱ | ۰/۶ | ۵ | ۳ | ۲۵ |
| ۴۲/۵۱۱ | ۸۷/۹۲۱ | ۱/۵ | ۰/۸ | ۷ | ۴ | ۲۶ |
| ۶۱/۷۳۲ | ۱۰۵/۲۶۷ | ۱/۵ | ۰/۶ | ۵ | ۳ | ۲۷ |
| ۲۵/۳۶۲ | ۶۵/۳۸۲ | ۱ | ۰/۶ | ۵ | ۵ | ۲۸ |
| ۳۹/۷۵۳ | ۷۹/۴۳۷ | ۱ | ۰/۶ | ۵ | ۳ | ۲۹ |
| ۶/۳۸ | ۵۳/۱۷۳ | ۰/۵ | ۰/۲ | ۵ | ۳ | ۳۰ |
| ۱۲/۲۷۶ | ۴۴/۶۶۶ | ۰/۵ | ۰/۶ | ۱ | ۳ | ۳۱ |
| ۶۷/۹۴۹ | ۱۰۹/۳۶۷ | ۱/۵ | ۰/۶ | ۱ | ۳ | ۳۲ |
| ۱۴/۸۲۱ | ۳۹/۲۴۳ | ۰/۵ | ۰/۶ | ۵ | ۳ | ۳۳ |
| ۳۳/۹۵ | ۶۸/۰۹ | ۱ | ۰/۴ | ۷ | ۴ | ۳۴ |
| ۹/۶۱ | ۳۸/۶۸۱ | ۰/۵ | ۰/۴ | ۷ | ۴ | ۳۵ |
| ۵۳/۷۹۵ | ۷۰/۵۴ | ۱ | ۰/۲ | ۵ | ۳ | ۳۶ |
| ۶۲/۰۹۴ | ۱۰۵/۸۷۸ | ۱/۵ | ۰/۶ | ۵ | ۳ | ۳۷ |
| ۱۴/۰۷ | ۳۲/۶۸۴ | ۰/۵ | ۰/۸ | ۳ | ۴ | ۳۸ |
| ۷۳/۸۰۷ | ۱۰۳/۷۲۹ | ۱/۵ | ۰/۲ | ۵ | ۳ | ۳۹ |
| ۱۳/۸۸۳ | ۳۸/۴۲۲ | ۰/۵ | ۰/۶ | ۵ | ۳ | ۴۰ |
| ۳۲/۰۶۷ | ۵۷/۳۷۳ | ۰/۵ | ۰/۶ | ۵ | ۱ | ۴۱ |
| ۳۹/۸۶۴ | ۸۰/۱۴۸ | ۱ | ۰/۶ | ۵ | ۳ | ۴۲ |
| ۶۰/۳۳۹ | ۱۰۲/۱۴۷ | ۱/۵ | ۱ | ۵ | ۳ | ۴۳ |

ادامه جدول الف: مقادیر پارامترهای اندازه‌گیری شده و مورد بررسی .

Continued table A.. Measured and examined parameters values

| پاسخ | | متغیرهای مستقل | | | | ردیف |
|-----------------------------|----------------------------|-----------------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|------|
| جابجایی صفحات پایین (mm) | جابجایی صفحات بالا (mm) | جرم خرج (kg) | ضخامت صفحات هسته (mm) | تعداد صفحات در هسته | ضخامت صفحات فلزی (mm) | |
| ۹۰/۰۴۶ | ۱۰۵/۳۰۵ | ۱/۵ | ۰/۴ | ۳ | ۲ | ۴۴ |
| ۵۴/۰۲۳ | ۹۰/۶۹۲ | ۱/۵ | ۰/۴ | ۷ | ۴ | ۴۵ |
| ۲۹/۸۳۹ | ۶۷/۷۸۵ | ۱ | ۰/۸ | ۷ | ۴ | ۴۶ |
| ۳۱/۰۹۱ | ۷۳/۲۷۲ | ۱ | ۰/۸ | ۳ | ۴ | ۴۷ |
| ۲۳/۸۹ | ۴۳/۵۸۸ | ۰/۵ | ۰/۸ | ۳ | ۲ | ۴۸ |
| ۵۰/۲۵۲ | ۹۳/۹۸۴ | ۱/۵ | ۰/۸ | ۳ | ۴ | ۴۹ |
| ۵/۱۴ | ۴۲/۴۸۸ | ۰/۵ | ۰/۴ | ۳ | ۴ | ۵۰ |
| ۱۸/۷۱۱ | ۵۲/۱۴۴ | ۰/۵ | ۰/۴ | ۷ | ۲ | ۵۱ |
| ۱۶/۵۷۶ | ۶۰/۶۴۷ | ۰/۵ | ۰/۴ | ۳ | ۲ | ۵۲ |
| ۵۶/۸۶۲ | ۸۹/۱۳۵ | ۱/۵ | ۰/۴ | ۳ | ۴ | ۵۳ |
| ۳۸/۸۸۴ | ۶۸/۲۱۳ | ۱ | ۰/۴ | ۳ | ۴ | ۵۴ |
| ۸۱/۰۲۴ | ۱۲۴/۹۱۴ | ۱/۵ | ۰/۸ | ۳ | ۲ | ۵۵ |
| ۷۲/۹۰۴ | ۱۰۸/۳۵۱ | ۱ | ۰/۶ | ۵ | ۱ | ۵۶ |
| ۱۲/۲۵۶ | ۳۲/۳۰۷ | ۰/۵ | ۰/۶ | ۹ | ۳ | ۵۷ |
| ۳۷/۸۸۵ | ۷۸/۰۶۹ | ۱ | ۰/۶ | ۵ | ۳ | ۵۸ |
| ۷۵/۷۲۴ | ۱۱۷/۸۶ | ۱/۵ | ۰/۸ | ۷ | ۲ | ۵۹ |
| ۱۱۶/۹۵۹ | ۱۵۱/۸۹ | ۱/۵ | ۰/۶ | ۵ | ۱ | ۶۰ |

