



# Experimental Investigation and Regression Analysis on Plastic Deformation of Sandwich Panels Made of Reinforced Polymeric Foam under Explosive Loading

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Hatampour M.<sup>1</sup> MSc,  
Hosseini R.<sup>1</sup> PhD,  
Hasanzadeh M.<sup>2\*</sup> PhD,  
Vahedi Kh.<sup>1</sup> PhD

### How to cite this article

Hatampour M, Hosseini R, Hasanzadeh M, Vahedi Kh. Experimental Investigation and Regression Analysis on Plastic Deformation of Sandwich Panels Made of Reinforced Polymeric Foam under Explosive Loading. 2020; 20(11):2671-2678.

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Department of Textile Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

### \*Correspondence

Address: Department of Textile Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

Phone: +98 353 1232569

Fax: +98-353-8209817

m.hasanzadeh@yazd.ac.ir

### Article History

Received: October 19, 2020

Accepted: November 07, 2020

ePublished: November 20, 2020

## ABSTRACT

In this paper, experimental investigation and regression analysis are investigated on plastic deformation of polyurethane composite sandwich panels reinforced with nanoclay under blast loading. For this purpose, polyurethane sandwich panels were prepared with different percentages of nanoclay and in different densities. The mechanical properties of nanoclay-reinforced foams were studied by the tensile-compression test. Explosive shock tube device and C4 explosive material were used for explosive loading. Then, the response surface methodology was used to investigate the effect of significant parameters, the percentage of nanoclay and density of polyurethane foam, on the displacement of composite sandwich panels and to optimize the parameters for minimum deformation. The results obtained from the regression model at 95% confidence level indicate a very good agreement between the experimental results and the values predicted by the model. The high value of the correlation coefficient between the studied parameters and the amount of plastic deformation of the sandwich panel ( $R^2 = 99\%$ ) indicate that the proposed model has higher accuracy. Finally, the optimal conditions for achieving the minimum displacement of composite sandwich panels were determined as 1.57% nanoclay content and foam density of  $130 \text{ kg/m}^3$ .

**Keywords** Polyurethane foam, Nanoclay, Explosive loading, Optimization, Response surface methodology

## CITATION LINKS

[1] Polymeric foams: science and technology [2] Dynamic response and optimal design of curved metallic sandwich panels under blast loading [3] Polyurethane elastomers. Progress in Polymer Science [4] Response of thin circular plates to central blast loading [5] Formulation, preparation, and characterization of polyurethane foams [6] Using response surface method and genetic algorithm for optimization of fiber metal laminate stacking sequences subjected to explosion loading [7] Experimental investigation of energy absorption in foam filled sandwich beams with expanded metal sheet as core under quasi-static bending [8] Optimum Selection of Corrugated Sandwich Panels Shape and Materials Subjected to Blast Loading [9] Investigation of fiber reinforcement effects in the foam core of sandwich structures under high speed impact [10] Use of reinforced rigid polyurethane foam for blast hazard mitigation [11] Study of Sandwich Panels with Graduated Foam Cores under Explosive loading [12] The influence of uniform and localized blast loading on the response of single-layered circular plates... [13] Metal Foams [14] An Experimental Study of the Response of Isotropic Circular Sheets to Loading from an Underwater Explosion Caused by a Cone Shock Tube [15] Blast response analysis of reinforced concrete slabs: experimental procedure and numerical simulation [16] The effect of extreme dynamic loading on large plastic deformation of quadrangular plates... [17] Preparation and sound absorption properties of barium titanate/nitrile butadiene rubber-polyurethane foam composites with stratified structure [18] Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments [19] Influence of nanoclay reinforced polyurethane foam toward composite sandwich structure behavior under high velocity impact [20] Rigid polyurethane foams with infused nanoclays: relationship between cellular structure and thermal conductivity [21] Reinforcement of soy polyol-based rigid polyurethane foams by cellulose microfibers and nanoclays

## بررسی تجربی و تحلیل رگرسیونی تغییر شکل پلاستیک ساندویچ پنل‌های کامپوزیتی تقویت شده با فوم پلیمری تحت بارگذاری انفجاری

مجید حاتم پور MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

روح اله حسینی PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

مهدی حسن زاده\* PhD

دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

خداداد واحدی PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

### چکیده

در این مقاله، به بررسی تجربی و تحلیل رگرسیونی تغییر شکل پلاستیک ساندویچ پنل کامپوزیتی پلی‌یورتان تقویت شده با ذرات صفحه‌ای نانو رس تحت بارگذاری انفجاری پرداخته شده است. برای این منظور ساندویچ پنل پلی‌یورتان با درصد‌های مختلف نانو رس و در چگالی‌های مختلف تهیه شد. خواص مکانیکی فوم‌های تقویت شده با نانو رس توسط آزمون کشش-فشار مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین از دستگاه لوله شوک انفجاری و ماده منفجره C4 به منظور بارگذاری انفجاری استفاده شد. در ادامه به منظور بررسی اثر پارامترهای موثر نظیر درصد نانو رس و چگالی فوم پلی‌یورتان بر میزان جابجایی صفحات ساندویچ پنل کامپوزیتی و بهینه‌سازی آنها به منظور کمترین تغییر شکل، از روش سطح پاسخ استفاده شد. نتایج بدست آمده از مدل رگرسیونی در سطح اطمینان ۹۵٪ حاکی از مطابقت بسیار خوب نتایج تجربی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل بوده است. مقدار بالای ضریب تعیین بین پارامترهای بررسی شده و میزان تغییر شکل پلاستیک ساندویچ پنل ( $R^2 = 99\%$ ) حاکی از آن است که مدل ارائه شده از دقت بالاتری برخوردار بوده است. در پایان شرایط بهینه برای دستیابی به کمترین میزان جابجایی صفحات ساندویچ پنل کامپوزیتی بصورت ۱/۵۷ درصد نانو رس و چگالی فوم  $130 \text{ kg/m}^3$  تعیین گردید. **کلیدواژه‌ها:** فوم پلی‌یورتان، نانو رس، بارگذاری انفجاری، بهینه‌سازی، روش سطح پاسخ

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۱۷

\*نویسنده مسئول: m.hasanzadeh@yazd.ac.ir

### ۱- مقدمه

مراکز صنعتی، نظامی، پالایشگاه‌ها، ساختمان‌های مهم دولتی و همچنین ادوات جنگی از مهم‌ترین اهداف دشمن در هنگام جنگ یا وقوع حملات تروریستی هستند. علاوه بر این انفجارهای غیرعمدی در محیط‌های صنعتی و خانگی و حتی تصادفات حمل‌ونقلی تهدیدی بالقوه برای زیرساخت‌ها و ساختمان‌های موجود در یک منطقه به حساب می‌آیند. از این رو یافتن راهکاری برای محافظت از این سازه‌ها و تجهیزات ضروری به نظر می‌رسد. در طی سال‌های اخیر با گسترش جوامع صنعتی و همچنین

فعالیت‌های تروریستی در جهان، محققان شیوه‌های گوناگونی برای حفاظت از سازه‌ها در برابر ضربه و انفجار ارائه داده‌اند[1]. یکی از این شیوه‌ها استفاده از پوشش‌های فدا شونده‌ای است که بر روی سازه‌ها یا تجهیزات نصب می‌گردند تا در هنگام وقوع انفجار یا برخورد پرتابه، با انجام تغییر شکل‌های پلاستیک زیاد، انرژی ناشی از موج شوک را جذب نموده و تا حد ممکن از وارد آمدن خسارت به سازه‌ی اصلی جلوگیری نمایند. این پوشش‌ها غالباً دارای ساختاری چندلایه بوده و یک هسته مرکزی از جنس فوم‌های فلزی یا پلیمری دارند. فوم‌های به‌کاررفته در این پوشش‌ها با توجه به ساختارشان، نقش اصلی را در جذب و استهلاک انرژی ناشی از امواج شوک ایفا می‌کنند[2]. سازه‌های ساندویچی از دو پوسته نازک که یک هسته مرکزی را در بر گرفته، تشکیل می‌گردد که قرارگیری پوسته‌ها و هسته بدین حالت، باعث بهبود عملکرد سازه در برابر انفجار می‌شود. رویه‌ها معمولاً از مواد جامد با استحکام بالا ساخته می‌شوند در حالی که هسته‌های سلولی، مانند فوم‌های فلزی، موادی با تخلخل زیاد هستند. در معرض بار انفجاری، هسته سلولی از قابلیت تغییر شکل پلاستیک بالایی برخوردار است، بنابراین مقدار انرژی زیادی را جذب می‌کند و نسبت به سازه یکپارچه با جرم یکسان، عملکرد بهتری را در برابر انفجار از خود نشان می‌دهد[3,4].

در این میان فوم‌های پلیمری با توجه به وزن و هزینه‌ی تولید کمتر و همچنین ساخت و نصب راحت‌تر نسبت به فوم‌های فلزی دارای کاربرد گسترده‌تری می‌باشند. فوم‌های پلی‌یورتان از جمله فوم‌های پلیمری هستند که به‌طور گسترده در صنایع مختلف از جمله صنایع نظامی مورد استفاده قرار می‌گیرند[5]. از این نوع فوم به‌طور گسترده برای ساخت زره‌پوش‌های ادوات جنگی، صفحات کامپوزیتی و غیره استفاده می‌شود. بطور مثال، در تحقیقی که قاسمی و همکارانش[6] انجام دادند اثرات انفجار بر روی چندلایه هیبرید کامپوزیتی کربن-اپوکسی با صفحات فلزی از جنس آلومینیوم، تحلیل شده و چیدمان لایه‌ای کامپوزیتی کربن-اپوکسی بهینه‌سازی گردید. برای این منظور، ابتدا موج حاصل از انفجار به‌صورت تحلیلی مدل‌سازی شده و اثرات موج انفجار بر روی سازه مطالعه شد. با تغییر چیدمان الیاف و به کمک روش سطح پاسخ، تابع تقریب مناسب برای بهینه‌سازی تعیین شده است. آنگاه با استفاده از الگوریتم ژنتیک، چیدمان بهینه برای چندلایه کامپوزیت در شرایط مختلف تکیه‌گاهی به‌دست آمده و نتایج بدست آمده، مقایسه، تحلیل و ارزیابی شدند. نتایج نشان می‌دهد که با تغییر در چیدمان لایه‌ها و بهینه‌سازی، ضریب اطمینان برای مقابله با اثرات انفجار در شرایط تکیه‌گاهی مختلف به‌طور چشمگیری افزایش یافته و جابجایی نقاط کاهش می‌یابد. تقی‌پور و دامغانی نوری[7]، تأثیر روش پرکردن هسته‌های مشبک تیرهای ساندویچی، با فوم‌های پلی‌یورتان از نوع سخت با وزن کم را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمایش خمشی نشان داد که ظرفیت

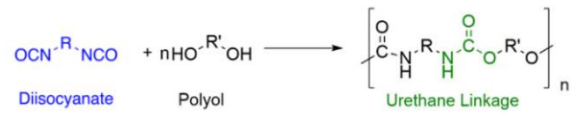
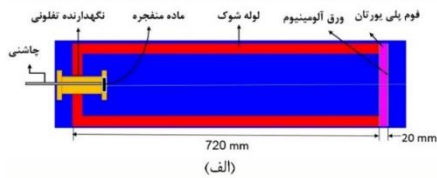
جذب انرژی ویژه در یک تیر ساندویچی تقویت شده با فوم در مقایسه با نمونه مشابه توخالی، ۷۴ درصد افزایش یافته است. در مطالعه ای دیگر، سبزواری<sup>[8]</sup> رفتار ساندویچ پنل از جنس آلومینیوم و فولاد را در برابر بارهای انفجاری مورد بررسی قرار داد که در فرایند تحلیل، چهار نوع ورق موج‌دار مستطیلی، دوزنقه‌ای، مثلثی و بیضوی را استفاده شد. نتایج بررسی نشان داد که پنل‌هایی که تماماً از جنس آلومینیوم می‌باشند نسبت به نمونه‌های دیگر، انرژی بیشتری مستهلک می‌کنند. بیشترین تغییر شکل متعلق به هسته‌های بیضوی شکل و مثلثی است و نمونه‌های دوزنقه‌ای و مستطیلی توانایی استهلاک انرژی کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارند. همچنین مقدار انرژی کرنشی پلاستیک برای نمونه‌های با مقطع مثلثی و بیضوی بیش‌تر از نمونه‌های دیگر می‌باشد. شریف‌زاده و همکارانش<sup>[9]</sup> نیز حضور تقویت‌کننده الیاف شیشه کوتاه در درصدهای ۵، ۲/۵ و ۱۰ درصد فومی ساختار ساندویچی تحت ضربه سرعت بالا را با ساختارهای ساندویچی بدون حضور تقویت‌کننده در هسته فومی مورد بررسی قرار دادند. ساختارهای ساندویچی متشکل از دو صفحه کامپوزیتی سه لایه از جنس الیاف شیشه/پلی‌استر بود که بین آن‌ها با استفاده از فوم پلی‌یورتان سخت با چگالی ۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب پر شده بود. در این مطالعه صفحات کامپوزیتی، فوم سخت پلی‌یورتان حاوی تقویت‌کننده الیاف شیشه، فوم سخت پلی‌یورتان بدون تقویت‌کننده و ساندویچ پنل به‌طور جداگانه تحت ضربه سرعت بالا و در سرعت‌های اولیه ۲۰۲، ۲۲۳، ۲۳۸ متر بر ثانیه قرار گرفتند و سرعت خروج، انرژی جذب شده و اثر الیاف شیشه در هر یک مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که نمونه حاوی ۱۰ درصد الیاف شیشه بیشترین جذب انرژی و کمترین سرعت خروج را نسبت به سایر درصدهای تقویت‌کننده دارد و بهترین عملکرد بالستیکی را نشان داد. مصطفی و همکارانش<sup>[10]</sup> به بررسی عملکرد فوم‌های سخت پلی‌یورتان در کاهش خسارات ناشی از انفجار پرداخته‌اند. در این پژوهش از چهار نمونه فوم پلی‌یورتان استفاده شده است که عبارتند از دو نمونه تقویت نشده با چگالی‌های ۶۸/۸ و ۹۱/۲ کیلوگرم بر مترمکعب و دو نمونه تقویت شده با ذرات ماسه ۳۵ میکرومتری با چگالی‌های ۹۵/۷ (۱۰ درصد ماسه) و ۱۰۲/۱ کیلوگرم بر مترمکعب (۲۰ درصد ماسه). در مطالعه دیگر که توسط خندابی و همکارانش<sup>[11]</sup> صورت گرفت، جذب انرژی سازه‌های ساندویچی تحت بار انفجاری با رویه‌های آلومینیومی و هسته فومی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج پژوهش نشان داد که با افزایش ضخامت هسته تک لایه، جابجایی رویه پشتی ساندویچ پنل کاهش یافته و جذب انرژی آن افزایش می‌یابد. همچنین در ساندویچ پنل مدرج، میزان جابجایی رویه پشتی در حالتی که لایه فوم با چگالی بیشتر در سمت موج انفجار قرار دارد، نسبت به ساندویچ پنل با هسته تک لایه و جرم یکسان، کم‌تر بوده است. همچنین توانایی

جذب انرژی ویژه در یک تیر ساندویچی تقویت شده با فوم در مقایسه با نمونه مشابه توخالی، ۷۴ درصد افزایش یافته است. در مطالعه ای دیگر، سبزواری<sup>[8]</sup> رفتار ساندویچ پنل از جنس آلومینیوم و فولاد را در برابر بارهای انفجاری مورد بررسی قرار داد که در فرایند تحلیل، چهار نوع ورق موج‌دار مستطیلی، دوزنقه‌ای، مثلثی و بیضوی را استفاده شد. نتایج بررسی نشان داد که پنل‌هایی که تماماً از جنس آلومینیوم می‌باشند نسبت به نمونه‌های دیگر، انرژی بیشتری مستهلک می‌کنند. بیشترین تغییر شکل متعلق به هسته‌های بیضوی شکل و مثلثی است و نمونه‌های دوزنقه‌ای و مستطیلی توانایی استهلاک انرژی کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارند. همچنین مقدار انرژی کرنشی پلاستیک برای نمونه‌های با مقطع مثلثی و بیضوی بیش‌تر از نمونه‌های دیگر می‌باشد. شریف‌زاده و همکارانش<sup>[9]</sup> نیز حضور تقویت‌کننده الیاف شیشه کوتاه در درصدهای ۵، ۲/۵ و ۱۰ درصد فومی ساختار ساندویچی تحت ضربه سرعت بالا را با ساختارهای ساندویچی بدون حضور تقویت‌کننده در هسته فومی مورد بررسی قرار دادند. ساختارهای ساندویچی متشکل از دو صفحه کامپوزیتی سه لایه از جنس الیاف شیشه/پلی‌استر بود که بین آن‌ها با استفاده از فوم پلی‌یورتان سخت با چگالی ۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب پر شده بود. در این مطالعه صفحات کامپوزیتی، فوم سخت پلی‌یورتان حاوی تقویت‌کننده الیاف شیشه، فوم سخت پلی‌یورتان بدون تقویت‌کننده و ساندویچ پنل به‌طور جداگانه تحت ضربه سرعت بالا و در سرعت‌های اولیه ۲۰۲، ۲۲۳، ۲۳۸ متر بر ثانیه قرار گرفتند و سرعت خروج، انرژی جذب شده و اثر الیاف شیشه در هر یک مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که نمونه حاوی ۱۰ درصد الیاف شیشه بیشترین جذب انرژی و کمترین سرعت خروج را نسبت به سایر درصدهای تقویت‌کننده دارد و بهترین عملکرد بالستیکی را نشان داد. مصطفی و همکارانش<sup>[10]</sup> به بررسی عملکرد فوم‌های سخت پلی‌یورتان در کاهش خسارات ناشی از انفجار پرداخته‌اند. در این پژوهش از چهار نمونه فوم پلی‌یورتان استفاده شده است که عبارتند از دو نمونه تقویت نشده با چگالی‌های ۶۸/۸ و ۹۱/۲ کیلوگرم بر مترمکعب و دو نمونه تقویت شده با ذرات ماسه ۳۵ میکرومتری با چگالی‌های ۹۵/۷ (۱۰ درصد ماسه) و ۱۰۲/۱ کیلوگرم بر مترمکعب (۲۰ درصد ماسه). در مطالعه دیگر که توسط خندابی و همکارانش<sup>[11]</sup> صورت گرفت، جذب انرژی سازه‌های ساندویچی تحت بار انفجاری با رویه‌های آلومینیومی و هسته فومی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج پژوهش نشان داد که با افزایش ضخامت هسته تک لایه، جابجایی رویه پشتی ساندویچ پنل کاهش یافته و جذب انرژی آن افزایش می‌یابد. همچنین در ساندویچ پنل مدرج، میزان جابجایی رویه پشتی در حالتی که لایه فوم با چگالی بیشتر در سمت موج انفجار قرار دارد، نسبت به ساندویچ پنل با هسته تک لایه و جرم یکسان، کم‌تر بوده است. همچنین توانایی

## ۲- مطالعات تجربی

پلی‌ال Pluracol 735 ساخت شرکت BASF آلمان و ایزوسیانات آروماتیک Millionate MR-200 محصول شرکت TOSOH ژاپن به عنوان مواد اولیه برای ساخت فوم پلی‌یورتان تهیه شدند. ذرات صفحه‌ای نانو رس مونت موریلونیت با متوسط اندازه ذرات ۱-۲ نانومتر و سطح ویژه  $270-220 \text{ m}^2/\text{g}$  از شرکت سیگما آلد ریچ خریداری شد. از ورق آلومینیوم آلیاژ ۱۱۰۰ با ضخامت یک میلیمتر به عنوان صفحات جلو و عقب ساندویچ پنل کامپوزیتی استفاده شد.

به منظور تهیه فوم پلی‌یورتان تقویت شده با نانورس ابتدا مقدار مشخص از نانو رس (درصدهای ۰/۰۰۳ تا ۲/۳ وزنی) در پلی‌ال Pluracol 735 پخش شد. برای این که رطوبت موجود در نانورس حذف شود، به مدت ۲ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس قرار داده شد. سپس پلی‌ال عاری از رطوبت در پلی‌ال با استفاده از همزن مکانیکی (۱۰۰ rpm) مخلوط شدند. در ادامه جهت توزیع مناسب‌تر نانو رس در بستر پلی‌ال، مخلوط تهیه شده، تحت امواج فراصوت به مدت ۱۰ دقیقه و با قدرت ۱۰۰ وات قرار گرفت. سپس مخلوط حاصل با ایزوسیانات و در حضور عامل فوم‌زا (آب)، واکنش داده و فوم پلی‌یورتان تهیه شد. شکل ۱ واکنش شیمیایی تشکیل فوم پلی‌یورتان را نشان می‌دهد.



شکل ۱) شماتیک واکنش شیمیایی سنتز فوم پلی یورتان

از آنجایی که میزان عامل فومزا بر میزان چگالی فوم پلی یورتان موثر است، برای دستیابی با چگالی‌های مختلف از درصد‌های مختلف عامل فومزا استفاده شد. پلی‌ال و ایزوسیانات با نسبت‌های استوکیومتری ۱:۱ با هم مخلوط شده و برای اختلاط بهتر و یکنواخت از همزن مکانیکی با دور ۱۰۰ rpm استفاده شد. یکی دیگر از عوامل موثر بر چگالی فوم، دمای واکنش است. برای این منظور واکنش در دمای ۲۵ درجه سلسیوس انجام شد. به منظور تشکیل فوم، از قالب مربعی با ابعاد ۲۵\*۲۵ سانتیمتر مربع و با ارتفاع ۲/۲ سانتیمتر استفاده شد. ابتدا صفحه آلومینیوم در کف قالب قرار داده شد و سپس ترکیبات فوم در قالب ریخته شد. با شروع واکنش و تشکیل فوم، صفحه آلومینیومی دیگر بر روی فوم قرار گرفت تا ساختار ساندویچ پنل کامپوزیتی آماده شود. پس از گذشت ۲۴ ساعت در دمای محیط، فوم کاملا شکل گرفته و در ادامه به مدت ۲ ساعت در دمای ۸۰ درجه سلسیوس قرار گرفت تا واکنش کامل شود.

به منظور بررسی خواص مکانیکی فوم‌های پلی‌یورتان تقویت شده با ذرات صفحه‌ای نانو رس، از دستگاه تست کشش-فشار SAF-50 (سنتام) استفاده شد. برای این منظور نمونه‌های تهیه شده مطابق با استاندارد ASTM D1621-00 با سرعت یک میلیمتر بر دقیقه تحت فشار قرار گرفتند. به منظور بارگذاری انفجاری بر روی ساندویچ پنل‌های کامپوزیتی تهیه شده، از دستگاه لوله شوک انفجاری (شکل ۲ ب) استفاده شد. برای ایجاد موج انفجار از ماده منفجره C4 به مقدار ۴ گرم با چاشنی الکتریکی شماره ۸ استفاده شد. نمونه‌های آماده شده با ابعاد ۲۵\*۲۵ سانتیمتر مربع با ضخامت ۲۲۰ میلیمتر مورد آزمون قرار گرفتند. پس از انجام آزمون، میزان تغییر شکل پلاستیک ساندویچ پنل کامپوزیتی اندازه‌گیری شد. شکل ۲، تصویر شماتیک و واقعی دستگاه لوله شوک مورد استفاده برای بارگذاری انفجاری ساندویچ پنل کامپوزیتی را نشان می‌دهد.

### ۳- طراحی آزمایش

در این تحقیق یک طرح مرکب مرکزی (CCD) دو متغیره بمنظور تعیین ارتباط بین میزان تغییر شکل پلاستیک ساندویچ پنل و پارامترهای فوم پلی یورتان شامل درصد تقویت کننده نانو رس و چگالی فوم در نظر گرفته شد و در خروجی آن، تعداد ۱۳ آزمایش (تولید نمونه) مورد مطالعه قرار گرفت. مدل مرتبه دوم که بصورت رابطه (۱) بیان می‌شود بر روی داده‌های بدست آمده اعمال گردید.

شکل ۲) الف) تصویر شماتیک و ب) دستگاه لوله شوک مورد استفاده در این تحقیق.

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

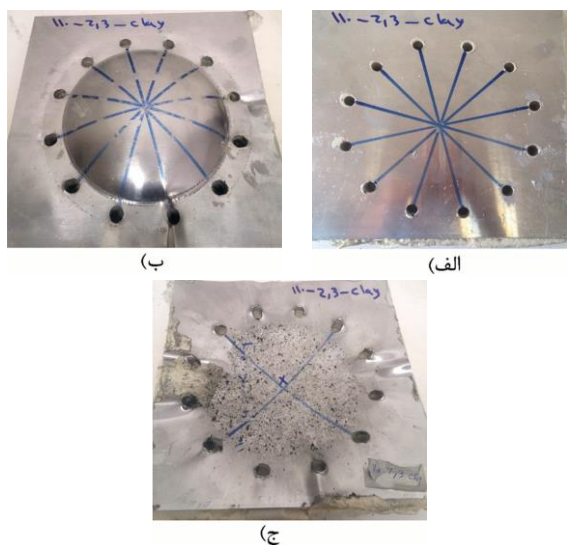
که در آن  $Y$  پاسخ محاسبه شده (میزان تغییر شکل پلاستیک)،  $x_i$  و  $x_j$  متغیرهای کدگذاری شده،  $\beta_0$  ضریب ثابت،  $\beta_j$  ضریب خطی،  $\beta_{ij}$  ضریب مرتبه دوم، و  $\beta_{ij}$  ضریب متقابل می‌باشد [18].

روش RSM به منظور تجزیه و تحلیل نتایج، از ابزار قدرتمندی به نام تحلیل واریانس (ANOVA) استفاده می‌کند. نتیجه‌های تحلیل ANOVA 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. در این تحقیق از نرم‌افزار Design Expert به منظور پردازش و تحلیل نتایج بدست آمده استفاده گردید. در جدول ۱ مقادیر پارامترهای مورد بررسی و همچنین نتایج حاصل از اندازه‌گیری میزان تغییر شکل پلاستیک ساندویچ پنل در شرایط مختلف ارائه شده است.

جدول ۱) مقادیر اندازه‌گیری شده تغییر شکل پلاستیک صفحه پشتی ساندویچ پنل

ردیف	چگالی فوم (X <sub>1</sub> ) (kg/m <sup>3</sup> )	درصد نانو رس (X <sub>2</sub> ) (wt.%)	تغییر شکل صفحه پشتی (Y) (mm)
۱	۱۴۷	۲	۱۹/۵
۲	۱۳۵	۲	۱۵
۳	۵۰	۲	۱۷/۹
۴	۱۱۰	۲	۱۵/۴
۵	۱۰۴	۱/۱۵	۱۶/۷
۶	۱۶۵	۱/۱۵	۱۵/۳
۷	۵۰	۱/۱۵	۱۸/۸
۸	۱۳۰	۰/۳	۱۲/۴
۹	۵۳	۰/۳	۱۵/۲
۱۰	۱۶۵	۰/۳	۱۳
۱۱	۱۱۰	۲/۳	۲۳/۷
۱۲	۱۱۰	۰/۰۰۳	۱۷/۵
۱۳	۱۳۶	۰/۰۰۳	۱۰

کیلوگرم بر مترمکعب، بیشترین میزان جذب انرژی مشاهده گردید. این درحالیست که در فوم های با چگالی بیشتر، ساختار ترد فوم پلی یورتان، سبب شکست و رشد ترک در فوم گردید. در نمونه های حاوی ۲/۳ درصد نانو رس، به دلیل عدم توزیع مناسب نانو رس در ساختار فوم، چسبندگی فوم به دیواره آلومینیومی ساندویچ پنل نیز کاهش یافته و تحت بارگذاری انفجاری، جدایش فوم و صفحه آلومینیومی مشاهده گردید.



شکل ۳) تصویر ساندویچ پنل کامپوزیتی تقویت شده با فوم پلی یورتان (چگالی ۱۱۰ kg/m<sup>3</sup> و ۲/۳ % نانو رس)، الف) قبل از بارگذاری و ب) صفحه پشتی و ج) صفحه رویی پس از بارگذاری انفجاری.

### ۵- تحلیل واریانس

در این تحقیق به منظور بررسی معنی دار بودن مدل، سطح اطمینان ۹۵٪ در نظر گرفته شد. بر این اساس، چنانچه p-value برای یک مدل کمتر از ۰/۰۵ باشد، مدل در نظر گرفته شده معنی دار می باشد. پس از بررسی مدل های مختلف بررسی شده و استفاده از روش تحلیل واریانس، تحلیل پارامترهای مستقل و کمیت های R<sup>2</sup> و R<sup>2</sup><sub>adj</sub> مشخص شد که از بین مدل های پیشنهادی، مدل درجه سه، تطابق بهتری با نتایج آزمایش های بدست آمده از آزمون انفجار برای تغییر شکل پلاستیک صفحه پشتی ساندویچ پنل دارد. بر این اساس مقادیر عددی ضرایب متغیرها، p-value، و همچنین R<sup>2</sup> و R<sup>2</sup><sub>adj</sub> بدست آمد که در جدول ۳ مشاهده می شود. مدل مرتبه سوم بدست آمده برای سطح پاسخ جابجایی صفحه پشتی ساندویچ پنل نیز بصورت نشان داده شده در رابطه (۲) می باشد.

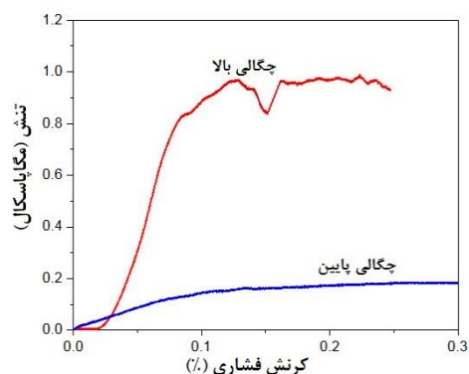
$$Y = 18.22 - 18.82X_1 - 7.56X_2 + 1.68X_1X_2 - 4.92X_1^2 + 2.20X_2^2 + 6.90X_1^2X_2 + 5.53X_1X_2^2 + 13.48X_1^3 + 5.02X_2^3 \quad (2)$$

مقدار R<sup>2</sup> و R<sup>2</sup><sub>adj</sub> به ترتیب برابر ۰/۹۹ و ۰/۹۸ می باشد. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که مدل ارائه شده برای این آزمایش ها مناسب بوده و مقادیر به دست آمده از بارگذاری انفجار با مقادیر پیش بینی شده بر اساس مدل مطابقت دارد.

### ۴- نتایج و بحث

#### ۴-۱- فوم پلی یورتان تقویت شده با نانو رس

پس از تهیه فوم پلی یورتان با درصد های مختلف از نانو رس، ویژگی های ظاهری آن ها مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. مشاهدات بعمل آمده حاکی از آن بود که حضور نانو رس در ساختار فوم باعث افزایش تعداد سلول ها در واحد حجم فوم می شود. همچنین افزایش ضخامت دیواره سلول ها و کاهش اندازه آن ها در مقایسه با نمونه فوم بدون نانو رس مشاهده گردید. ذرات صفحه ای نانو رس از دو طریق باعث کاهش اندازه سلول ها در فوم پلی یورتان می گردد: الف) نانو رس پخش شده در ساختار فوم به عنوان مکان هسته زایی هیدروژن در مرحله تشکیل حباب عمل کرده و به سرعت باعث افزایش تعداد سلول در واحد حجم فوم می شود. ب) ذرات نانو رس با افزایش ویسکوزیته محیط واکنش، در برابر رشد فوم و بالا رفتن آن در قالب، مقاومت بیشتری نشان می دهد. بطور کلی این دو عامل سبب کاهش اندازه سلول ها و افزایش تعداد سلول در واحد حجم فوم می شود. بعلاوه با افزایش درصد نانو رس، دیواره سلول ها نیز ضخیم تر شده و سبب تردی و شکنندگی فوم می شود. همچنین با افزایش درصد نانو رس، تعداد سلول های باز افزایش یافت [19-21]. نمودار ۱ خواص مکانیکی فوم پلی یورتان در دو چگالی کم (۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب) و زیاد (۱۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب) را نشان می دهد.

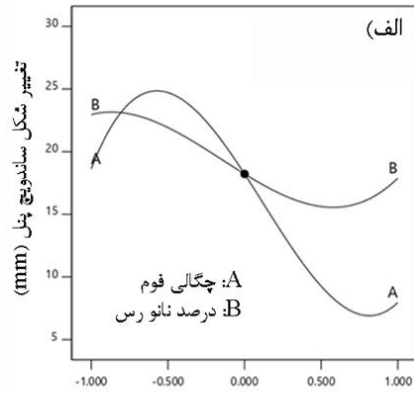


نمودار ۱) منحنی تنش-کرنش فشاری فوم پلی یورتان

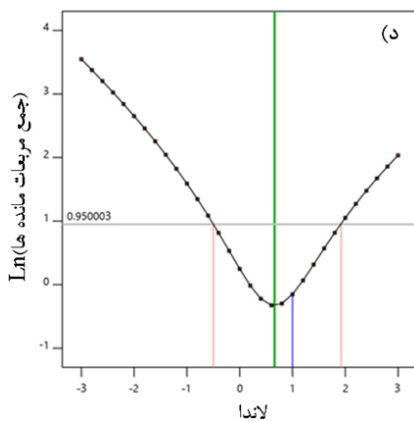
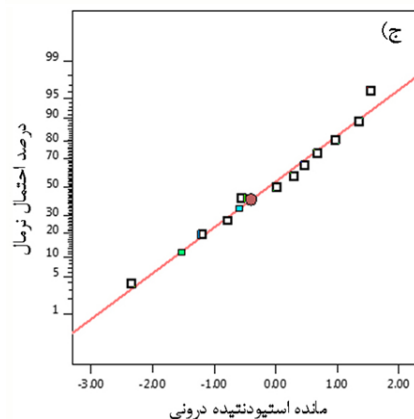
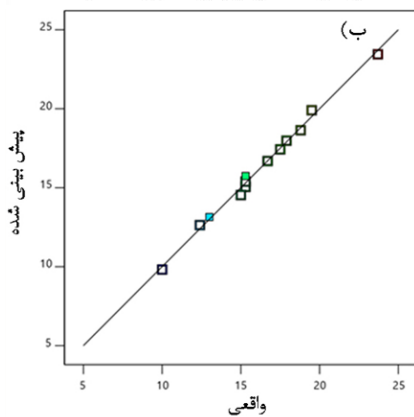
در فوم های با چگالی متوسط، اندازه ضخامت دیواره سلول ها تقریباً یکسان بوده و از دیواره سلول ضخیم تری در مقایسه با فوم های با چگالی زیاد و چگالی کم برخوردار است. از اینرو با توجه به توزیع جرم یکنواخت در دیواره سلول ها و همچنین ساختار منظم، از مقاومت مکانیکی خوبی در برابر موج انفجار برخوردار است. در نتیجه موج انفجار پس از عبور از لایه اول ساندویچ پنل، جذب انرژی بیشتری نشان می دهد. در فوم های با چگالی کم، به دلیل وجود سلول هایی با دیواره نازک، مقاومت کمتری در برابر موج انفجار دارد. شکل ۳ تصویر قبل و پس از بارگذاری انفجاری ساندویچ پنل کامپوزیتی تقویت شده با فوم پلی یورتان را نشان می دهد. در ساندویچ پنل های تهیه شده از فوم با چگالی ۱۱۰

جدول ۳) جدول ANOVA مربوط به مدل سطح پاسخ برای تغییر شکل پلاستیک ساندویچ پنل.

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	متوسط مربعات	F-value	Probe > F
مدل	۱۴۴/۸۶	۹	۱۶/۱۰	۵۶/۱۸	۰/۰۰۳۵
$X_1$ (چگالی فوم)	۵۱/۱۹	۱	۱۵/۱۹	۱۷۸/۶۶	۰/۰۰۰۹
$X_2$ (درصد نانو رس)	۲۰/۴۵	۱	۲۰/۴۵	۷۱/۳۸	۰/۰۰۳۵
$X_1X_2$	۱۱/۸۷	۱	۱۱/۸۷	۴۱/۴۴	۰/۰۰۷۶
$X_1^2$	۲۳/۶۵	۱	۲۳/۶۵	۸۲/۵۶	۰/۰۰۲۸
$X_2^2$	۱۵/۲۰	۱	۱۵/۲۰	۵۳/۰۵	۰/۰۰۵۳
$X_1^2X_2$	۴۴/۶۳	۱	۴۴/۶۳	۱۵۵/۷۸	۰/۰۰۱۱
$X_1X_2^2$	۲۹/۴۱	۱	۲۹/۴۱	۱۰۲/۶۳	۰/۰۰۲۰
$X_1^3$	۴۶/۰۶	۱	۴۶/۰۶	۱۶۰/۷۷	۰/۰۰۱۱
$X_2^3$	۲۵/۷۸	۱	۲۵/۷۸	۸۹/۹۷	۰/۰۰۲۵
باقیمانده	۰/۸۵۹۵	۳	۰/۲۸۶۵		
خطای خالص	۱۴۵/۷۲	۱۲			



انحراف از نقطه مرکزی (واحد‌های گذشته)



نمودار ۲) نمودارهای مربوط به تغییر شکل پلاستیک صفحه پشتی ساندویچ پنل، الف) پُرشیدگی مدل، ب) مقایسه بین مقادیر پیش بینی شده و مقادیر تجربی، ج) منحنی احتمال نرمال مانده‌ها، د) منحنی باکس کاکس برای تعیین درجه تابع مدل.

پس از بررسی داده‌ها و استخراج مدل رگرسیونی برای میزان جابجایی صفحه پشتی ساندویچ پنل، میزان عملکرد و صحت آن مورد بررسی قرار گرفت. نمودار ۲ الف، منحنی پُرشیدگی (Perturbation) یا اغتشاشی مدل را نشان می‌دهد. این منحنی مقایسه اثر پارامترهای مورد بررسی (چگالی فوم و درصد نانو رس) در یک نقطه خاص از فضای طراحی را امکان‌پذیر می‌کند. با توجه به شیب یا انحنای تند منحنی چگالی فوم می‌توان دریافت که میزان تغییر شکل پلاستیک صفحه پشتی ساندویچ پنل به این پارامتر در مقایسه با درصد نانو رس بسیار حساس است. مقایسه بین مقادیر واقعی و پیش بینی شده مدل بدست آمده از روش سطح پاسخ در نمودار ۲ ب نشان داده شده است. نتایج بدست آمده نشان دهنده مطابقت خوب داده‌های تجربی حاصل از بارگذاری انفجاری و مقادیر پیش بینی شده حاصل از مدل بوده و بیانگر دقت بالای مدل در پیش بینی نتایج است. منحنی احتمال نرمال باقی‌مانده‌ها برحسب مقادیر پیش‌بینی شده بعد از حذف عوامل غیرمؤثر در مدل رگرسیونی در نمودار ۲ ج نشان داده شده است. این منحنی نشان دهنده چگونگی پیروی مانده‌ها از توزیع نرمال مدل می‌باشد. منحنی احتمال نرمال باقی‌مانده‌ها، نشان دهنده توزیع مناسبی از خطاها بوده و در محدوده قابل قبول است. منحنی باکس کاکس (Box-Cox plot) مدل نیز در نمودار ۲ د ارائه شده است. این نمودار به تشخیص مناسب ترین تابع انتقال توانی به منظور اعمال بر پاسخ (Y) کمک می‌کند. نقطه کمینه در منحنی باکس کاکس، نشان دهنده مناسب ترین مقدار لاندا (که در آن حداقل مجموع مربعات مانده در مدل تبدیل شده ایجاد می‌شود) است. در این منحنی مناسب ترین مقدار لاندا برابر یک بوده و در نتیجه نیازی به تابع انتقال توانی نمی‌باشد.

**جدول ۴)** مقادیر بهینه پارامترهای مستقل مورد بررسی به منظور دستیابی کمترین تغییر شکل پلاستیک.

پیشنهادات	چگالی فوم (kg/m <sup>3</sup> )	درصد نانو رس (wt.%)	تغییر شکل صفحه پشتی ساندویچ پنل (mm)
۱	۱۲۴	۱/۵۷	۸/۸
۲	۱۳۳	۱/۶۲	۸/۲
۳	۱۳۰	۱/۵۷	۸

به منظور دستیابی به کمترین میزان جابجایی و تغییر شکل پلاستیک و با استفاده از روش RSM بدست آمد که در جدول ۴ نشان داده شده است.

### ۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق ساندویچ پنل های تقویت شده با فوم پلی یورتان حاوی ذرات صفحه ای نانو رس به منظور بهبود مقاومت در برابر بارگذاری انفجاری تهیه شد. تأثیر پارامترهایی نظیر چگالی فوم پلی یورتان و درصد نانو رس بر میزان تغییر شکل پلاستیک صفحه پشتی ساندویچ پنل با استفاده از طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ بررسی گردید. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که چگالی فوم پلی یورتان مهمترین عامل تأثیرگذار بر تغییر شکل پلاستیک ساندویچ پنل می باشد، بطوریکه افزایش چگالی، سبب کاهش تخلخل فوم شده و توانایی آن را در جذب انرژی کاهش می‌دهد. همچنین افزایش درصد نانو رس در فوم پلی یورتان، سبب کاهش اندازه سلول و افزایش تردی و شکنندگی آن گردید. با توجه به مقدار بالای ضریب تعیین (R<sup>2</sup>) به دست آمده از روش سطح پاسخ می‌توان نتیجه گرفت که نتایج حاصل از مدل رگرسیونی تطابق بسیار خوبی با نتایج تجربی دارند. همچنین نتایج مربوط به بهینه‌سازی پارامترهای مورد بررسی نشان داد که کمترین تغییرشکل پلاستیک ساندویچ پنل در ۱/۵۷ درصد نانو رس و چگالی فوم ۱۳۰ kg/m<sup>3</sup> بدست می‌آید.

**تشکر و قدردانی:** بدینوسیله از همکاری مراکز علم و فناوری مکانیک دفاعی عماد و همچنین مواد پیشرفته و نانوفناوری دانشگاه جامع امام حسین (ع) قدردانی بعمل می‌آید.

**تأییدیه‌های اخلاقی:** نویسندگان متعهد میشوند محتویات علمی حاصل پژوهش آنها بوده و نتایج ارائه شده در مجله دیگری چاپ نشده است یا در حال داوری نیست.

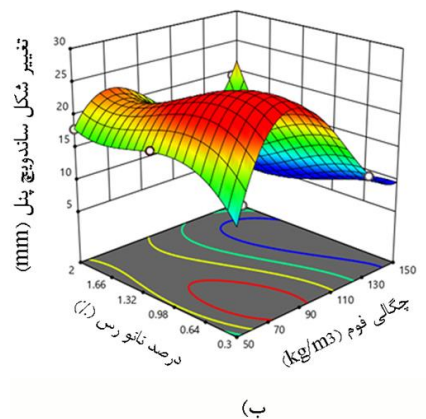
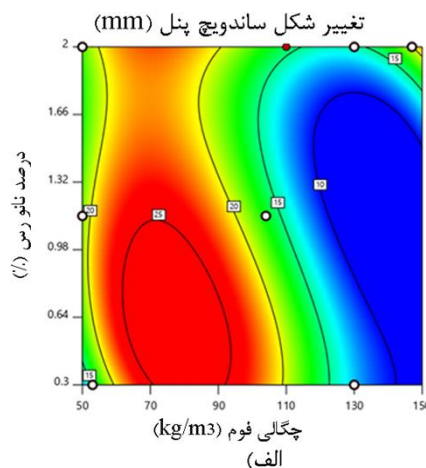
**تعارض منافع:** هیچگونه تعارض منافعی با سازمانها و اشخاص وجود ندارد.

**سهم نویسندگان:** مجید حاتم پور (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی، نگارنده مقاله (۳۰٪)، روح اله حسینی (نویسنده دوم)، روش شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر (۳۰٪)، مهدی حسن زاده (نویسنده سوم)، روش شناس/پژوهشگر اصلی/وبرایشگر مقاله/تحلیلگر (۳۰٪)، خداداد واحدی (نویسنده چهارم)، روش شناس/ تحلیلگر (۱۰٪).  
**منابع مالی:** کلیه هزینه ها توسط نویسندگان تأمین گردیده است.

### ۶- بررسی عوامل موثر بر تغییر شکل پلاستیک ساندویچ پنل

در این بخش به تاثیر متقابل پارامترهای مستقل (درصد نانو رس و چگالی فوم) به طور همزمان بر روی خروجی پرداخته شده است. نمودار ۳ نشان دهنده تاثیر همزمان چگالی فوم پلی یورتان و درصد نانو رس بر میزان تغییر شکل پلاستیک ساندویچ پنل است. همانطور که مشاهده می شود، مقدار جابجایی صفحه پشتی ساندویچ پنل با افزایش چگالی ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. همچنین در چگالی های کم، با افزایش درصد نانو رس، ابتدا افزایش و سپس کاهش تغییر شکل پلاستیک مشاهده شد. این تغییرات در مقادیر بالای چگالی فوم پلی یورتان، با روند معکوس و بصورت ابتدا کاهش و سپس افزایش در تغییر شکل پلاستیک ظاهر شد. همچنین کمترین تغییر شکل در محدوده چگالی ۱۳۰ تا ۱۵۰ (kg/m<sup>3</sup>) و نانو رس ۰/۳ تا ۱/۷ درصد ایجاد شده است. بنابراین می‌توان بیان کرد برای دستیابی به کمترین میزان تغییر شکل پلاستیک در ساندویچ پنل باید ساندویچ پنلی با شرایط بیان شده ساخته شود.

پس از بررسی تاثیر چگالی فوم پلی یورتان و درصد نانو رس و همچنین برهمکنش آنها بر میزان تغییر شکل پلاستیک ساندویچ پنل، مقادیر بهینه پارامترهای مورد بررسی در محدوده طراحی شده



**نمودار ۳)** تأثیر متقابل پارامترهای چگالی و درصد وزنی نانو رس بر میزان تغییر شکل پلاستیک ساندویچ پنل: الف) کانتور دو بعدی و ب) نمودار سه بعدی سطح پاسخ

- 16- Sayah Badkhor M, Babaei H. The effect of extreme dynamic loading on large plastic deformation of quadrangular plates: Experimental investigation, regression analysis, and multi-objective optimization. *Modares Mechanical Engineering*. 2020; 20(10): 2495-2507.
- 17- Jiang X, Wang Z, Yang Z, Zhang F, You F, Yao C. Preparation and sound absorption properties of barium titanate/nitrile butadiene rubber-polyurethane foam composites with stratified structure. *RSC advances*. 2018;8(37):20968-75.
- 18- Gunst RF. Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments. John Wiley & Sons. 2016
- 19- Nasirzadeh R, Sabet AR. Influence of nanoclay reinforced polyurethane foam toward composite sandwich structure behavior under high velocity impact. *Journal of Cellular Plastics*. 2016;52(3):253-75.
- 20- Estravís S, Tirado-Mediavilla J, Santiago-Calvo M, Ruiz-Herrero JL, Villafaña F, Rodríguez-Pérez MÁ. Rigid polyurethane foams with infused nanoclays: relationship between cellular structure and thermal conductivity. *European Polymer Journal*. 2016;80:1-5.
- 21- Zhu M, Bandyopadhyay-Ghosh S, Khazabi M, Cai H, Correa C, Sain M. Reinforcement of soy polyol-based rigid polyurethane foams by cellulose microfibrils and nanoclays. *Journal of applied polymer science*. 2012; 124(6):4702-10.
- 1- Lee ST, Park CB, Ramesh NS. *Polymeric foams: science and technology*. CRC press; 2006.
- 2- Qi C, Yang S, Yang LJ, Han SH, Lu ZH. Dynamic response and optimal design of curved metallic sandwich panels under blast loading. *The Scientific World Journal*. 2014.
- 3- Petrović ZS, Ferguson J. Polyurethane elastomers. *Progress in Polymer Science*. 1991;16(5):695-836.
- 4- Bimha RE. Response of thin circular plates to central blast loading. Doctoral dissertation, University of Cape Town. 1996.
- 5- Pinto ML. Formulation, preparation, and characterization of polyurethane foams. *Journal of Chemical Education*. 2010;87(2):212-5.
- 6- Ghasemi AR, Hajmohammad MH, Aminoroaya M, Mirmoghtadaei M. Using response surface method and genetic algorithm for optimization of fiber metal laminate stacking sequences subjected to explosion loading. *Journal of energetic materials*. 2014; 9, 2 (23): 43-52.
- 7- Taghipoor H, Noori MD. Experimental investigation of energy absorption in foam filled sandwich beams with expanded metal sheet as core under quasi-static bending. *Modares Mechanical Engineering*. 2018; 18(3):126-34.
- 8- Sabzevari S, Shahabian F. Optimum Selection of Corrugated Sandwich Panels Shape and Materials Subjected to Blast Loading. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 2018 ;5(2):39-52.
- 9- Sharifzadeh A, Sabet S, Shayan M. Investigation of fiber reinforcement effects in the foam core of sandwich structures under high speed impact. In: 1rd congress On Industrial Application of Advanced Materiala and Manufacturing, 2017.
- 10- Mostafa HE, El-Dakhkhni WW, Mekky WF. Use of reinforced rigid polyurethane foam for blast hazard mitigation. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2010;29(20):3048-57.
- 11- Khandabi R, Khodarahmi H. Study of Sandwich Panels with Graduated Foam Cores under Explosive loading. In: 3rd International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering. 2018.
- 12- Sayahbadkhor M, Babaei H. The influence of uniform and localized blast loading on the response of single-layered circular plates: Experimental investigation and regression analysis using response surface methodology. *Modares Mechanical Engineering*. 2020;20(8):2045-2060.
- 13- Divandar M, Golpayegani A, Shahverdi H. *Metal Foams*. Iran University of Science and Technology Publications; 2006.
- 14- Heshmati M. An Experimental Study of the Response of Isotropic Circular Sheets to Loading from an Underwater Explosion Caused by a Cone Shock Tube. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;16(7): 361-372.
- 15- Morales-Alonso G, Cendón DA, Gálvez F, Erice B, Sánchez-Gálvez V. Blast response analysis of reinforced concrete slabs: experimental procedure and numerical simulation. *Journal of applied mechanics*. 2011;78(5).