



Investigation of the Effect of Blast Loading on Sandwich Structures with Foam and Square Lattice Cores

Ali Kochakinejad Eram Sadati^{1*}, Hashem Babaei², Seyed Ali Mousavi Tarsi³

¹ Instructor, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran (Correspondence). Email: akochakinezhad@tvu.ac.ir

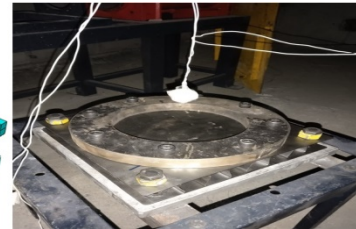
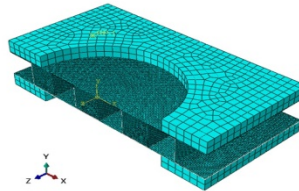
² Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran. Email: ghababaei@guilan.ac.ir

³ Ph.D. mechanics, Islamic Azad University, Damavand Branch, Iran. Email: ali.mousavi62@gmail.com

HIGHLIGHTS

- Polyurethane foam core is not suitable for sandwich panels under blast loading, whereas the square lattice core is effective.
- Increasing the standoff distance reduces the deflection of the back face sheet.
- Increasing the explosive mass increases the deflection of the back face sheet.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 04 May 2025

Received in revised form: 21 July 2025

Accepted: 30 August 2025

Available online: 29 September 2025

Keywords:

Blast Loading

Sandwich Panel

Polyurethane Foam Core

Square lattice core

Numerical analysis

ABSTRACT

In this paper, the experimental and numerical analysis of sandwich panels under blast loading is investigated. In this study, the effect of blast loading on sandwich panels with two different structures in the core has been investigated. The face sheets of the sandwich panel are made of steel with a thickness of 1 mm. One of the cores is made of polyurethane foam, and the other is a square lattice structure fabricated from the same material as the face sheets, with a thickness of 0.5 mm. The core height is 40 mm. In the experimental blast tests, a standoff distance of 10 cm is considered, and C4 explosive with a constant mass of 30 grams is used in the blast processes. Numerical analysis is performed using Abaqus software and the CONWEP technique. Furthermore, the dynamic behavior of the sandwich structure is analyzed under various conditions using simulation software. A comparison of the numerical and experimental results shows a good agreement. The analysis results indicate that polyurethane foam is not a suitable core material for sandwich panels under blast loading. However, the square lattice core proves to be effective, as the displacement of the back face sheet is smaller than that of the front face sheet, and the core undergoes plastic deformation.

Cite this article: Kochakinejad A, Babaei H, Mousavi Tarsi SA. Investigation of the Effect of Blast Loading on Sandwich Structures with Foam and Square Lattice Cores. Aerospace Mechanics. 2025; 21(3):67-82.

DOI:<https://doi.org/10.47176/MAJ.2025.1501>

© Author(s) retain the copyright and full publishing rights

Publisher: Imam Hossein University.



OPEN ACCESS

1. Introduction

Sandwich panels are extensively utilized in military and protective industries to shield personnel and equipment from blast and impact loads. Their high bending stiffness-to-weight ratio, achieved by separating two structural face sheets with a lightweight core, makes them superior to monolithic plates. A key performance metric is energy absorption, where cores like foam and lattice structures act as impact dampers. This study investigates and compares the dynamic response of two types of sandwich panels—one with a polyurethane foam core and the other with a square lattice steel core—under close-range blast loading. The primary objective is to evaluate their effectiveness in blast mitigation by analyzing deformation patterns, energy absorption capabilities, and failure mechanisms through integrated experimental and numerical approaches.

2. Methodology

The research employed a combined experimental and numerical methodology.

- **Specimen Configuration:** Both sandwich panels consisted of ST12 steel face sheets with a thickness of 1 mm and a core height of 40 mm. The two core types were: 1) Polyurethane foam with a density of 45 kg/m³, and 2) A square lattice structure fabricated from 0.5 mm thick ST12 steel sheets.
- **Experimental Blast Testing:** Free-air blast tests were conducted in a controlled explosion chamber. A spherical charge of 30 grams of C4 explosive was detonated at a constant standoff distance of 10 cm from the front face of the clamped sandwich panel. The deformation of both front and back face sheets was captured and measured.
- **Numerical Simulation:** Finite Element Analysis (FEA) was performed using Abaqus/Explicit. The CONWEP (Conventional Weapons Effects) empirical blast model was implemented to simulate the pressure load from the explosive airblast. Material models were critical for accuracy: The Johnson-Cook plasticity model was used for the steel (face sheets and lattice), accounting for strain rate and thermal effects. The foam core was modeled using a crushable foam material model (Low-density foam). Symmetry conditions were applied to reduce computational cost. A comprehensive mesh convergence study was performed to ensure result independence from element size. The numerical model was rigorously validated by comparing its predictions (deformation profiles) with the experimental results, showing excellent agreement.

3. Results and Discussion

The comparative analysis revealed significant differences in the performance of the two core types.

- **Deformation Response:**
 - **Foam Core Panel:** The back face sheet experienced larger deflection (2.03 cm) than the front face sheet (1.39 cm). This indicates that the polyurethane foam core did not undergo significant plastic deformation (crushing) and instead transmitted most of the impulse to the back face.
 - **Square Lattice Core Panel:** The back face sheet deflection (0.904 cm) was significantly lower than the front face deflection (1.39 cm). The lattice core itself underwent substantial plastic deformation (2.52 cm), demonstrating effective energy dissipation through structural yielding.
- **Energy Absorption:**
 - Total energy absorption was higher for the lattice core panel (320 J) compared to the foam core panel (209 J).
 - Critically, the **lattice core absorbed 127 J**, while the **foam core absorbed only 6 J**. This stark contrast (approximately 21 times more energy absorbed by the lattice) underscores the inefficiency of the specific foam used as a standalone energy-absorbing core under this blast condition.

- **Parametric Studies (Numerical):** Extensive parametric studies were conducted using the validated numerical model:
 - **Explosive Mass:** Increasing charge mass led to increased back-face deflection for both panels.
 - **Standoff Distance:** Increasing the distance between the charge and the panel dramatically reduced back-face deflection, proving to be a more effective mitigation strategy than reducing charge mass.
 - **Material Grade:** Changing face sheet steel from ST12 to higher-strength ST37 reduced back-face deflection. Changing to aluminum (AL1050) drastically increased deflection, degrading performance.
 - **Foam Density:** Increasing foam density slightly increased back-face deflection, offering no improvement.
 - **Lattice Core Thickness:** Increasing the thickness of the lattice members from 0.3 mm to 1.0 mm progressively reduced both front and back face deflections. An optimal balance was suggested for a thickness of 0.3 mm, providing good performance with minimal added weight.

4. Conclusion

This study conclusively demonstrates that, under the specified close-range blast loading, a square lattice steel core is far more effective than a polyurethane foam core for sandwich panel protection. The lattice core's superiority is attributed to its ability to undergo controlled plastic deformation, thereby absorbing a substantial portion of the blast energy and shielding the back face. In contrast, the tested polyurethane foam core acted essentially as a compliant spacer, transmitting the load with minimal absorption and causing greater back-face deformation. Key design insights include: 1) The critical importance of core plastic energy dissipation, 2) The significant benefit of increasing standoff distance, and 3) The superior performance of steel over aluminum for the face sheets in this context. The findings provide valuable guidance for designing blast-resistant sandwich structures, recommending lattice-type cores over low-density foams for applications where impulsive loading is a primary concern.



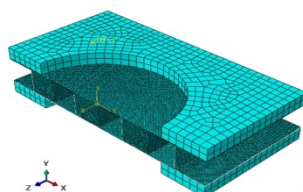
بررسی اثر بارگذاری انفجاری بر روی ساختارهای ساندویچی با هسته فومی و مشبک مربعی علی کوچکی نژاد ارم ساداتی^{۱*}، هاشم بابایی^۲، سید علی موسوی طارسی^۳

^۱ مربی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران (نویسنده مسئول). رایانامه: akochakinezhad@tvu.ac.ir
^۲ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: ghbabaei@guilan.ac.ir
^۳ دکتری مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دماوند، ایران. رایانامه: ali.mousavi62@gmail.com

چکیده گرافیکی

برجسته‌ها

- هسته فوم پلی اورتان هسته‌ای مناسب برای استفاده در ساندویچ پنل تحت بارگذاری انفجاری نبوده اما هسته مشبک مربعی هسته‌ای مناسب است.
- با افزایش فاصله ماده منفجره تا هدف میزان جابجایی رویه پشتی کاهش می‌یابد.
- با افزایش میزان جرم ماده منفجره جابجایی رویه پشتی افزایش می‌یابد.



چکیده

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی
 دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۴
 بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۳۰
 پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۸
 ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۷/۰۷

کلیدواژه‌ها:

بارگذاری انفجاری
 ساندویچ پنل
 هسته فوم پلی اورتان
 هسته مشبک مربعی
 تحلیل عددی

در این مقاله، به بررسی حل تجربی و عددی ساندویچ پنل تحت بارگذاری انفجاری پرداخته شده است. در این پژوهش اثر بارگذاری انفجاری بر روی ساندویچ پنل با دو ساختار متفاوت در هسته، مورد بررسی قرار گرفته است. رویه‌های ساندویچ پنل از جنس فولاد با ضخامت ۱ میلی‌متر است. یکی از هسته‌ها فوم پلی‌اورتان و دیگری مشبک مربعی از جنس رویه، با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر، انتخاب شده است. ارتفاع هسته‌ها ۴۰ میلی‌متر است. در آزمایش‌های تجربی انفجار، فاصله ۱۰ سانتی‌متر تا هدف در نظر گرفته شده و از ماده منفجره C4 با جرم ثابت ۳۰ گرم در فرآیندهای انفجار استفاده شده است. در ادامه، به کمک نرم‌افزار آباکوس و با استفاده از فن کانون به حل عددی مسئله پرداخته شده است. و سپس با استفاده از نرم‌افزار رفتار دینامیکی ساختار ساندویچی در شرایط مختلف بررسی می‌گردد. با مقایسه نتایج حل عددی و تجربی، تطابق مناسبی بین آن‌ها مشاهده می‌شود. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که هسته فوم پلی‌اورتان گزینه مناسبی برای استفاده در ساندویچ پنل‌ها نیست، اما هسته مشبک مربعی در بارگذاری انفجاری، هسته‌ای مناسب به شمار می‌آید، زیرا جابجایی رویه پشتی ساندویچ پنل کمتر از رویه جلویی است و هسته وارد فاز پلاستیک می‌شود.

استناد: کوچکی نژاد علی، بابایی هاشم، موسوی طارسی سیدعلی. بررسی اثر بارگذاری انفجاری بر روی ساختارهای ساندویچی با هسته فومی و مشبک مربعی. هوا فضا (۱۴۰۴)؛ ۲۱ (۳): ۶۷-۸۲. DOI: <https://doi.org/10.47176/MAJ.2025.1501>

نویسنده(گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می‌دارند. ©



ناشر: دانشگاه جام امام حسین(ع). OPEN ACCESS

۱- مقدمه

در صنایع نظامی از سازه‌های ساندویچی برای محافظت اشخاص و اشیاء در برابر انفجار و ضربه استفاده می‌شود. ساختار سازه ساندویچی که از هسته‌های قابل تراکم تشکیل شده، به مقدار زیادی انرژی حاصل از انفجار و ضربه را در خود جذب کرده و از آسیب رسیدن به افراد و یا اشیاء پشت سازه ساندویچی جلوگیری می‌کند.

سازه‌های ساندویچی معمولاً به علت نسبت سختی خمشی بالای آن‌ها به وزن، جایگزین صفحات یکپارچه می‌شوند. سختی خمشی بالای این صفحات، حاصل فاصله گرفتن صفحات سازه‌ای دو طرف توسط هسته است که باعث تحمل بار خمشی زیاد و درعین حال وزن کم به علت وزن کم هسته است [۱]. یکی دیگر از ویژگی این سازه‌ها، جذب انرژی بوده که انواع ساندویچ‌های فومی یا مشبک، به‌عنوان جاذب‌های ضربه به کار گرفته می‌شوند. در این تحقیق هر دو نوع هسته فومی و مشبک مورد بررسی قرار گرفته است.

در سال ۲۰۱۰، امینی و همکاران [۲] در دانشگاه کالیفرنیا به بررسی مدل‌سازی عددی پاسخ ورق‌های یکپارچه و دولایه در معرض بارهای ایمپالس پرداختند. در این تحقیق، نتایج شبیه‌سازی عددی پاسخ دینامیکی و مد تخریب ورق‌های فولادی دایروی و دولایه ورق فولادی به همراه روکش پلی اوره در معرض بارگذاری دفعی ارائه و مورد بحث قرار گرفتند. در طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۲، بابایی و همکاران [۳-۶] به بررسی تجربی، تحلیلی و عددی تغییر شکل پلاستیک ورق‌های دایروی گیردار فولادی، مسی و آلومینیومی تحت شرایط بارگذاری انفجاری یکنواخت و غیریکنواخت پرداختند. آن‌ها توسط دستگاه پاندول بالستیکی کارهای تجربی زیادی از جمله با شرایط فاصله خرج در اندازه‌های ۵۰ و ۳۰۰ میلی‌متر از نمونه انجام دادند. نتایج برحسب جابجایی مرکز ورق، توزیع کرنش‌ها و گستره تغییر شکل ارائه گردید. همچنین تأثیر پارامترهایی نظیر خواص مکانیکی ورق، ضخامت آن و فاصله خرج تا ورق بررسی گردیدند. همچنین مدلهایی تحلیلی برای پیش‌بینی جابجایی مرکزی ورق‌های دایروی با شرایط مرزی گیردار در معرض بار انفجاری یکنواخت و غیریکنواخت ارائه گردید. یازبسی و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۴ به‌صورت تجربی و عددی تأثیر تزریق فوم در داخل هسته مشبک فلزی را، بر روی مقاومت انفجاری پنلهای ساندویچی، بررسی نمودند. آن‌ها سه نوع پنل با هسته‌های مشبک، فومی و ترکیب مشبک و فومی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که پر کردن فوم در سلول‌های مشبک مقدار ماکزیمم جابجایی رویه جلویی و پشتی را بیش از ۵۰ درصد کاهش می‌دهد. در سال ۲۰۱۵، لانگدن و همکاران [۸] به بررسی

تجربی تأثیر خواص ماده بر پاسخ دینامیکی ورق تحت بار انفجاری در هوا پرداختند. در سال ۲۰۱۸، مهرگانیان و همکاران [۹] به بررسی پاسخ ورق‌های فولادی معمولی و زرهی در معرض بار انفجاری با استفاده از شبیه‌سازی عددی پرداختند. در سال ۲۰۱۸، رضا صفت و همکاران [۱۰] به بررسی پاسخ دینامیکی ورق‌های فلزی دولایه دایروی توسط بار ایمپالس غیریکنواخت پرداختند. در این تحقیق پاسخ دینامیکی ورق‌های دولایه فلزی دایروی تحت بار دفعی غیریکنواخت به‌صورت عددی و تحلیل ابعادی بررسی شده است. در سال ۲۰۱۹، رضا خندابی و همکاران [۱۱] به مطالعه تجربی و عددی اثر ضخامت هسته و رویه در پنل‌های ساندویچی با هسته فوم و رویه‌های آلومینیومی تحت بارگذاری انفجاری پرداختند. در این پژوهش با تهیه فوم‌های پلی یورتان با ضخامت‌های مختلف و ساخت پنل‌های ساندویچی از ورق‌های آلومینیومی و هسته فوم پلی‌یورتان با استفاده از دستگاه شک تیوب انفجاری و انجام تعدادی آزمایش انفجاری هدفمند اثر ضخامت فوم در مقدار جابجایی سطح پشتی ساختار ساندویچی و میزان جذب انرژی آن مورد مطالعه قرار گرفته است. در سال ۲۰۲۱، مجتبی قمری زاده و همکاران [۱۲] به مطالعه پاسخ تجربی و تحلیلی ورق‌های ساندویچی مدور فلزی با هسته لوله‌ای تحت بار انفجار پرداختند. در این مقاله به روش تحلیلی و تجربی رفتار دینامیکی سازه و تغییر شکل ورق‌های ساندویچی مدور فلزی با هسته لوله‌ای تحت بار انفجار بررسی شده است. در این مطالعه برای چیدمان لوله‌های هسته از ترکیب شعاعی غیر هم‌مرس استفاده شده است که ترکیب جدیدی محسوب می‌شود.

در سال ۲۰۲۲، مجتبی ضیا شمایی و همکاران [۱۳] به مطالعه تغییر شکل پلاستیک ورق‌های چندلایه فلزی هم‌جنس و غیر هم‌جنس با چگالی سطحی ثابت تحت بارگذاری دفعی مکرر پرداختند. در این پژوهش، مکانیسم تغییر شکل بزرگ پلاستیک ورق‌های دایره‌ای تک و چندلایه فلزی هم‌جنس و غیر هم‌جنس با چگالی سطحی ثابت تحت بارگذاری دفعی مکرر یکنواخت مورد بررسی قرار گرفته است. در سال ۲۰۲۲ حسین خدا رحمی و همکاران [۱۴] به بررسی تجربی و عددی قابلیت جذب انرژی سازه ساندویچی با هسته‌ی فوم پلی‌یورتان تقویت‌شده با پوکه معدنی تحت بارگذاری انفجاری پرداختند. در این مقاله تغییر فرم و جذب انرژی سازه‌های ساندویچی با رویه آلومینیومی و فولادی و هسته ساخته‌شده از فوم پلی‌یورتان که از دو نوع پوکه معدنی با سایز مختلف (اصطلاحاً نخودی و بادامی) پر شده است تحت بارگذاری انفجار آزاد به روش تجربی و شبیه‌سازی عددی به کمک نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس مورد مطالعه قرار گرفته است. در سال ۲۰۲۲ مجتبی حق‌گو و همکاران [۱۵] به مطالعه مدل‌سازی تحلیلی تغییر شکل ورق مثلثی تحت انفجار مخلوط

بودن سایر سطوح از موج و محل انفجار، انعکاس موج‌های دیگر و تأثیر آن‌ها بر نمونه موضوعیت پیدا نمی‌کند. لذا نتایج حاصل از آزمایش به روش انفجار آزاد نسبت به لوله شوک و مخلوط گازها ارجحیت فنی دارد و مقایسه نتایج روش‌های دیگری مانند روش تحلیلی و عددی با این روش مورد تأکید بیشتر است. در این تحقیق برای ساخت رویه ساندویچ پنل از ورق فولادی روغنی ST12 با ضخامت ۱ میلی‌متر استفاده شده است.



شکل ۱: رویه ساندویچ پنل

در این پژوهش از دو نوع هسته استفاده شده است. ابتدا با هسته فوم پلی اورتان به ضخامت تقریباً ۴ سانتی‌متر ساندویچ پنل ساخته می‌شود.



شکل ۲: هسته فوم پلی اورتان

و سپس هسته مشبک مربعی از ورق فولادی روغنی ST12 با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر آماده می‌گردد.



شکل ۳: هسته مشبک مربعی

ابعاد هسته مشبک مربعی در شکل ۴ نشان داده شده است.

گازها پرداختند. در این تحقیق پاسخ ورق فولادی نازک با بارگذاری انفجاری مخلوط گازها توسط روش تحلیلی برای یافتن جابجایی مرکز ورق گیردار شده در قاب‌های مثلثی بررسی شد.

در سال ۲۰۲۲ هادی محمدی و همکاران [۱۶] به بررسی تجربی و عددی پنل‌های ساندویچی با هسته مشبک دوزنقه‌ای شکل، تحت بارگذاری انفجاری مایل پرداختند. به منظور انجام انفجار مایل لوله‌های انفجاری در زوایای صفر موازی پنل هدف ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه نسبت به پنل هدف بافاصله استقرار خرج ثابت ۳۰۰ میلی‌متر تهیه گردیده است. از ماده منفجره C4 با جرم ثابت ۱۰ گرم در پروسه‌های انفجار استفاده گردیده است. در ادامه به کمک نرم‌افزار تجاری آباکوس و با استفاده از فن کوپل اوپلری لاگرانژی به حل عددی مسئله پرداخته شده است. در سال ۲۰۲۳ مجتبی حق‌گو و همکاران [۱۷] به مطالعه شبیه‌سازی عددی پروفیل تغییر شکل ورق مثلثی تحت انفجار مخلوط گازی پرداختند. در این تحقیق یک مطالعه عددی پیشرفته حاوی تعامل سیال و جامد بر اساس روش مرز غوطه‌ور برای بررسی تأثیر فشار پیش انفجار و بازه زمانی تغییر شکل پلاستیک ورق‌های مثلثی نازک تحت انفجار گازی انجام شد.

در سال ۲۰۲۴ کوزه‌گران و همکاران [۱۸] به مطالعه شکل‌دهی با قالب مادگی ورق‌های فلزی با استفاده از انفجار مکرر زیر آب پرداختند.

در پژوهش حاضر اثر بارگذاری انفجاری بر روی ساختارهای ساندویچی با هسته فومی و مشبک مربعی به دو روش تجربی و عددی مورد مقایسه قرار گرفته است. در روش عددی از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. در روش تجربی از ماده منفجره C4 در فاصله ۱۰ سانتی‌متر تا هدف استفاده شده است.

۲- بررسی تجربی

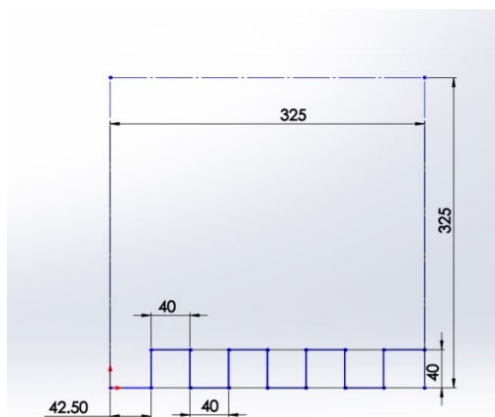
تاکنون، محققین روش‌های تجربی مختلفی را به منظور بررسی پاسخ دینامیکی ورق‌های دایره‌ای و مستطیلی و همچنین پنل‌های ساندویچی با هسته‌های مختلف تحت بار انفجار به کار برده‌اند. از روش‌های مورد استفاده می‌توان به انفجار آزاد، استفاده از لوله شوک، انفجار مخلوط گازها و استفاده از پاندول بالستیک اشاره نمود. در روش انفجار آزاد، با افزایش فاصله خرج انفجاری از سطح ورق، بار به‌طور یکنواخت‌تری، تمام (یا در فواصل کمتر قسمتی از) سطح نمونه را در برمی‌گیرد که به وسیله رینگ‌هایی در محل تکیه‌گاه به استند آزمایش محکم شده‌اند. آنچه در انجام آزمایش‌های تجربی به‌ویژه انفجار به روش آزاد از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است، شناخت و ارزیابی رفتار ساختارهای آزمایشی، تحت بار انفجار اعمالی است.

در روش انفجار آزاد فقط یک موج شوک به نمونه وارد می‌شود که قوی‌ترین موج حاصل از انفجار است و با توجه به دور

به منظور تأمین شرایط ایمنی، آزمایش‌ها در یک اتاقک انفجار به ابعاد $3 \times 3 \times 4/5$ مترمکعب انجام می‌شود که در شکل ۶ نشان داده است.



شکل ۶: نمایی از اتاقک انفجار



شکل ۴: ابعاد هسته مشبک مربعی

امروزه با توجه به افزایش روزافزون تهدیدات تروریستی در سراسر دنیا و مباحث پدافند غیرعامل، ضرورت مطالعه در زمینه راهکارهای کاهش خسارات ناشی از انفجارها و حفاظت از اماکن حساس و حیاتی دوچندان شده است و لازم است مطالعات بیشتری در این زمینه صورت پذیرد. ارتفاع دو ساندویچ پنل یکسان است. و از این نظرگاه، مقاومت دو ساندویچ پنل در برابر بار انفجاری مورد مقایسه قرار گرفته است. هدف از این پژوهش طراحی سازه‌ای است که در برابر بار انفجاری مقاومت‌تر باشد. ماده منفجره مورد استفاده برای آزمون‌های تجربی انفجار، از نوع C4 است. این ماده منفجره حالت خمیری دارد و به راحتی قابل شکل‌دهی و قالب‌گیری است. ماده‌ی منفجره به صورت کروی شکل‌دهی شده است. جهت انفجار ماده منفجره از چاشنی الکتریکی استفاده شده است. میزان جرم ماده منفجره برای آزمون تجربی ۳۰ گرم و فاصله ماده منفجره تا هدف برابر ۱۰ سانتی‌متر است. پس از ساخت ساندویچ پنل این سازه باید بر روی استند قرار داده شود. این سازه باید بر روی استند قرار گیرد. پس از ساخت ساندویچ پنل این سازه باید بر روی استند قرار گیرد. پس از ساخت ساندویچ پنل این سازه باید بر روی استند قرار گیرد. پس از ساخت ساندویچ پنل این سازه باید بر روی استند قرار گیرد.

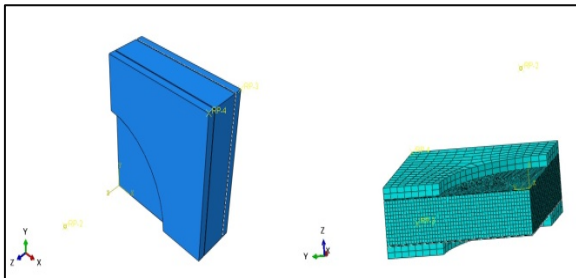


شکل ۵: مقید کردن ساندویچ پنل بر روی استند

۳- شبیه‌سازی عددی

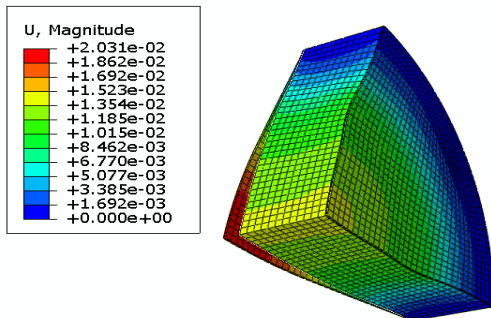
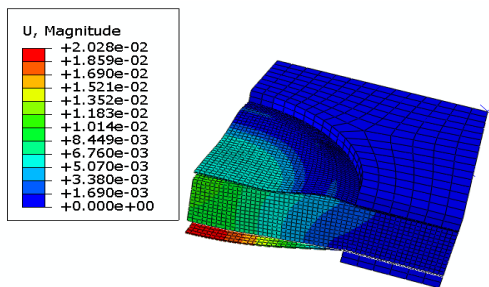
در شبیه‌سازی عددی از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. در این تحقیق با استفاده از فن کانونپ به حل عددی مسئله پرداخته شده است.

روش کانونپ در نرم‌افزار آباکوس به عنوان یک روش کارآمد و سریع برای مدل‌سازی اثرات انفجارهای آزاد مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش بر پایه داده‌های تجربی و معادلات تئوری توسعه یافته توسط مراکز تحقیقاتی نظامی، اثرات موج ضربه‌ای ناشی از انفجار را به صورت یک‌بار فشار اعمالی بر روی سطح سازه شبیه‌سازی می‌کند. در این روش با تعیین پارامترهای کلیدی همچون فاصله از مرکز انفجار و جرم معادل TNT، امکان تحلیل سریع و دقیق توزیع فشار و تنش‌های ناشی از انفجار را فراهم می‌آورد. اگرچه روش کانونپ به دلیل سادگی و سرعت محاسباتی بالا مزایای قابل توجهی دارد، اما برای انفجارهای بسیار پیچیده یا در مواردی که اثرات مواد منفجره خاص نیاز به مدل‌سازی دقیق‌تری دارد، ممکن است دارای محدودیت‌هایی باشد. با این حال، این روش به طور گسترده‌ای در تحلیل‌های مهندسی مرتبط با مقاومت سازه‌ها در برابر انفجار و ارزیابی آسیب‌پذیری آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. نرم‌افزار آباکوس تنها از خصوصیات ماده منفجره TNT استفاده می‌کند، بنابراین باید سایر مواد منفجره را با استفاده از ضرایب تبدیل به TNT تبدیل نمود. در آزمون‌های تجربی از ماده منفجره C4 استفاده شده که ضریب تبدیل آن به TNT برابر $1/34$ است. یعنی در نرم‌افزار آباکوس میزان جرم TNT را باید $40/2$ گرم وارد نمود. مشخصه‌های مکانیکی مواد نقش مهمی بر پاسخ نهایی دارند و تأثیر این پارامترها روی دقت نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی



شکل ۷: مدل سازی کامل در نرم افزار

روش دوم شبیه سازی شرایط آزمون در نرم افزار است، در این روش نیازی به مدل سازی صفحات صلب جلو و پشت نیست و آن قسمت از ساندویچ پنل که در مواجهه با بار انفجاری است مدل سازی می گردد. در این تحقیق دایره ای به قطر ۲۰ سانتی متر از ساندویچ پنل در مواجهه با بار انفجاری قرار می گیرد. در این روش با توجه به اینکه حجم مدل سازی و نیز تعداد المان ها و همچنین تماس بین سطوح کاهش می یابد لذا زمان تحلیل کاهش می یابد.



شکل ۸: مقایسه جابجایی ساندویچ پنل از دو روش مدل سازی

با توجه به نتایج شکل ۸ و تطابق بسیار خوب نتایج از دو روش مدل سازی، در این تحقیق از روش دوم مدل سازی با تعداد المان های کمتر و سرعت تحلیل بالاتر استفاده می گردد. با توجه به اینکه ساندویچ پنل به گیره ها بسته شده است و در هیچ جهتی جابجایی ندارد لذا شرایط مرزی آن در همه جهات کاملاً گیردار در نظر گرفته شده است. بر روی محورهای تقارن نیز شرایط مرزی سیمتریک اعمال می گردد. به منظور شبیه سازی تماس بین بخش های مدل عددی، از یک اندرکنش تماس عمومی بدون ضریب اصطکاک در نرم افزار استفاده شده است.

عددی بسیار زیاد است. در پژوهش حاضر، برای انجام شبیه سازی ها از مدل مادی جانسون-کوک که پیش تر در سال ۱۹۸۵ میلادی ارائه شده، استفاده شده است که اثر نرخ کرنش و همچنین تغییرات دمایی را روی تنش سیلان در نظر می گیرد. در اکثر فرآیندهای شکل دهی سرعت پایین و بالا از این مدل استفاده می شود. مدل الاستو ویسکو-پلاستیک جانسون-کوک شامل اثر تنش تسلیم، جریان پلاستیک، سخت شونده گی نرخ کرنش، ترموالاستیسیته خطی و نرم شدن به دلیل گرمایش آدیاباتیک است. خصوصیات مکانیکی فلزات مورد استفاده در این تحقیق به همراه ضرایب جانسون کوک آن ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: خصوصیات مکانیکی فلزات استفاده شده [۱۳]

خواص ماده	فولاد ST37	فولاد ST12	آلومینیوم 1050
چگالی (kg/m ³)	۷۸۹۰	۷۸۵۰	۲۷۰۰
مدول یانگ (GPa)	۲۰۰	۲۰۸	۷۱
ضریب پواسون	۰/۳	۰/۲۹	۰/۳۳
پارامترهای تنش تسلیم (MPa)	A	۳۵۰	۱۱۰
	B	۲۷۵	۱۵۰
	n	۰/۳۶	۰/۳۶
پارامترهای سخت شونده گی کرنش	ϵ (1/s)	۱	۱
	C	۰/۱۲	۰/۰۱۴
پارامترهای دما	T ₀ (K)	۲۹۳	۲۹۳
	T _{melt} (K)	۱۸۱۱	۱۸۰۹
	m	۱	۱

برای تعریف ماده ی هسته فوم از مدل الاستیک ISO استفاده می گردد. برای تعریف ماده فوم، مدول الاستیک و ضریب پواسون و همچنین چگالی فوم مورد نیاز است. برای تحلیل در نرم افزار مدول یانگ فوم ۱۰ مگا پاسکال و نسبت پواسون صفر و چگالی فوم را ۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است. در ساندویچ پنل با هسته میانی فوم، با توجه به تقارن مسئله در دو صفحه، در شبیه سازی عددی در نرم افزار، تنها بر روی یک چهارم مدل تحلیل عددی صورت می گیرد. ولی در ساندویچ پنل با هسته مشبک مربعی، با توجه به شکل شماره ۳، هسته فقط یک صفحه تقارن دارد لذا در شبیه سازی عددی بر روی نصف مدل تحلیل صورت می گیرد.

در قسمت تحلیل عددی دو روش مدل سازی انجام شده است. روش اول دقیقه شبیه مدل آزمون تجربی مدل سازی صورت گرفته یعنی علاوه بر ساندویچ پنل، صفحات صلب بالا و پایین نیز مدل سازی شده اند و تماس بین صفحات رویه ساندویچ پنل و صفحات صلب برقرار شده است.

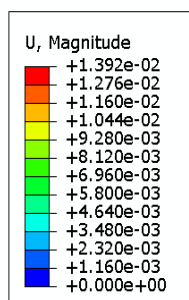
جهت انفجار ماده منفجره از چاشنی الکتریکی استفاده شده است. در تمامی آزمون‌های تجربی از ۳۰ گرم ماده منفجره استفاده شده است.



شکل ۹: نمای رویه جلویی در آزمون تجربی انفجار با هسته فومی



شکل ۱۰: نمای رویه پشتی در آزمون تجربی انفجار با هسته فومی



شکل ۱۱: جابجایی رویه جلویی در تحلیل عددی انفجار با هسته فومی

مش بندی از مهم‌ترین مراحل شبیه‌سازی است. از آنجایی که حلگر Dynamic Explicit انتخاب شده است لذا باید خانواده تمامی مش‌ها به Explicit تغییر کند. تعداد المان‌های رویه و هسته باید به گونه‌ای انتخاب شود که خروجی‌های موردنظر مانند تغییر شکل را به صورت منطقی ارائه دهد. به طور خلاصه المان‌های رویه و هسته فومی از نوع ۶ وجهی سازه‌ای و از نوع C3D8R انتخاب می‌گردد. با توجه به اینکه ضخامت پوسته ۱ میلی‌متر است برای مدل‌سازی آن از المان solid در نرم‌افزار استفاده شده و با توجه به ضخامت کم هسته مشبک مربعی (۰/۵ میلی‌متر)، هسته مشبک مربعی با المان Shell S4R مدل شده است. بررسی مستقل بودن جواب مسئله از سایز مش یکی از بخش‌های اصلی کارهای عددی است، برای این منظور سایز مش را در چند مرحله کوچک می‌کنند تا جایی که جواب یک پارامتر (به عنوان مثال جابجایی مرکز ورق پشتی) با جواب حل قبلی اختلاف ناچیزی داشته باشد، در این مرحله سایز مش مرحله‌ی قبلی به عنوان مش بهینه در نظر گرفته می‌شود، و مابقی بررسی‌های عددی با استفاده از این سایز انجام می‌شود.

جدول ۲: بررسی همگرایی مش در ساندویچ پنل با هسته میانی فوم

سایز مش (mm)	۲/۵	۳	۳/۵	۲
تعداد کل المان	۲۹۵۲۹	۱۶۶۴۰	۱۲۲۵۱	۵۵۷۵۱
ماکزیمم جابجایی رویه جلو (cm)	۱/۰۷	۱/۳۹	۱/۱۷	۰/۷۷
ماکزیمم جابجایی رویه پشتی (cm)	۲/۰۶	۲/۰۳	۲/۰۱	۲/۱۰

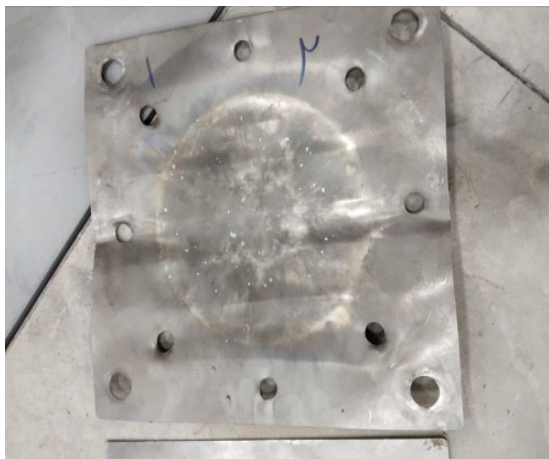
با توجه به نتایج جدول ۲ ماکزیمم جابجایی رویه جلویی با سایز المان ۳ میلی‌متر به حداکثر مقدار خود رسیده و سپس کاهش یافته است لذا این سایز مش مناسب است. و ماکزیمم جابجایی رویه پشتی نیز با تغییر سایز مش بندی تغییر چندانی ندارد. همچنین همگرایی مش برای ساندویچ پنل با هسته مشبک مربعی نیز بررسی شده است و سایز المان ۲ میلی‌متر برای این مدل مناسب است.

۴- نتایج تجربی و عددی

در این بخش نتایج آزمون تجربی و تحلیل عددی ساندویچ پنل تحت بار انفجاری ارائه می‌گردد و پس از صحت‌گذاری نتایج تحلیل عددی با نتایج آزمون تجربی پارامترهای مختلفی از قبیل تأثیر میزان تغییر خرج انفجاری، تأثیر میزان تغییر چگالی هسته فومی، تأثیر تغییر جنس رویه‌ها، تأثیر فاصله ماده منفجره تا هدف، تأثیر ضخامت هسته مشبک در نتایج ساندویچ پنل به روش عددی بررسی می‌گردد.

بر اساس نتایج شکل ۱۴ میزان جذب انرژی کل ساندویچ پنل با هسته فومی ۲۰۹ ژول است که از این میزان ۱۰۸ ژول توسط رویه جلویی، ۹۵ ژول توسط رویه عقبی و نیز ۶ ژول توسط هسته جذب می‌گردد. با توجه به میزان جذب انرژی کم هسته فومی نسبت به رویه‌ها نشان می‌دهد که هسته اصلاً وارد فاز پلاستیک نشده و فشار ناشی از انفجار را به رویه پشتی منتقل کرده است.

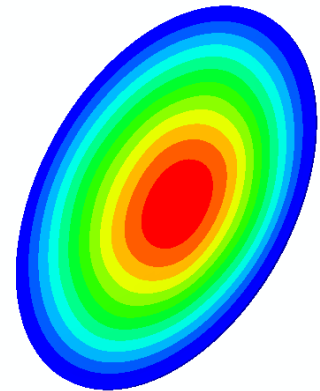
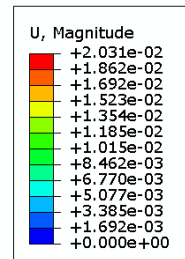
همانند آزمون تجربی ساندویچ پنل با هسته فومی، در ساندویچ پنل با هسته مشبک مربعی نیز ورق رویه‌ها از جنس فولاد ST12 به ضخامت ۱ میلی‌متر و ارتفاع هسته ۴ سانتی‌متر است. همچنین هسته میانی مشبک مربعی از جنس فولاد ST12 به ضخامت ۰/۵ میلی‌متر است. میزان جرم ماده منفجره و فاصله تا هدف نیز مطابق تحلیل قبلی است. در اشکال ۱۵ تا ۲۰ نتایج تحلیل عددی و آزمون تجربی ساندویچ پنل با هسته مشبک مربعی ارائه شده است.



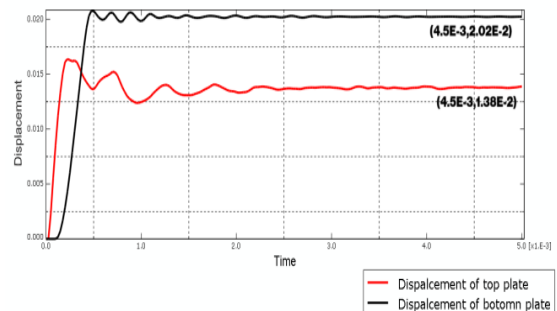
شکل ۱۵: نمای رویه جلویی در آزمون تجربی انفجار با هسته مشبک مربعی



شکل ۱۶: نمای رویه پشتی در آزمون تجربی انفجار با هسته مشبک مربعی

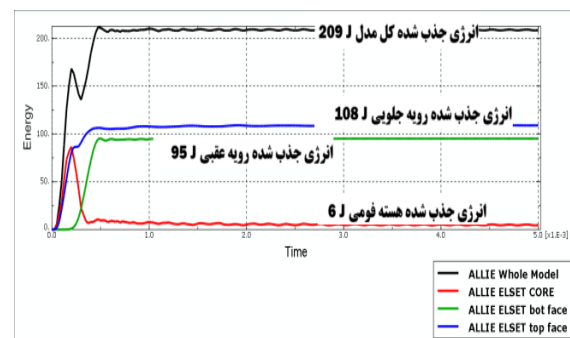


شکل ۱۲: جابجایی رویه پشتی در تحلیل عددی انفجار با هسته فومی همان‌طور که در اشکال ۱۱ و ۱۲ و نتایج آزمون تجربی مشاهده می‌گردد، در ساندویچ پنل با هسته فومی جابجایی رویه پشتی بیشتر از جابجایی رویه جلویی بوده و لذا هسته فوم پلی‌اورتان به کار گرفته شده در این تحقیق هسته خوبی نبوده و جذب انرژی کمی داشته و هسته وارد فاز پلاستیک نشده است. زیرا جابجایی رویه جلویی ۱/۳۹ سانتی‌متر و رویه عقبی ۲/۰۳ سانتی‌متر است.



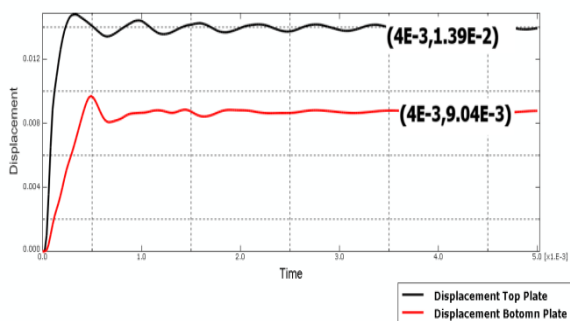
شکل ۱۳: نمودار جابجایی گره مرکزی رویه جلویی و پشتی در ساندویچ پنل با هسته میانی فوم

همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود جابجایی رویه جلویی زودتر از رویه پشتی آغاز شده است و جابجایی رویه پشتی بیشتر از رویه جلویی است. تحلیل در ۵ میلی‌ثانیه انجام شده است ولی در ۲ میلی‌ثانیه نتایج تقریباً به پایداری رسیده‌اند.



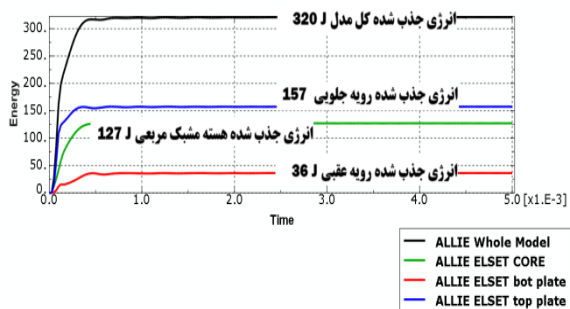
شکل ۱۴: نمودار میزان جذب انرژی اجزای ساندویچ پنل با هسته فومی

همان‌طور که در اشکال و نتایج آزمون تجربی و تحلیل عددی مشاهده می‌گردد، هسته میانی مشبک مربعی استفاده‌شده هسته‌ای مناسب در بارگذاری انفجاری است. چون میزان جابجایی رویه پشتی کمتر از رویه جلویی بوده و نیز هسته وارد فاز پلاستیک شده است. بیشترین جابجایی رویه جلویی در ساندویچ پنل با هسته مشبک مربعی ۱/۳۹ سانتی‌متر و بیشترین جابجایی رویه عقبی ۰/۹۰۴ سانتی‌متر و همچنین بیشترین جابجایی هسته نیز برابر با ۲/۵۲ سانتی‌متر است.



شکل ۲۱: نمودار جابجایی گره مرکزی رویه جلویی و پشتی در ساندویچ پنل با هسته مشبک مربعی

همان‌طور که در شکل ۲۱ مشاهده می‌شود نمودار مشکی برای رویه جلویی و نمودار قرمز رنگ برای رویه پشتی است. جابجایی رویه جلویی زودتر از رویه پشتی آغاز شده است و جابجایی رویه پشتی کمتر از رویه جلویی است.



شکل ۲۲: نمودار میزان جذب انرژی اجزای ساندویچ پنل با هسته مشبک مربعی

بر اساس نتایج شکل ۲۲ میزان جذب انرژی کل ساندویچ پنل با هسته مشبک مربعی ۳۲۰ ژول است که از این میزان ۱۵۷ ژول توسط رویه جلویی، ۳۶ ژول توسط رویه عقبی و نیز ۱۲۷ ژول توسط هسته مشبک مربعی جذب می‌گردد.

در این مرحله برای ارزیابی سازه ساندویچی با هسته فومی و هسته مشبک مربعی، نتایج در جدولی با یکدیگر مقایسه می‌گردد. نتایج ناشی از بارگذاری انفجاری با ۳۰ گرم ماده منفجره C4 که در فاصله ۱۰ سانتی‌متر از هدف قرار دارد، ارائه



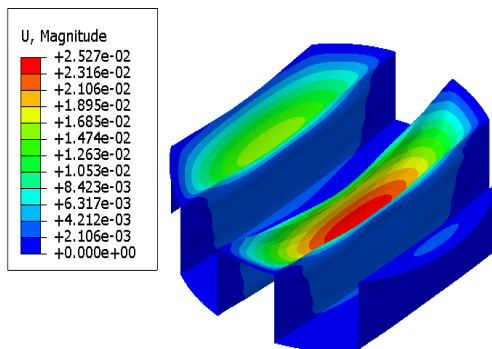
شکل ۱۷: جابجایی رویه جلویی در تحلیل عددی انفجار با هسته مشبک مربعی



شکل ۱۸: جابجایی رویه پشتی در تحلیل عددی انفجار با هسته مشبک مربعی



شکل ۱۹: جابجایی هسته مشبک مربعی در آزمون تجربی انفجار



شکل ۲۰: جابجایی هسته مشبک مربعی در تحلیل عددی انفجار

خرج انفجاری ۱/۵ و ۲ برابر می‌گردد و نتایج حاصل از آن در جدول ۵ ارائه می‌گردد.

جدول ۵: تأثیر میزان تغییر خرج انفجاری در نتایج ساندویچ پنل با

هسته فومی

جرم ماده منفجره (گرم) TNT	۴۰	۶۰	۸۰
حداکثر جابجایی رویه جلویی (cm)	۱/۳۹	۱/۳۸	۱/۲۵
حداکثر جابجایی رویه پشتی (cm)	۲/۰۳	۲/۸۰	۳/۵۸
میزان افزایش جابجایی رویه پشتی نسبت به حالت اولیه	%۳۸	%۷۶	

از نتایج جدول ۵ مشاهده می‌گردد که با افزایش میزان جرم ماده منفجره، چون هسته فومی وارد فاز پلاستیک نشده و قابلیت جذب انرژی خوبی ندارد لذا بیشترین فشار ناشی از انفجار به رویه پشتی منتقل شده و میزان جابجایی رویه پشتی به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش و جابجایی رویه جلویی کاهش می‌یابد. و با توجه به اینکه هسته فومی وارد فاز پلاستیک نشده است لذا رویه جلویی جایی برای تغییر شکل بیشتر ندارد ولی رویه پشتی چون در مواجهه با هوا است جابجایی آن بیشتر شده است.

در این مرحله نیز تأثیر جرم ماده منفجره در میزان جابجایی رویه‌ها در ساندویچ پنل با هسته مشبک مربعی در جدول ۶ ارائه می‌گردد.

جدول ۶: تأثیر میزان تغییر خرج انفجاری در نتایج ساندویچ پنل با

هسته مشبک مربعی

جرم ماده منفجره (گرم) TNT	۴۰	۶۰	۸۰
حداکثر جابجایی رویه جلویی (cm)	۱/۳۹	۲/۰۳	۲/۷۹
حداکثر جابجایی رویه پشتی (cm)	۰/۹۰۴	۱/۰۳	۱/۱۰
میزان افزایش جابجایی رویه پشتی نسبت به حالت اولیه	%۱۴	%۲۲	

مطابق تحلیل قبل، با افزایش میزان جرم ماده منفجره میزان جابجایی رویه پشتی افزایش می‌یابد. در این مرحله از پژوهش تأثیر فاصله خرج انفجاری از هدف بررسی می‌گردد. در آزمون تجربی فاصله ماده منفجره تا هدف ۱۰ سانتی‌متر بود. حال تأثیر موج انفجار بر روی ساندویچ پنل در دو فاصله ۱۵ سانتی‌متر و

می‌گردد. در جدول ۳ جابجایی دو سازه ساندویچی (رویه جلویی، هسته و رویه پشتی) با یکدیگر مقایسه شده است.

جدول ۳: مقایسه نتایج جابجایی در دو سازه ساندویچی

میزان جابجایی (cm)	سازه با هسته فومی	سازه با هسته مشبک مربعی
رویه جلویی	۱/۳۹	۱/۳۹
هسته	۱/۴۰	۲/۵۲
رویه پشتی	۲/۰۳	۰/۹۰۳

از نتایج جدول ۳ این نتیجه حاصل می‌شود که میزان جابجایی رویه پشتی در بارگذاری انفجاری در سازه با هسته مشبک مربعی کمتر از سازه با هسته فومی است و همچنین میزان جابجایی رویه پشتی ساندویچ پنل با هسته فومی بیشتر از رویه جلویی است. این به خاطر این است که هسته فومی وارد فاز پلاستیک نشده و هسته فومی میزان جذب انرژی بسیار کمتری نسبت به هسته مشبک مربعی دارد که در نتایج جدول ۴ به‌وضوح نشان داده شده است. همچنین میزان جابجایی رویه پشتی ساندویچ پنل با هسته مشبک مربعی کمتر از رویه جلویی آن است. و هدف از این پژوهش طراحی سازه‌ای است که در برابر بار انفجاری مقاومت‌تر باشد، لذا هسته مشبک مربعی برای این منظور مناسب‌تر است.

در جدول ۴ میزان جذب انرژی دو سازه ساندویچی (رویه جلویی، هسته و رویه پشتی) با یکدیگر مقایسه شده است.

جدول ۴: مقایسه نتایج جذب انرژی در دو سازه ساندویچی

میزان جذب انرژی (J)	سازه با هسته فومی	سازه با هسته مشبک مربعی
رویه جلویی	۱۰۸	۱۵۷
هسته	۶	۱۲۷
رویه پشتی	۹۵	۳۶
کل سازه	۲۰۹	۳۲۰

همان‌طور که در نتایج جدول ۴ مشاهده می‌گردد میزان جذب انرژی هسته مشبک مربعی حدود ۲۱ برابر بیشتر از هسته فومی است (هسته فومی ۶ ژول و هسته مشبک مربعی ۱۲۷ ژول است)، به همین خاطر میزان جابجایی رویه پشتی ساندویچ پنل با هسته مربعی کمتر از ساندویچ پنل با هسته فومی است.

حال تأثیر میزان جرم ماده منفجره در نتایج تحلیل عددی ساندویچ پنل با هسته میانی فوم بررسی می‌شود. میزان جرم

۱/۷۲	۱/۳۲	۱/۳۹	حداکثر جابجایی رویه جلویی (cm)
۶/۰۴	۱/۸۱	۲/۰۳	حداکثر جابجایی رویه پشتی (cm)
%۱۹۷	-%۱۰/۸		میزان تغییرات جابجایی رویه پشتی نسبت به حالت اولیه

با توجه به نتایج جدول ۹ این نتیجه حاصل می‌شود که تغییر جنس رویه‌ها از فولاد ST12 به فولاد ST37 باعث کاهش میزان جابجایی رویه پشتی در ساندویچ پنل با هسته میانی فوم می‌گردد. همچنین تغییر جنس رویه‌ها از فولاد به آلومینیوم تأثیر بسیار نامطلوبی در میزان جابجایی رویه پشتی دارد به طوری که میزان جابجایی رویه پشتی در حدود ۳ برابر می‌گردد. حال تأثیر تغییر جنس رویه و هسته در ساندویچ پنل با هسته مشبک مربعی در جدول ۸ ارائه می‌گردد.

جدول ۱۰: تأثیر تغییر جنس رویه‌ها و هسته در نتایج ساندویچ پنل با هسته مشبک مربعی

AL1050	AL1050	ST12	ST12	جنس رویه‌ها
AL1050	ST12	AL1050	ST12	جنس هسته
۴/۴۹	۳/۷۱	۲/۰۱	۱/۳۹	حداکثر جابجایی رویه جلویی (cm)
۵/۵۴	۴/۱۲	۳/۱۴	۲/۵۲	حداکثر جابجایی هسته (cm)
۱/۵۶	۱/۰۸	۰/۶۵۱	۰/۹۰۴	حداکثر جابجایی رویه پشتی (cm)
%۷۲	%۱۹	-%۲۸		میزان تغییرات جابجایی رویه پشتی نسبت به حالت اولیه

با توجه به نتایج جدول ۱۰ دریافت می‌شود که تغییر جنس هسته از فولاد ST12 به AL1050 باعث کاهش ۲۸ درصدی جابجایی رویه پشتی می‌گردد. این به خاطر تغییر شکل پلاستیک کمتر هسته فولادی نسبت به هسته آلومینیومی شده است (میزان جابجایی هسته فولادی ۲/۵۲ و میزان جابجایی هسته آلومینیومی ۳/۱۴ سانتی‌متر است) و همچنین با تغییر جنس رویه‌ها از فولاد به آلومینیوم تأثیر نامطلوبی در میزان جابجایی رویه جلویی و پشتی دارد به طوری که با این تغییر میزان جابجایی رویه پشتی حدوداً ۱۹ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با تغییر جنس کل ساندویچ پنل از فولاد به آلومینیوم تأثیر بسیار نامطلوبی در میزان جابجایی رویه جلویی و پشتی دارد به طوری که با این تغییر میزان جابجایی رویه پشتی حدوداً ۷۲ درصد افزایش می‌یابد.

۲۰ سانتی‌متر مورد بررسی قرار می‌گیرد. در جدول ۷ تأثیر فاصله ماده منفجره تا هدف در نتایج ساندویچ پنل با هسته فومی و در جدول ۸ تأثیر فاصله ماده منفجره تا هدف در نتایج ساندویچ پنل با هسته مشبک مربعی ارائه می‌گردد.

جدول ۷: تأثیر فاصله ماده منفجره تا هدف در نتایج ساندویچ پنل با هسته فومی

۲۰	۲۰	۱۵	۱۰	فاصله تا هدف (cm)
۸۰	۴۰	۴۰	۴۰	جرم ماده منفجره (TNT gr)
۱/۰۴۲	۰/۵۸	۰/۸۴	۱/۳۹	حداکثر جابجایی رویه جلویی (cm)
۱/۹۰	۱/۰۹	۱/۵۲	۲/۰۳	حداکثر جابجایی رویه پشتی (cm)
-%۶/۴	-%۴۷	-%۲۵		میزان تغییرات جابجایی رویه پشتی نسبت به حالت اولیه

حال تأثیر فاصله ماده منفجره تا هدف بر روی ساندویچ پنل با هسته مشبک مربعی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جدول ۸: تأثیر فاصله ماده منفجره تا هدف در نتایج ساندویچ پنل با هسته مشبک مربعی

۲۰	۲۰	۱۵	۱۰	فاصله تا هدف (cm)
۸۰	۴۰	۴۰	۴۰	جرم ماده منفجره (TNT gr)
۰/۸۵۷	۰/۲۰۴	۰/۵۲۲	۱/۳۹	حداکثر جابجایی رویه جلویی (cm)
۰/۸۵۷	۰/۴۷۴	۰/۶۹۱	۰/۹۰۴	حداکثر جابجایی رویه پشتی (cm)
-%۵	-%۴۸	-%۲۴		میزان درصد تغییرات جابجایی رویه پشتی نسبت به حالت اولیه

با توجه به نتایج جداول ۷ و ۸ این نتیجه حاصل می‌گردد که با افزایش فاصله ماده منفجره تا هدف میزان تغییرات جابجایی رویه جلویی و پشتی به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. همچنین هرچقدر این فاصله بیشتر باشد میزان درصد کاهش جابجایی رویه‌ها بیشتر خواهد شد. حال تأثیر تغییر جنس رویه و هسته فلزی در میزان جابجایی رویه‌ها بررسی می‌گردد.

جدول ۹: تأثیر تغییر جنس رویه در نتایج ساندویچ پنل با هسته فومی

AL1050	ST37	ST12	جنس رویه‌ها
--------	------	------	-------------

جدول ۱۳: تأثیر ضخامت هسته در میزان جذب انرژی ساندویچ پنل با هسته مشبک مربعی

ضخامت هسته (mm)	۰/۳	۰/۵	۰/۷	۱
جذب انرژی رویه جلویی (J)	۱۹۰	۱۵۷	۱۶۱	۱۶۸
جذب انرژی هسته (J)	۱۳۶	۱۲۷	۱۱۱	۱۰۱
جذب انرژی رویه پشتی (J)	۲۵	۳۶	۳۲	۱۹
جذب انرژی کل سازه (J)	۳۵۱	۳۲۰	۳۰۴	۲۸۸

با توجه به نتایج جدول ۱۲ این نتیجه حاصل می‌گردد که با کاهش ۴۰ درصدی ضخامت هسته میزان جابجایی رویه جلویی ۲۸ درصد افزایش یافته و درعین حال میزان جابجایی رویه پشتی به میزان ۲۶ درصد کاهش می‌یابد.

همچنین با افزایش ۴۰ درصدی ضخامت هسته میزان جابجایی رویه جلویی ۱۴ درصد کاهش و درعین حال میزان جابجایی رویه پشتی به میزان ۵ درصد کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش ۱۰۰ درصدی ضخامت هسته میزان جابجایی رویه جلویی ۲۴ درصد کاهش و درعین حال میزان جابجایی رویه پشتی به میزان ۲۸ درصد کاهش می‌یابد.

با توجه به نتایج جدول ۱۲ و ۱۳ این نتیجه حاصل می‌گردد که با افزایش ضخامت هسته از ۰/۳ میلی‌متر به ۱ میلی‌متر حداکثر خیر رویه جلویی و هسته به‌طور پیوسته کاهش می‌یابد. این به این دلیل است که در این سازه‌ها با افزایش ضخامت هسته از ۰/۳ میلی‌متر به ۱ میلی‌متر میزان جذب انرژی هسته به‌طور پیوسته کاهش می‌یابد. همچنین با توجه نتایج جدول ۱۳ می‌توان به این نتیجه رسید که کمترین جذب انرژی رویه پشتی مربوط به سازه با ضخامت هسته ۱ میلی‌متر است که این مسئله باعث می‌گردد که کمترین جابجایی رویه پشتی در این سازه اتفاق بیفتد. پس از سازه با ضخامت هسته ۱ میلی‌متر، کمترین جذب انرژی رویه پشتی مربوط به سازه با ضخامت هسته ۰/۳ میلی‌متر است. این ساندویچ پنل، یعنی سازه با ضخامت هسته ۰/۳ میلی‌متر می‌تواند بهینه‌ترین سازه از نظر حداکثر جابجایی رویه پشتی باشد. چون با افزایش حدود ۲۳۳ درصدی وزن هسته (ضخامت از ۰/۳ میلی‌متر به ۱ میلی‌متر) فقط حدود ۳ درصد جابجایی ورق پشتی کاهش پیدا کرده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، دو نوع هسته در نظر گرفته شد. آزمون تجربی و تحلیل عددی بر روی سازه‌های ساندویچ پنل انجام گرفت. مقایسه نتایج تحلیل عددی با نتیجه آزمون تجربی تطابق خوبی

در این مرحله تأثیر میزان چگالی هسته در نتایج ساندویچ پنل با هسته میانی فوم بررسی می‌شود. چگالی هسته فومی در تحلیل اولیه ۴۵ کیلوگرم بر مترمکعب بود که با ۱/۵ و ۲ برابر کردن چگالی هسته فومی، تحلیل انجام گرفته و نتایج در جدول ۱۱ ارائه می‌گردد.

جدول ۱۱: تأثیر میزان تغییر چگالی هسته فومی در نتایج

چگالی هسته میانی فوم (kg/m ³)	۴۵	۶۷/۵	۹۰
حداکثر جابجایی رویه جلویی (cm)	۱/۳۹	۱/۳۰	۱/۱۶
حداکثر جابجایی رویه پشتی (cm)	۲/۰۳	۲/۱۴	۲/۱۳
میزان افزایش جابجایی رویه پشتی نسبت به حالت اولیه		٪۵/۴	٪۴/۹

بر اساس نتایج جدول ۱۱ با افزایش چگالی هسته، میزان حداکثر جابجایی رویه جلویی کاهش، و میزان حداکثر جابجایی رویه پشتی افزایش پیدا کرده است لذا افزایش چگالی هسته فومی نمی‌تواند در بهبود کیفیت ساندویچ پنل در برابر بار انفجاری مفید باشد. حال تأثیر ضخامت ورق هسته مشبک مربعی در میزان جابجایی رویه‌ها بررسی می‌گردد. تحلیل عددی با ضخامت‌های هسته ۰/۳ و ۰/۷ و ۱ میلی‌متر انجام گرفته و نتایج جابجایی و جذب انرژی این سازه‌ها در جداول ۱۲ و ۱۳ با یکدیگر مقایسه می‌گردد.

جدول ۱۲: تأثیر ضخامت هسته در میزان جابجایی ساندویچ پنل با هسته مشبک مربعی

ضخامت هسته (mm)	۰/۳	۰/۵	۰/۷	۱
حداکثر جابجایی رویه جلویی (cm)	۱/۷۸	۱/۳۹	۱/۱۹	۱/۰۵
حداکثر جابجایی هسته (cm)	۳/۰۸	۲/۵۲	۲/۰۶	۱/۵۴
حداکثر جابجایی رویه پشتی (cm)	۰/۶۶۵	۰/۹۰۴	۰/۸۶۰	۰/۶۴۷
میزان درصد تغییرات جابجایی رویه جلویی نسبت به حالت اولیه	٪۲۸		٪۱۴-	٪۲۴-
میزان درصد تغییرات جابجایی رویه پشتی نسبت به حالت اولیه	٪۲۶-		٪۵-	٪۲۸-
میزان درصد تغییرات ضخامت هسته نسبت به حالت اولیه	٪۴۰-		٪۴۰	٪۱۰۰

۹- با توجه به نتایج جدول ۱۳ و توضیحات آن این نتیجه حاصل می‌گردد که سازه با ضخامت هسته ۰/۳ میلی‌متر می‌تواند بهینه‌ترین سازه از نظر میزان جابجایی رویه پشتی باشد.

۶- مراجع

- [1] Gama BA, Bogetti TA, Fink BK, Yu C-J, Claar TD, Eifert HH, et al. Aluminum foam integral armor: a new dimension in armor design. *Composite structures*. 2001; 52(3-4):381-9. DOI [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(01\)00029-0](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(01)00029-0)
- [2] Amini M, Isaacs J, Nemat-Nasser S. Experimental investigation of response of monolithic and bilayer plates to impulsive loads. *International Journal of Impact Engineering*. 2010; 37(1):82-9. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2009.04.002>
- [3] Gharababaei H, Darvizeh A. Experimental and Analytical Investigation of Large Deformation of Thin Circular Plates Subjected to Localized and Uniform Impulsive Loading. *Mechanics based design of structures and machines*. 2010 Apr 30; 38(2):171-89. DOI <https://doi.org/10.1080/15397730903554633>
- [4] Gharababaei H, Nariman-Zadeh N, Darvizeh A. A simple modelling method for deflection of circular plates under impulsive loading using dimensionless analysis and singular value decomposition. *Journal of Mechanics*. 2010 Sep 1; 26(03):355-61. DOI <https://doi.org/10.1017/S1727719100003919>
- [5] Babaei H, Darvizeh A. Investigation into the response of fully clamped circular steel, copper, and aluminum plates subjected to shock loading. *Mechanics based design of structures and machines*. 2011 Oct 1; 39(4):507-26. DOI <https://doi.org/10.1080/15397734.2011.583204>
- [6] Babaei H, Darvizeh A. Analytical study of plastic deformation of clamped circular plates subjected to impulsive loading. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*. 2012 Jul 26; 7(4):309-22. DOI [10.2140/jomms.2012.7.309](https://doi.org/10.2140/jomms.2012.7.309)
- [7] Yazici M, Wright J, Bertin D, Shukla A. Experimental and numerical study of foam filled corrugated core steel sandwich structures subjected to blast loading. *Composite structures*. 2014; 110:98-109. DOI <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.11.016>
- [8] Langdon G, Lee W, Louca L. The influence of material type on the response of plates to air-blast loading. *International Journal of Impact Engineering*. 2015; 78:150-60. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2014.12.008>
- [9] Mehreganian N, Louca L, Langdon G, Curry R, Abdul-Karim N. The response of mild steel and armour steel plates to localised air-blast loading-comparison of numerical modelling techniques. *International Journal of Impact Engineering*. 2018; 115:81-93. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.01.010>
- [10] Rezasefat M, Mirzababaei Mostofi T, Babaei H, Ziya-Shamami M, Alitavoli M. Dynamic plastic response of double-layered circular metallic plates due to localized impulsive loading. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design*

را نشان می‌دهد. نتایج آزمایش تجربی نشان داد که هسته فوم پلی اورتان اصلاً مناسب نیست، زیرا جابجایی رویه پشتی بسیار بیشتر از رویه جلویی بود ولی هسته مشبک مربعی در بارگذاری انفجاری مناسب است؛ زیرا جابجایی رویه پشتی ساندویچ پنل کمتر از رویه جلویی است و هسته‌ها خاصیت جذب انرژی خوبی دارند. نتایج به صورت تیترا وار ارائه می‌گردد.

۱- هسته فوم پلی اورتان برای استفاده در ساندویچ پنل در بارگذاری انفجاری به تنهایی هسته مناسبی نیست؛ زیرا هسته وارد فاز پلاستیک نشده و خاصیت جذب انرژی ندارد و همچنین میزان جابجایی رویه پشتی بیشتر از رویه جلویی است. با توجه به نتایج جدول ۴ دریافت می‌شود که میزان جذب انرژی هسته فومی در مقایسه با هسته مشبک مربعی بسیار پایین بوده و سازه با هسته فومی برای مقاومت در برابر بار انفجاری مناسب نیست.

۲- در بارگذاری انفجاری با هسته فوم پلی اورتان با افزایش چگالی هسته میزان حداکثر جابجایی رویه پشتی افزایش پیدا کرده است لذا افزایش چگالی هسته فومی نمی‌تواند در بهبود کیفیت ساندویچ پنل در برابر بار انفجاری مفید باشد.

۳- در بارگذاری انفجاری با هسته فوم پلی اورتان، با تغییر جنس رویه‌ها از فولاد ST12 به فولاد ST37 تأثیر مثبت در میزان جابجایی رویه پشتی دارد. همچنین تغییر جنس رویه‌ها از فولاد به آلومینیوم تأثیر بسیار نامطلوبی در میزان جابجایی رویه پشتی دارد به طوری که میزان جابجایی رویه پشتی در حدود ۳ برابر می‌گردد.

۴- تمامی تحلیل‌ها با تمامی هسته‌ها با افزایش میزان خرج ماده منفجره جابجایی رویه پشتی افزایش می‌یابد.

۵- در تمامی تحلیل‌ها با تمامی هسته‌ها با افزایش فاصله ماده منفجره تا هدف، جابجایی رویه پشتی به میزان فراوانی کاهش می‌یابد. اثرات مثبت افزایش فاصله ماده منفجره تا هدف بسیار بیشتر از کاهش میزان جرم ماده منفجره است. یعنی برای اینکه جابجایی رویه پشتی ساندویچ پنل در حالتی که فاصله ماده منفجره تا هدف دو برابر می‌گردد یکسان شود باید جرم ماده بسیار بیشتر از دو برابر افزایشی‌اید.

۶- در تحلیل ساندویچ پنل‌ها با هسته مشبک مربعی، با تغییر جنس رویه‌ها از فولاد به آلومینیوم تأثیر نامطلوبی در میزان جابجایی رویه جلویی و پشتی دارد.

۷- در تحلیل ساندویچ پنل‌ها با هسته مشبک مربعی، تغییر جنس هسته از فولاد ST12 به AL1050 تأثیر مطلوبی در کاهش جابجایی رویه پشتی دارد.

۸- در تحلیل ساندویچ پنل‌ها با هسته مشبک مربعی، همچنین با تغییر جنس کل ساندویچ پنل از فولاد به آلومینیوم تأثیر بسیار نامطلوبی در میزان جابجایی رویه جلویی و پشتی دارد.

- and Applications. 2019; 233(7):1449-71. DOI <https://doi.org/10.1177/1464420718760640>
- [11] Khondabi R, Khodarahmi H, Hosseini R, Zia Shamami M. Experimental and numerical study of core and face-sheet thickness effects in sandwich panels with foam core and aluminum face-sheets subjected to blast loading. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*. 2018; 8 (In Persian) 106-91. DOI <https://doi.org/10.22044/jsfm.2018.7230.2663>
- [12] Ghamarizadeh M, Khodarahmi H, Mirzababaie Mostofi T. The Experimental and Analytical Response of Circular Metal Sandwich Panels with Tubular Cores under Blast Load. *Aerospace Mechanics*. 2022; 17 (4):81-95. (In Persian) DOR <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455323.1400.14.4.6.4>
- [13] Ziya-Shamami M, Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Khodarahmi H. Plastic Deformation of Similar and Dissimilar Multi-layered Metallic Plates with the Same Areal Density Subjected to Repeated Impulsive Loading. *Aerospace Mechanics*. 2022;18(1):137-59. (In Persian) DOR <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455323.1401.18.1.9.7>
- [14] Khodarahmi H, Kaffash Mirzarahimi M, Zia Shamami M, Hosseini R. Experimental and numerical evaluation of energy absorption capacity of sandwich panel with polyurethane foam core reinforced with mineral pumice under explosive loading. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*. 2022;12(4):27-40 (In Persian) DOI <https://doi.org/10.22044/jsfm.2022.11472.3512>
- [15] Haghgoo M, Babaei H, Mirzababaie Mostofi T. Analytical Modeling of Triangular Plate Deflection under Gaseous Detonation Loading. *Aerospace Mechanics*. 2022;18(3):41-52. (In Persian) DOR <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455323.1401.18.3.4.6>
- [16] Mohammadi Hooyeh H, Naddaf Oskouei A, Mirzababaie Mostofi T, Vahedi K. Experimental and Numerical Investigation of Trapezoidal Corrugated Core Sandwich Panels Under Oblique Blast Loading. *Aerospace Mechanics*. 2023;19(2):11-23. (In Persian) DOR: <https://dor.isc.ac/dor/0.1001.1.26455323.1402.19.2.2.9>
- [17] Haghgoo M, Babaei H, Mirzababaie Mostofi T. Numerical Simulation of Triangular Plate Deformation Profile Under Gaseous Detonation Loading. *Aerospace Mechanics*. 2023;19(1):1-15. (In Persian) DOR <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455323.1402.19.1.1.6>
- [18] Kouzehgaran M, Khodarahmi H, Sadegh Yazdi M, Ziya-Shamami M, Mirzababaie Mostofi T. Female Die Forming of Metallic Plates using Repeated Underwater Explosions. *Aerospace Mechanics*. 2024;20(3):1-16. (In Persian) DOR <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455323.1403.20.3.1.7>