

بررسی تجربی و عددی اثر بارگذاری انفجاری بر سازه‌های ساندویچی با هسته‌های مشبک فلزی علی کوچکی نژاد ارم ساداتی^۱، علی علی‌نیازی^{۲*}، هاشم بابایی^۳، شهرام اعتمادی حقیقی^۴، مجتبی ضیا شمامی^۵

^۱ گروه مهندسی مکانیک، واحد علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

^۲ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

^۳ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

^۴ دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

^۵ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۲

چکیده

سازه‌های ساندویچی با هسته‌های مشبک فلزی به دلیل وزن کم و استحکام بالا، کاربرد گسترده‌ای در صنایع هوافضا، خودروسازی و سازه‌های مقاوم در برابر بارهای دینامیکی دارند. در این پژوهش، اثر بارگذاری انفجاری روی سازه‌های ساندویچی با هسته‌های مشبک دوزنقه و مثلثی به صورت تجربی و عددی بررسی شده است. آزمایش‌های تجربی با استفاده از روش انفجار آزاد انجام شده و پاسخ مکانیکی این سازه‌ها شامل تغییر شکل، جذب انرژی مورد تحلیل قرار گرفته است. به منظور شبیه‌سازی عددی، از نرم‌افزار آباکوس و روش کانوپ برای مدل‌سازی اثر انفجار استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که نوع هندسه هسته مشبک تأثیر بسزایی بر رفتار مکانیکی سازه ساندویچی دارد. هسته‌های مشبک دوزنقه و مثلثی در مواجهه با بار انفجاری رفتار تقریباً مشابهی از نظر جذب انرژی و میزان خیز رویه پشتی نشان می‌دهند. مقایسه داده‌های تجربی و عددی نشان‌دهنده دقت بالای مدل‌سازی عددی در پیش‌بینی رفتار سازه است. یافته‌های این تحقیق می‌تواند در طراحی بهینه سازه‌های مقاوم در برابر بارهای انفجاری مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: انفجار آزاد؛ ساندویچ پنل؛ هسته مشبک دوزنقه؛ هسته مشبک مثلثی؛ روش کانوپ.

Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Blast Loading on Sandwich Structures with Metallic Lattice Cores

A. Koochakinejad Eramsadati¹, A. Alinia-ziazi^{2*}, H. Babaei³, Sh. Etemadi haghghi⁴, M. Ziya-Shamami⁵

¹ Ph.D. Student, Department of Mechanical Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

² Assist. Prof., Department of Mechanical Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

³ Prof., Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

⁴ Assoc. Prof. Department of Mechanical Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

⁵ Assist. Prof., Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran.

Abstract

Sandwich structures with metallic lattice cores, due to their lightweight and high strength, are widely used in aerospace, automotive, and dynamic load-resistant structures. In this research, the effect of blast loading on sandwich structures with trapezoidal and triangular lattice cores has been investigated both experimentally and numerically. Experimental tests were conducted using the free-air explosion method, and the mechanical response of these structures, including deformation and energy absorption, was analyzed. For numerical simulation, Abaqus software and the CONWEP method were used to model the blast effects. The results indicate that the geometry of the lattice core significantly influences the mechanical behavior of the sandwich structure. Trapezoidal and triangular lattice cores exhibit nearly similar behavior in terms of energy absorption and back face sheet deflection under blast loading. A comparison of experimental and numerical data demonstrates the high accuracy of the numerical model in predicting the structural behavior. The findings of this research can be utilized in the optimal design of blast-resistant structures.

Keywords: Free-air explosion; Sandwich Panel; Trapezoidal lattice core; Triangular lattice core; CONWEP method.

۱- مقدمه

سازه‌های ساندویچی با هسته‌های مشبک فلزی به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا، جذب انرژی مناسب و مقاومت مکانیکی مطلوب، در صنایع مختلف از جمله هوافضا، خودروسازی و سازه‌های مقاوم در برابر بارهای ضربه‌ای و انفجاری مورد استفاده قرار می‌گیرند. این ساختارها از دو لایه نازک و سخت تشکیل شده‌اند که توسط یک هسته مشبک تقویت می‌شوند. طراحی بهینه این هسته‌ها می‌تواند نقش کلیدی در بهبود عملکرد مکانیکی و جذب انرژی سازه داشته باشد. در محیط‌های عملیاتی، سازه‌های ساندویچی ممکن است تحت بارهای انفجاری ناشی از تهدیدهای نظامی، حملات تروریستی یا حوادث صنعتی قرار گیرند. بررسی عملکرد این سازه‌ها تحت بارگذاری انفجاری می‌تواند به طراحی و توسعه سازه‌های مقاوم‌تر کمک کند. در سال‌های اخیر، مطالعات گسترده‌ای بر روی سازه‌های ساندویچی تحت بارهای دینامیکی انجام شده است. برخی از مهم‌ترین تحقیقات در این زمینه شامل موارد زیر است. در سال ۱۹۹۱، تیلینگ-اسمیت [۱] و نوریک آزمایش‌هایی روی ورق‌های دایروی با شرایط مرزی گیردار تحت بار انفجاری پرداختند. نتایج آن‌ها بیانگر این بود که ضخامت ماده منفجره مسطح با ایمپالس ناشی از انفجار رابطه مستقیم داشته و امکان وقوع حالت‌های مختلف شکست برای ورق‌های دایروی امکان‌پذیر است. نوریک و همکاران [۲] آزمایش‌های دیگری برای ورق‌های فولادی دایروی با ضخامت ۱/۶ میلی‌متر و در چهار شعاع مختلف ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ میلی‌متر در معرض بار انفجاری حاصل از مواد منفجره مسطح انجام دادند. یوان و نوریک [۳] به بررسی ضخامت ورق در معرض بارهای انفجاری غیریکنواخت با توجه به شکست ماده پرداختند. بالدن و نوریک [۴] به بررسی شبیه‌سازی عددی حالت شکست ورق‌های فولادی در معرض بار انفجاری پرداختند. در این تحقیق نتایج شبیه‌سازی عددی و تجربی ارائه شده است. ژاکوب و همکاران [۵] به بررسی اثر فاصله قرارگیری و میزان جرم خرج بر پاسخ دینامیکی ورق‌های دایروی کاملاً گیردار از جنس فولاد نرم با شعاع ۵۳ میلی‌متر در معرض بار انفجاری پرداختند.

احمد [۶] به مطالعه رفتار دینامیکی ساختارهای چندلایه در معرض بارگذاری انفجاری پرداخته است. هدف از این تحقیق، ارزیابی واکنش ساختار چندلایه در مقایسه با ساختار تک لایه

در مقابل بارگذاری انفجار غیریکنواخت است. اسپرانگرس و همکاران [۷] به بررسی تجربی و شبیه‌سازی عددی پاسخ دینامیکی ورق‌های آلومینیومی در معرض بار انفجاری پرداختند. اون و همکاران [۸] به مطالعه عددی روی پاسخ ساختار ورق‌های نازک آلومینیومی و فولادی در مقابل بار انفجاری پرداختند. پاسخ پلاستیک ورق‌های آلومینیوم و فولاد که در معرض بارگذاری انفجاری قرار دارند، به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته و با داده‌های تجربی اعتبارسنجی می‌شوند.

رمینیکف و همکاران [۹] به بررسی تجربی و مدل‌سازی ساده شده پرداختند، پاسخ ورق‌های فولادی در معرض انفجار نزدیک ناشی از مواد منفجره مایع قرار دارد؛ همچنین ژانگ و همکاران [۱۰] به مطالعه تجربی و عددی روی پاسخ دینامیکی ورق‌های فولادی در معرض بار انفجاری محدود پرداختند. سبزواری و همکاران [۱۱] به مطالعه انتخاب بهینه شکل و مصالح پنل‌های ساندویچی با هسته موجدار در برابر بارهای انفجاری پرداختند. در این پژوهش چهار نوع ورق موجدار مستطیلی، دوزنقه‌ای، مثلثی و بیضوی برای هسته پنل‌ها در نظر گرفته شده بود و بر روی سازه‌های ساندویچی تحلیل عددی انجام شد.

خندابی و همکاران [۱۲] 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 پلی‌یورتان با ضخامت‌های مختلف و ساخت پنل‌های ساندویچی از ورق‌های آلومینیومی و هسته فوم پلی‌یورتان با استفاده از دستگاه شاک 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 ۲۰۲۲، شمایی و همکاران [۱۳] به مطالعه تغییر شکل پلاستیک ورق‌های چندلایه فلزی هم‌جنس و غیرهم‌جنس 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 غیرهم‌جنس با چگالی سطحی ثابت تحت بارگذاری دفعی مکرر یکنواخت مورد بررسی قرار گرفته است. نصیری و همکاران [۱۴] به بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر در فرآیند شکل‌دهی آزاد ورق تحت بارگذاری انفجاری زیرآب پرداختند.

اولیه، رفتار ورق تحت بارهای انفجار آزاد و متوالی مورد بررسی قرار گرفته است و با روش تجربی مقایسه می‌شود. علی یوسفی و همکاران [۲۱] به بررسی شبیه‌سازی و بهینه‌سازی سازه کابین کامیون در معرض انفجار پرداختند. در این مقاله، مدل سه‌بعدی کابین کامیون با هدف بررسی اثر انفجار در نزدیکی و زیر این کامیون و بهینه‌سازی کابین آن ایجاد می‌شود.

محمود کفاش میرزا رحیمی و همکاران [۲۲] به بررسی تجربی رفتار مکانیکی هسته مرکب از فوم پلی‌یورتان و پوکه معدنی اسکوریا برای استفاده در ورق‌های ساندویچی جاذب انرژی انفجاری پرداختند. در این مقاله برای نوع جدیدی از ورق ساندویچی جاذب انرژی انفجار معرفی و به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است.

محمد سلوکی [۲۳] به بررسی مدل‌سازی عددی پانل ساندویچی با رویه‌های مختلف و گرادیان هسته تحت ضربه انفجاری پرداختند. در این پژوهش، مدهای واماندگی و تغییر شکل پانل‌های ساندویچی در برابر ضربه‌های انفجاری به صورت عددی بررسی و با نتایج تجربی مقایسه شده است.

استفاده از سازه‌های جاذب انرژی در بارگذاری انفجاری به‌عنوان یک راهکار مؤثر در کاهش خسارات ناشی از انفجار مورد توجه قرار گرفته است. این سازه‌ها با مکانیزم‌های مختلفی از جمله تغییر شکل پلاستیک، اصطکاک، و یا تغییر فاز مواد، انرژی ناشی از موج انفجار را جذب و پراکنده می‌کنند. مطالعات نشان می‌دهند که طراحی بهینه این سازه‌ها می‌تواند به‌طور چشمگیری فشار وارده بر سازه‌های اصلی را کاهش دهد و ایمنی سازه‌ها و ساکنان را در برابر تهدیدات انفجاری افزایش دهد. استفاده از هسته‌های مختلف مانند فوم‌ها، هسته‌های فلزی مشیک و آلیاژهای با رفتار فوق‌الاستیک، کارایی این سیستم‌ها را در جذب انرژی بهبود بخشیده است. بررسی پارامترهای مؤثر مانند هندسه، جنس مواد و نرخ بارگذاری در عملکرد این سازه‌ها از موضوعات کلیدی در تحقیقات معاصر به‌شمار می‌رود.

در این مقاله، اثر بارگذاری انفجاری بر سازه‌های ساندویچی با هسته‌های مشبک ذوزنقه و مثلثی به‌صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد. آزمایش‌های تجربی با روش انفجار آزاد انجام شده و برای تحلیل عددی، از نرم‌افزار آباکوس و روش کانوپ جهت شبیه‌سازی اثرات انفجار استفاده شده است. هدف

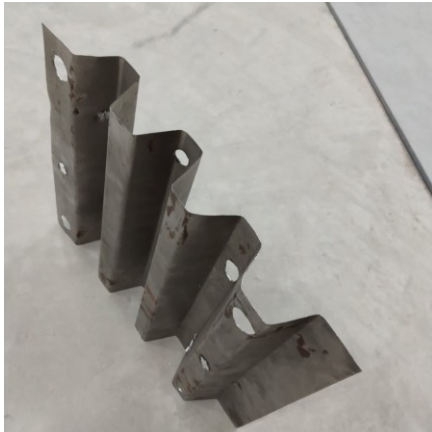
محمدی و همکاران [۱۵] به بررسی تجربی و عددی پنل‌های ساندویچی با هسته موجدار ذوزنقه‌ای شکل، تحت بارگذاری انفجاری مایل پرداختند. به منظور انجام انفجار مایل لوله‌های انفجاری در زوایای صفر موازی پنل هدف ۱۵،۳۰ و ۴۵ درجه نسبت به پنل هدف با فاصله استقرار خرج ثابت ۳۰۰ میلی‌متر تهیه گردیده است. از ماده منفجره C4 با جرم ثابت ۱۰ گرم در پروسه‌های انفجار استفاده گردیده است. در ادامه به کمک نرم افزار تجاری آباکوس و با استفاده از تکنیک کوپل اولیری لاگرانژی به حل عددی مسئله پرداخته شده است. کوزه گران و همکاران [۱۶] به مطالعه شکل‌دهی با قالب مادگی ورق‌های فلزی با استفاده از انفجار مکرر زیر آب پرداختند.

حسین خداحمی و همکاران [۱۷] به بررسی تجربی و عددی قابلیت جذب انرژی سازه ساندویچی با هسته‌ی فوم پلی‌یورتان تقویت شده با پوکه معدنی تحت بارگذاری انفجاری پرداختند. در این مقاله تغییر فرم و جذب انرژی سازه‌های ساندویچی با رویه آلومینیمی و فولادی و هسته ساخته شده از فوم پلی اورتان 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.

مصطفی سیاح باد خور و همکاران [۱۸] به بررسی اثر فاصله استقرار خرج انفجاری روی تغییر شکل ورق‌های فلزی دایروی پرداختند. در این مقاله به بررسی تجربی و تحلیل رگرسیون پاسخ دینامیکی ورق‌های فلزی تحت بار انفجاری پرداخته شده است.

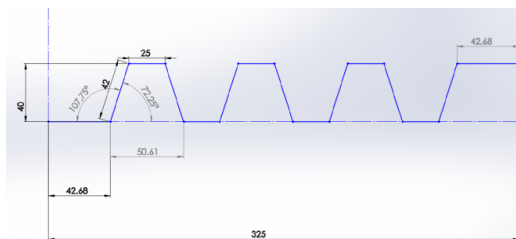
مجتبی قمری زاده و همکاران [۱۹] به بررسی پاسخ دینامیکی سپر انفجاری ساندویچی مدور با هسته لوله‌ای تحت بار انفجار آزاد پرداختند. در این مقاله عملکرد و پاسخ دینامیکی نوع جدیدی از سازه‌های ورق ساندویچی فلزی و مدور به‌عنوان جاذب انرژی انفجار با هسته لوله‌ای شعاعی غیر هم‌مرس تحت بار انفجار مورد بررسی قرار گرفته است.

مجتبی قمری زاده و همکاران [۲۰] به بررسی ارائه یک مدل تحلیلی مبتنی بر روش انرژی برای بررسی تغییر شکل پلاستیک ورق‌های دایره‌ای تحت بار انفجار مکرر با توزیع یکنواخت پرداختند. در این مقاله به یک روش تحلیلی نوین و مبتنی بر تعادل کار پلاستیک جذب شده و انرژی جنبشی



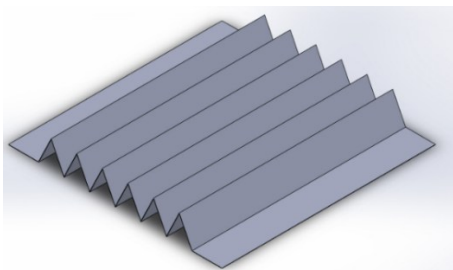
شکل ۲- هسته مشبک دوزنقه ای

ابعاد هسته مشبک دوزنقه در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- ابعاد هسته مشبک دوزنقه ای

در شکل ۴ نیز شماتیک هسته مشبک مثلثی نشان داده شده است؛ همچنین ابعاد هسته مشبک مثلثی در شکل ۵ نشان داده شده است. در تست تجربی ساندویچ پنل با هسته مشبک مثلثی، با توجه به اینکه امکان سوراخ کاری هسته برای بستن پیچ‌ها امکان پذیر نمی‌باشد، سطح مواجهه که دایره‌ای به قطر ۲۰ سانتی‌متر است از مرکز هسته جدا شده و داخل یک قالب چوبی به ضخامت ۴ سانتی‌متر مطابق ارتفاع هسته قرار داده شد (شکل ۶ الی شکل ۸).



شکل ۴- هسته مشبک مثلثی

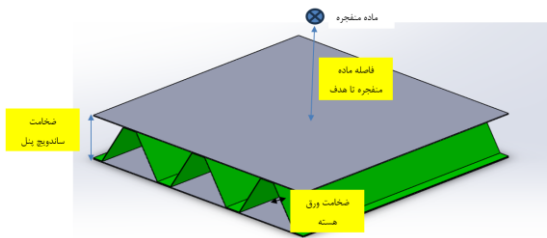
این تحقیق، بررسی تأثیر هندسه هسته مشبک بر رفتار مکانیکی سازه‌های ساندویچی، میزان جذب انرژی و خیز ورق پشتی ساندویچ پنل تحت بارگذاری انفجاری است. مقایسه نتایج عددی و تجربی به ارزیابی دقت مدل‌سازی عددی در پیش‌بینی پاسخ دینامیکی سازه کمک می‌کند. یافته‌های این پژوهش می‌تواند مبنای طراحی بهینه سازه‌های مقاوم در برابر انفجار قرار گیرد. در روش تجربی از ۳۰ گرم ماده منفجره C4 در فاصله ۱۰ سانتی‌متر تا هدف استفاده شده است.

۲- بررسی تجربی

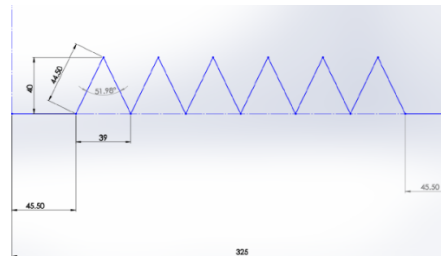
روش تجربی انفجار آزاد یکی از روش‌های رایج برای مطالعه تأثیر بارگذاری انفجاری بر سازه‌ها است که در آن، ماده منفجره در محیط باز و بدون هیچ‌گونه محدودیت جانبی منفجر می‌شود. در این روش، نمونه‌های مورد آزمایش در فاصله مشخصی از مرکز انفجار قرار می‌گیرند تا تحت تأثیر امواج ضربه‌ای حاصل از انفجار قرار گیرند. این روش امکان بررسی رفتار سازه در شرایط واقعی و بدون اثرات بازتابی ناشی از دیواره‌های محدودکننده را فراهم می‌کند. در این تحقیق برای ساخت رویه ساندویچ پنل از ورق فولادی روغنی ST12 با ضخامت ۱ میلی‌متر استفاده شده است (شکل ۱). در این پژوهش از دو نوع هسته مشبک دوزنقه و هسته مشبک مثلثی استفاده شده است. هسته‌ها از ورق فولادی روغنی ST12 با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر آماده می‌گردد. در شکل ۲ هسته مشبک دوزنقه نشان داده شده است.



شکل ۱- ورق رویه ساندویچ پنل



شکل ۹- شماتیک ساندویچ پنل با هسته مشبک

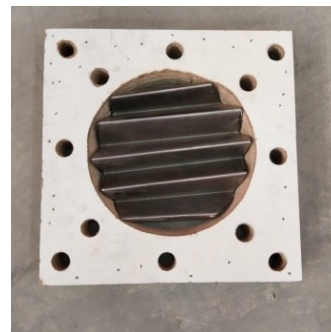


شکل ۵- ابعاد هسته مشبک مثلثی

ارتفاع (ضخامت) هر دو سازه ساندویچ پنل با هسته‌های مثلثی و دوزنقه یکسان می‌باشد. ضخامت ساندویچ پنل برابر مجموع ضخامت دو رویه بالا و پایین که هر کدام ۱ میلی‌متر می‌باشند به اضافه ارتفاع هسته که در هر دو سازه برابر با ۴۰ میلی‌متر است. در مجموع ضخامت ساندویچ پنل در هر دو سازه برابر با ۴۲ میلی‌متر است که این عدد در تمامی تحلیل‌های عددی ثابت است. ماده منفجره به کار گرفته شده در آزمون‌های تجربی انفجار، ۳۰ گرم از نوع C4 است که در فاصله ۱۰ سانتی‌متر از هدف قرار دارد. این ماده منفجره حالت خمیری دارد و به راحتی قابل شکل‌دهی و قالب‌گیری است. ماده‌ی منفجره به صورت کروی، شکل دهی شده است. در این پژوهش تاثیر میزان جرم ماده منفجره، تاثیر فاصله ماده منفجره تا هدف، تاثیر ضخامت ورق هسته و نیز تاثیر جنس رویه و هسته در نتایج تحلیل عددی مورد بررسی قرار گرفته است. جهت انفجار ماده منفجره از چاشنی الکتریکی استفاده شده است (شکل ۱۰). پس از ساخت ساندویچ پنل این سازه باید روی استندی که به همین منظور طراحی شده است، توسط پیچ و مهره‌هایی با استحکام بالا مقید گردد (شکل ۱۱).



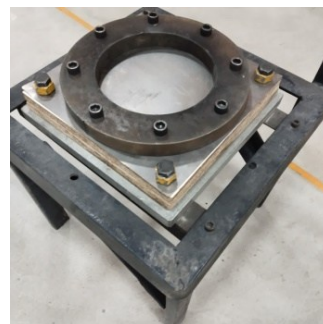
شکل ۶- قالب چوبی جهت قرار گیری هسته مشبک مثلثی



شکل ۷- هسته مثلثی قرار گرفته در قالب چوبی



شکل ۱۰- ماده منفجره و چاشنی الکتریکی



شکل ۸- ساندویچ پنل با هسته مشبک مثلثی آماده انفجار

در شکل ۹ شماتیک ساندویچ پنل نشان داده شده است.

رفتاری مناسب برای شبیه‌سازی تغییرشکل پلاستیک اجزای فلزی سازه ساندویچی تحت بارگذاری انفجاری به کار گرفته شده است. این مدل امکان در نظر گرفتن اثرات ترکیبی سخت‌شوندگی کرنشی، نرخ کرنش و نرم‌شوندگی حرارتی را فراهم می‌کند که در تحلیل پاسخ دینامیکی سازه تحت شرایط بارگذاری سریع و شدید ضروری است. پارامترهای این مدل با استفاده از داده‌های تجربی موجود برای جنس فلزات مورد بررسی تعیین شده‌اند. مدل جانسون کوک دارای ۵ ثابت A, B, n, C, m است. ثابت A معرف تنش تسلیم و B, n و ثوابت C, m بیانگر اثر سخت‌گردانی کرنشی هستند. ثابت C مربوط به نرخ کرنش و ثابت m نشان‌دهنده وابستگی دمایی است. ضرایب A, B, n از طریق آزمایش شبه استاتیکی، محاسبه می‌گردند. ضرایب C, m با استفاده از میله هاپکینسون اندازه‌گیری می‌شوند. خصوصیات مکانیکی فلزات مورد استفاده در این تحقیق به همراه ضرایب جانسون کوک آنها در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱۱- مقید کردن ساندویچ پنل بر روی استند

۳- شبیه‌سازی عددی

در این پژوهش، به‌منظور شبیه‌سازی اثر بارگذاری انفجاری بر سازه‌های ساندویچی، از روش کانوپ در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. این روش یک مدل تجربی برای اعمال بار انفجاری است که بدون نیاز به مدل‌سازی مستقیم محیط هوا، اثر امواج ضربه‌ای ناشی از انفجار را بر سازه شبیه‌سازی می‌کند. در این مدل، فشار موج انفجار به‌صورت تابعی از فاصله، میزان جرم ماده منفجره و شرایط محیطی تعیین شده و به سطح سازه اعمال می‌شود. روش کانوپ با کاهش پیچیدگی محاسباتی و افزایش کارایی، امکان تحلیل رفتار سازه در برابر بارگذاری انفجاری را فراهم می‌کند. در این تحقیق، نتایج حاصل از این شبیه‌سازی با داده‌های تجربی مقایسه شده تا دقت و صحت مدل عددی ارزیابی گردد. در نرم‌افزار مقدار فشار معادل توسط جرم معادل TNT به عنوان ورودی داده می‌شود. نرم‌افزار آباکوس تنها از خصوصیات ماده منفجره TNT استفاده می‌کند، بنابراین باید سایر مواد منفجره را با استفاده از ضرایب تبدیل TNT به تبدیل نمود. در تست‌های تجربی از ۳۰ گرم ماده منفجره C4 استفاده شده که ضریب تبدیل آن به TNT برابر 1.34 است. به عبارت دیگر در نرم‌افزار آباکوس میزان جرم TNT را باید ۴۰/۲ گرم وارد نمود [۲۴]. مشخصه‌های مکانیکی مواد نقش مهمی بر پاسخ نهایی دارند و تأثیر این پارامترها روی دقت نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی بسیار زیاد است. در این تحقیق، مدل ماده جانسون-کوک به‌عنوان یک مدل

جدول ۱- خصوصیات مکانیکی فلزات استفاده شده [۱۳]

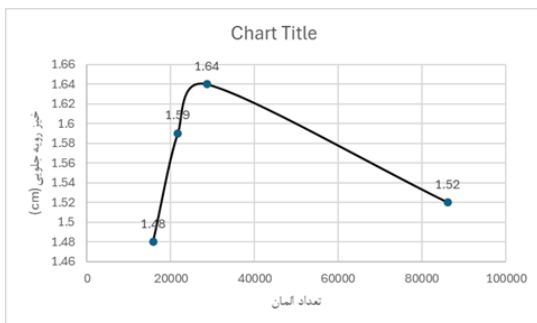
| خواص ماده | فولاد | فولاد | آلومینیوم |
|--------------------------------------|-------|-------|-----------|
| | ST12 | ST37 | 1050 |
| چگالی (kg/m^3) | ۷۸۵۰ | ۷۸۹۰ | ۲۷۰۰ |
| مدول ینگ (GPa) | ۲۰۰ | ۲۰۸ | ۷۱ |
| ضریب پواسون | ۰/۳ | ۰/۲۹ | ۰/۳۳ |
| پارامترهای تنش تسلیم (MPa) | ۳۵۰ | ۱۷۵ | ۱۱۰ |
| | ۲۷۵ | ۳۸۰ | ۱۵۰ |
| | ۰/۳۶ | ۰/۳۳ | ۰/۳۶ |
| پارامترهای سخت‌شوندگی کرنش | ۱ | ۱ | ۱ |
| | ۰/۱۲ | ۰/۰۶ | ۰/۱۴ |
| T_0 (K) | ۲۹۳ | ۲۹۳ | ۲۹۳ |
| پارامترهای دما T_{melt} (K) | ۱۸۱۱ | ۱۸۰۹ | ۹۱۸ |
| m | ۱ | ۱ | ۱ |

در ساندویچ پنل با هسته مشبک فلزی با توجه به شکل آن، هسته فقط یک صفحه تقارن دارد. لذا در شبیه‌سازی عددی بر روی نصف مدل تحلیل صورت می‌گیرد (شکل ۱۲ و شکل ۱۳). در قسمت تحلیل عددی شبیه‌سازی شرایط تست در نرم‌افزار صورت گرفته است. در این روش نیازی به مدل‌سازی صفحات صلب جلو و پشت نمی‌باشد و آن قسمت از ساندویچ پنل که در مواجهه با بار انفجاری است، مدل‌سازی می‌گردد. در این

دینامیکی سازه، از جمله انتشار موج‌های تنش و تغییرشکل‌های بزرگ را به‌درستی شبیه‌سازی کند. به طور خلاصه المان‌های روبه از نوع ۶ وجهی و از نوع C3D8R انتخاب می‌گردد. همچنین المان‌های هسته از نوع المان مربعی ۴ وجهی و از نوع S4R انتخاب می‌گردد. بررسی مستقل بودن جواب مسئله از سایز مش نیز یکی از بخش‌های اصلی تحلیل عددی است، برای این منظور سایز مش را در چند مرحله کوچک می‌کنند تا جایی که جواب یک پارامتر (به عنوان مثال جابجایی مرکز رویه جلویی) با جواب حل قبلی اختلاف ناچیزی داشته باشد، در این مرحله سایز مش مرحله ی قبلی به عنوان مش بهینه در نظر گرفته می‌شود و مابقی بررسی‌های عددی با استفاده از این سایز انجام می‌شود (شکل ۱۲ الی شکل ۱۳). با توجه به نتایج جدول ۲ ماکزیمم جابجایی رویه جلویی با سایز المان ۲ 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 مثلثی نیز بررسی شده‌است و سایز المان ۲ میلی‌متر برای این مدل مناسب است.

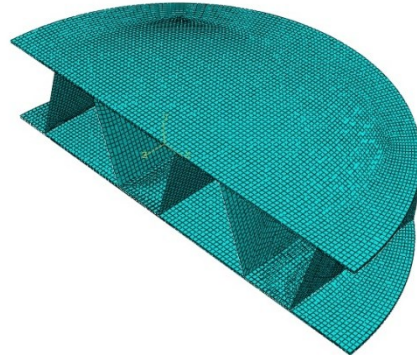
جدول ۲- بررسی همگرایی مش در ساندویچ پنل با هسته مشبک دوزنقه

| سایز مش (mm) | ۱ | ۲ | ۲/۵ | ۳/۵ |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| تعداد کل المان | ۸۶۱۴۶ | ۲۸۶۵۰ | ۲۱۶۹۰ | ۱۵۷۸۶ |
| ماکزیمم جابجایی رویه جلو (cm) | ۱/۵۲ | ۱/۶۴ | ۱/۵۹ | ۱/۴۸ |
| ماکزیمم جابجایی رویه پشتی (cm) | ۰/۵۷۸ | ۰/۵۳۹ | ۰/۵۷۰ | ۰/۵۶۲ |

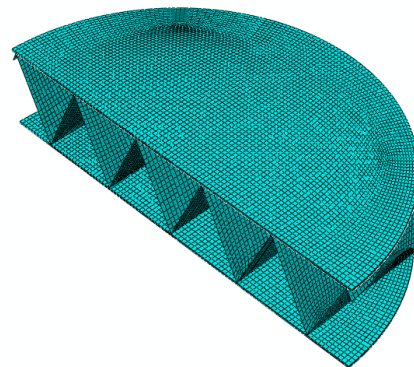


شکل ۱۴- نمودار همگرایی مش در رویه جلویی ساندویچ پنل با هسته مشبک دوزنقه

تحقیق دایره‌ای به قطر ۲۰ سانتی‌متر از ساندویچ پنل در مواجهه با بار انفجاری قرار می‌گیرد. در این روش با توجه به اینکه حجم مدل‌سازی و نیز تعداد المان‌ها و همچنین تماس بین سطوح کاهش می‌یابد، لذا زمان تحلیل کاهش می‌یابد.



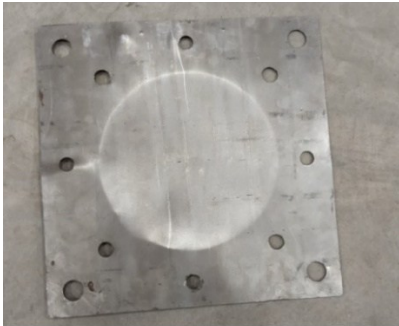
شکل ۱۲- مدل عددی ساندویچ پنل با هسته مشبک دوزنقه



شکل ۱۳- مدل عددی ساندویچ پنل با هسته مشبک مثلثی

در تست تجربی، ساندویچ پنل به صفحات صلب بسته شده و در هیچ جهتی جابجایی ندارد، لذا شرایط مرزی آن در همه جهات کاملاً گیردار در نظر گرفته شده است. روی صفحه تقارن نیز شرایط مرزی سیمتریک اعمال می‌گردد. به منظور شبیه‌سازی تماس بین بخش‌های مدل عددی، از یک اندرکنش تماس عمومی بدون ضریب اصطکاک در نرم‌افزار استفاده شده است.

در تحلیل عددی سازه‌های ساندویچی تحت بارگذاری انفجاری، مش‌بندی مناسب نقش اساسی در دقت نتایج دارد. انتخاب نوع و اندازه مش باید به گونه‌ای باشد که بتواند رفتار



شکل ۱۶- رویه پشتی در تست تجربی انفجار با هسته دوزنقه



شکل ۱۷- هسته مشبک دوزنقه در تست تجربی انفجار

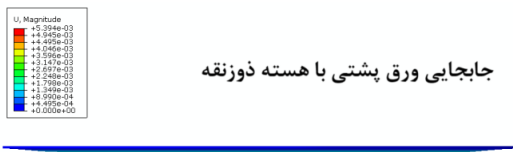


جابجایی ورق جلویی با هسته دوزنقه

mesh size 2mm

ODB: zozmodel-mass40p-meshsize002-dst10.odb Abaqus/Explicit 6.14-2 Wed Nov 20 18:33:25 Iran Standard Time 2024
Step: Step-1
Increment: 587697; Step Time = 5.0000E-03
Primary Var: U, Magnitude
Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: +1.000e+00

شکل ۱۸- جابجایی رویه جلویی در تحلیل عددی انفجار با هسته مشبک دوزنقه



جابجایی ورق پشتی با هسته دوزنقه

mesh size 2mm

ODB: zozmodel-mass40p-meshsize002-dst10.odb Abaqus/Explicit 6.14-2 Wed Nov 20 18:33:25 Iran Standard Time 2024
Step: Step-1
Increment: 587697; Step Time = 5.0000E-03
Primary Var: U, Magnitude
Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: +1.000e+00

شکل ۱۹- جابجایی رویه پشتی در تحلیل عددی انفجار با هسته مشبک دوزنقه

همانطور که در نتایج جدول ۲ و نمودار شکل ۱۴ ملاحظه می‌گردد، جابجایی رویه جلویی سازه ساندویچی در میزان جابجایی ۱/۶۴ سانتی‌متر به حداکثر مقدار خود می‌رسد و سپس کاهش می‌یابد و درصد اختلاف نتایج با تعداد المان سائز ۲ و ۲/۵ میلی‌متر به حداقل مقدار خود می‌رسد، لذا سائز المان ۲ میلی‌متر برای تحلیل عددی مناسب است.

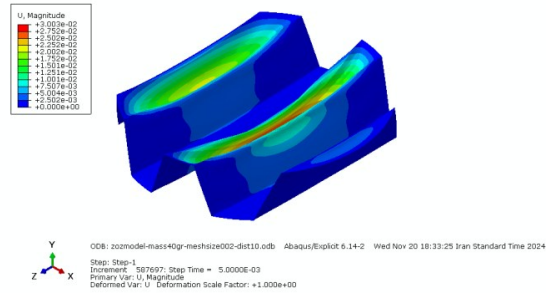
۴- نتایج تجربی و عددی

در این بخش نتایج تست تجربی و تحلیل عددی ساندویچ پنل تحت بار انفجاری ارائه می‌گردد و پس از صحت‌گذاری نتایج تحلیل عددی با نتایج تست تجربی، پارامترهای مختلفی از قبیل تاثیر میزان تغییر جرم ماده منفجره، تاثیر تغییر جنس رویه‌ها و هسته، تاثیر فاصله ماده منفجره تا هدف، تاثیر ضخامت هسته مشبک در نتایج بارگذاری انفجاری بر روی ساندویچ پنل بررسی می‌گردد. نتایج بدست آمده از تست تجربی انفجار روی رویه جلویی، رویه پشتی و هسته مشبک دوزنقه‌ای در اشکال ۱۵ الی ۱۷ نشان داده شده‌است؛ همچنین نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی در نرم افزار در شکل‌های ۱۸ الی ۲۰ ارائه شده‌است. همان‌طور که در نتایج تست تجربی و تحلیل عددی مشاهده می‌گردد، هسته میانی مشبک دوزنقه استفاده شده هسته‌ای مناسب در بارگذاری انفجاری است؛ زیرا میزان جابجایی رویه پشتی کمتر از رویه جلویی بوده و نیز هسته وارد فاز پلاستیک شده است. در تحلیل عددی بیشترین جابجایی رویه جلویی ۱/۶۴ سانتی‌متر و رویه عقبی ۰/۵۳۹ سانتی‌متر و همچنین بیشترین جابجایی هسته نیز برابر با ۳ سانتی‌متر است. در تست تجربی بیشترین جابجایی رویه جلویی ۱/۸ سانتی‌متر و رویه عقبی ۰/۷ سانتی‌متر است.

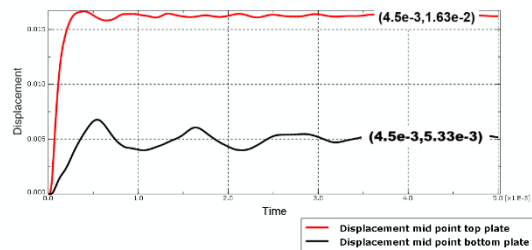


شکل ۱۵- رویه جلویی در تست تجربی انفجار با هسته دوزنقه

شبیه‌سازی عددی در شکل‌های ۲۶ الی ۲۸ ارائه شده است. بر اساس نتایج تست تجربی و تحلیل عددی، هسته مشبک مثلثی نیز هسته‌ای مناسب در بارگذاری انفجاری است؛ زیرا میزان جابجایی رویه پشتی کمتر از رویه جلویی بوده و نیز هسته وارد فاز پلاستیک شده‌است. در تحلیل عددی بیشترین جابجایی رویه جلویی ۱/۲۷ سانتی‌متر و رویه عقبی ۰/۶۹۹ سانتی‌متر و همچنین بیشترین جابجایی هسته نیز برابر با ۱/۲۳ سانتی‌متر است. در تست تجربی بیشترین جابجایی رویه جلویی ۱/۷ سانتی‌متر و رویه عقبی ۰/۸ سانتی‌متر است.



شکل ۲۰- جابجایی هسته دوزنقه در تحلیل عددی انفجار



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



شکل ۲۳- رویه جلویی در تست تجربی انفجار با هسته مثلثی

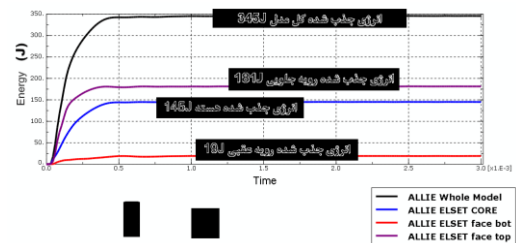


شکل ۲۴- رویه پشتی در تست تجربی انفجار با هسته مثلثی



شکل ۲۵- هسته مشبک مثلثی در تست تجربی انفجار

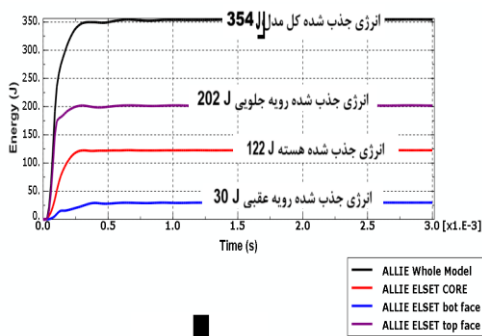
همانطور که در شکل ۲۱ مشاهده می‌شود، جابجایی رویه جلویی زودتر از رویه پشتی آغاز شده‌است و جابجایی رویه پشتی کمتر از رویه جلویی است. تحلیل در ۵ میلی‌ثانیه انجام شده‌است. میزان جذب انرژی اجزای ساندویچ پنل در نرم افزار بررسی شده‌است. بر اساس نتایج شکل ۲۲ میزان جذب انرژی ساندویچ پنل با هسته مشبک دوزنقه ۳۴۵ ژول است که از این میزان ۱۸۱ ژول توسط رویه جلویی، ۱۴۵ ژول توسط هسته و نیز ۱۹ ژول توسط رویه پشتی جذب می‌گردد.



شکل ۲۲- نمودار میزان انرژی جذب شده اجزای ساندویچ پنل با هسته مشبک دوزنقه

به طور مشابه نتایج بدست آمده از تست تجربی برای هسته مشبک مثلثی در شکل‌های ۲۳ الی ۲۵ و نتایج حاصل از

همانطور که در شکل ۲۹ مشاهده می‌شود، جابجایی رویه جلویی زودتر از رویه پشتی آغاز شده‌است و جابجایی رویه پشتی کمتر از رویه جلویی است. تحلیل در 5ms انجام شده است. میزان جذب انرژی اجزای ساندویچ پنل با هسته مشبک مثلی در نمودار شکل ۳۰ ارائه شده‌است. بر اساس نتایج میزان جذب انرژی ساندویچ پنل با هسته مشبک مثلی ۳۵۴ ژول می‌باشد، که از این میزان ۲۰۲ ژول توسط رویه بالایی، ۱۲۲ ژول توسط هسته و نیز ۳۰ ژول توسط رویه پایینی جذب می‌گردد.

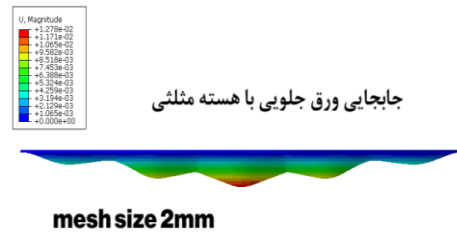


شکل ۳۰- نمودار میزان انرژی جذب شده اجزای ساندویچ پنل با هسته مشبک مثلی

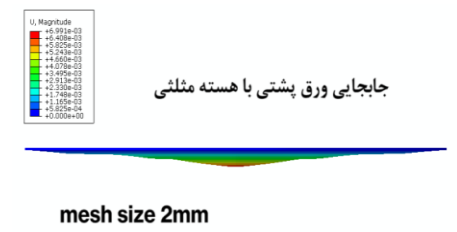
برای ارزیابی سازه ساندویچی در جدول ۳ میزان خیز سازه ساندویچی (رویه بالایی، هسته و رویه پایینی) با هسته مشبک دوزنقه و هسته مشبک مثلی نشان داده شده‌است. نتایج ناشی از بارگذاری انفجاری با ۳۰ گرم ماده منفجره C4 ارائه می‌گردد که در فاصله ۱۰ سانتی‌متر از هدف قرار دارد. در جدول ۴ میزان جذب انرژی سازه ساندویچی (رویه بالایی، هسته و رویه پایینی) نشان داده شده‌است.

جدول ۳- مقایسه نتایج خیز در دو هسته

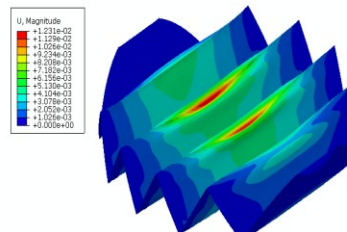
| میزان خیز (cm) | سازه با هسته مشبک دوزنقه | سازه با هسته مشبک مثلی |
|----------------|--------------------------|------------------------|
| رویه جلویی | ۱/۶۴ | ۱/۲۷ |
| هسته | ۳ | ۱/۲۳ |
| رویه پشتی | ۰/۵۳۹ | ۰/۶۹۹ |



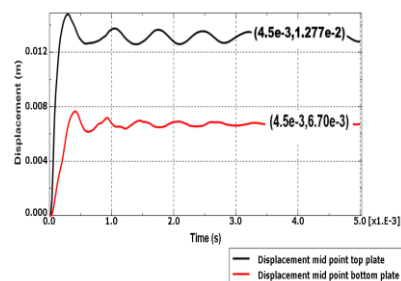
شکل ۲۶- جابجایی رویه جلویی در تحلیل عددی انفجار با هسته مشبک مثلی



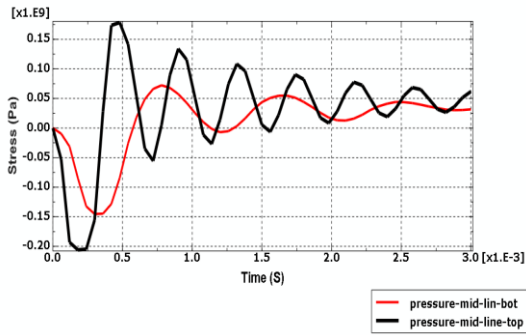
شکل ۲۷- جابجایی رویه پشتی در تحلیل عددی انفجار با هسته مشبک مثلی



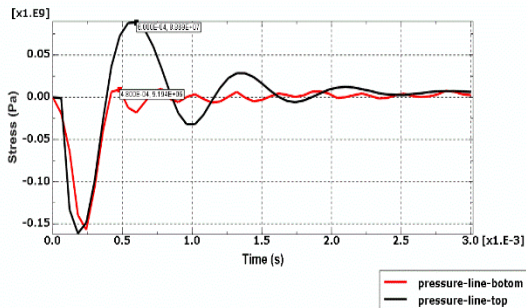
شکل ۲۸- جابجایی هسته مثلی در تحلیل عددی انفجار



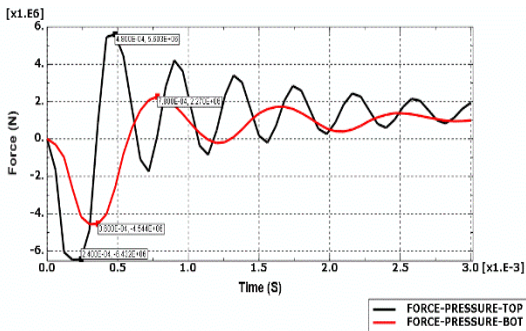
شکل ۲۹- نمودار جابجایی گره مرکزی رویه جلویی و پشتی در ساندویچ پنل با هسته مشبک مثلی



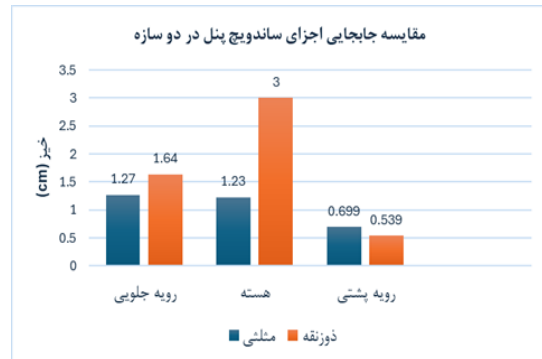
شکل ۳۲- نمودار تنش متوسط فشاری رویه جلویی و پشتی در ساندویچ پنل با هسته مشبک دوزنقه



شکل ۳۳- نمودار تنش متوسط فشاری رویه جلویی و پشتی در ساندویچ پنل با هسته مشبک مثلثی



شکل ۳۴- نمودار نیروی متوسط لهیدگی رویه جلویی و پشتی در ساندویچ پنل با هسته مشبک دوزنقه



شکل ۳۱- مقایسه جابجایی اجزای ساندویچ پنل در دو سازه

جدول ۴- مقایسه نتایج جذب انرژی در دو هسته

| میزان جذب انرژی (J) | سازه با هسته مشبک مثلثی | سازه با هسته مشبک دوزنقه |
|---------------------|-------------------------|--------------------------|
| رویه جلویی | ۲۰۲ | ۱۸۱ |
| هسته | ۱۲۲ | ۱۴۵ |
| رویه پشتی | ۳۰ | ۱۹ |
| کل سازه | ۳۵۴ | ۳۴۵ |

از جدول ۳ و شکل ۳۱ این نتیجه حاصل می‌شود که میزان خیز رویه پشتی در بارگذاری انفجاری در سازه با هسته مشبک دوزنقه کمتر از سازه با هسته مشبک مثلثی است؛ زیرا همانطور که در نتایج جدول ۴ مشاهده می‌گردد، میزان جذب انرژی هسته مشبک مثلثی کمتر از هسته مشبک دوزنقه است؛ لذا با توجه به هدف پژوهش که طراحی سازه‌ای که در برابر بار انفجاری مقاوم‌تر باشد، پس ساندویچ پنل با هسته مشبک دوزنقه بهتر از ساندویچ پنل با هسته مشبک مثلثی است.

برای استخراج نیروی لهیدگی حاصل از انفجار روی رویه‌های جلویی و پشتی ابتدا باید تنش فشاری متوسط را ناشی از ماده منفجره به دست آورد که در فاصله مشخص از هدف قرار دارد. سپس نمودار تنش فشاری را در مساحت سطح مواجهه ضرب نمود تا نیروی لهیدگی ناشی از انفجار در طول زمان محاسبه گردد. با توجه به اینکه سطح مواجهه در این تحقیق دایره‌ای به شعاع ۱۰ سانتی‌متر است، لذا مساحت سطح مواجهه برابر با 0.314 متر مربع است.

در ادامه نمودارهای مربوط به تنش متوسط فشاری و همچنین نمودار نیروی لهیدگی برای دو سازه ارائه می‌گردد.

جدول ۶- میزان تاثیر تغییر خرج انفجاری در نتایج ساندویچ

| پنل با هسته مشبک مثلثی | | | |
|------------------------|-------|-------|---|
| ۸۰ | ۶۰ | ۴۰ | جرم ماده منفجره (گرم) TNT |
| ۲/۸۰ | ۲/۱۲ | ۱/۲۷ | حداکثر خیز رویه جلویی (cm) |
| ۰/۹۶۱ | ۰/۸۸۳ | ۰/۶۹۹ | حداکثر خیز رویه پشتی (cm) |
| ٪۳۷ | ٪۲۶ | | میزان افزایش خیز رویه پشتی نسبت به حالت اولیه |

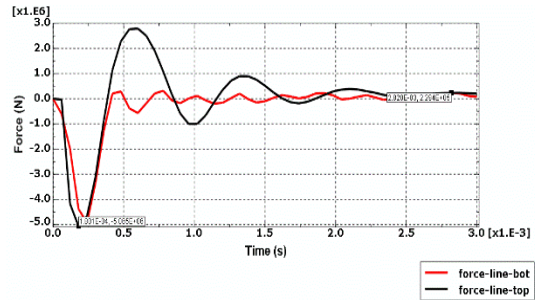
تاثیر فاصله خرج انفجاری از هدف در جدول‌های ۷ و ۸ ارائه شده است. برای این منظور فاصله‌های ۱۵ سانتی‌متر و ۲۰ سانتی‌متر مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به جدول ۷ و ۸ این نتیجه حاصل می‌گردد که با افزایش فاصله ماده منفجره تا هدف میزان تغییرات خیز رویه جلویی و پشتی به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد؛ همچنین هر چقدر این فاصله بیشتر باشد، میزان درصد کاهش خیز رویه‌ها بیشتر خواهد شد.

جدول ۷- تاثیر فاصله ماده منفجره تا هدف در نتایج

| ساندویچ پنل با هسته مشبک دوزنقه | | | | |
|---------------------------------|-------|-------|-------|--|
| ۲۰ | ۲۰ | ۱۵ | ۱۰ | فاصله تا هدف (cm) |
| ۸۰ | ۴۰ | ۴۰ | ۴۰ | جرم ماده منفجره (TNT) (gr) |
| ۱/۳۱ | ۰/۴۵۸ | ۱/۰۶ | ۱/۶۴ | حداکثر خیز رویه جلویی (cm) |
| ۰/۵۹۶ | ۰/۲۱۲ | ۰/۳۲۲ | ۰/۵۳۹ | حداکثر خیز رویه پشتی (cm) |
| ٪۱۰ | -٪۶۰ | -٪۴۰ | | میزان تغییرات خیز رویه پشتی نسبت به حالت اولیه |

جدول ۸- تاثیر فاصله ماده منفجره تا هدف در نتایج

| ساندویچ پنل با هسته مشبک مثلثی | | | | |
|--------------------------------|-------|-------|-------|---|
| ۲۰ | ۲۰ | ۱۵ | ۱۰ | فاصله تا هدف (cm) |
| ۸۰ | ۴۰ | ۴۰ | ۴۰ | جرم ماده منفجره (گرم) TNT |
| ۰/۶۰۱ | ۰/۲۰۶ | ۰/۳۷۵ | ۱/۲۷ | حداکثر خیز رویه جلویی (cm) |
| ۰/۶۱۷ | ۰/۲۴۳ | ۰/۴۵۸ | ۰/۶۹۹ | حداکثر خیز رویه پشتی (cm) |
| -٪۱۱ | -٪۶۵ | -٪۳۴ | | میزان درصد تغییرات خیز رویه پشتی نسبت به حالت اولیه |



شکل ۳۵- نمودار نیروی متوسط لهیدگی رویه جلویی و پشتی در ساندویچ پنل با هسته مشبک مثلثی

نمودار شکل ۳۲ و ۳۳ که تنش متوسط فشاری در سازه‌ها را نشان می‌دهد به درستی به دست آمده است زیرا منحنی قرمز رنگ مربوط به رویه پشتی است که نشان می‌دهد موج با تاخیر به رویه پایینی رسیده است و همچنین میزان حداکثر تنش فشاری در رویه‌هایی پشتی کمتر از رویه‌های جلویی در هر دو سازه است. نمودار نیروی متوسط لهیدگی نیز از روی نمودار تنش فشاری به دست آمده است.

حال تاثیر میزان جرم ماده منفجره در نتایج تحلیل عددی بررسی می‌شود. در ابتدا میزان جرم خرج انفجاری ۱/۵ برابر می‌گردد و سپس میزان جرم خرج انفجاری ۲ برابر می‌گردد. نتایج حاصل برای ساندویچ پنل با هسته مشبک دوزنقه در جدول ۵ ارائه می‌گردد. همچنین تاثیر جرم ماده منفجره در میزان جابجایی رویه‌ها در ساندویچ پنل با هسته مشبک مثلثی در جدول ۶ ارائه می‌گردد. مطابق جداول ۵ و ۶ با افزایش میزان جرم ماده منفجره میزان خیز رویه پشتی افزایش می‌یابد.

جدول ۵- میزان تاثیر تغییر خرج انفجاری در نتایج

| ساندویچ پنل با هسته مشبک دوزنقه | | | |
|---------------------------------|-------|-------|---|
| ۸۰ | ۶۰ | ۴۰ | |
| ۳/۲۵ | ۲/۵۱ | ۱/۶۴ | حداکثر خیز رویه جلویی (cm) |
| ۰/۷۱۱ | ۰/۶۶۲ | ۰/۵۳۹ | حداکثر خیز رویه پشتی (cm) |
| ٪۳۲ | ٪۲۳ | | میزان افزایش خیز رویه پشتی نسبت به حالت اولیه |

تاثیر تغییر جنس رویه و هسته فلزی در میزان خیز رویه‌ها برای ساندویچ پنل با هسته مثلثی، در جدول ۱۰ ارائه شده است. با توجه به نتایج حاصله، تغییر جنس هسته از فولاد ST12 به AL1050 باعث کاهش ۴۰ درصدی جابجایی رویه پستی می‌گردد؛ همچنین با تغییر جنس رویه‌ها از فولاد به آلومینیوم تاثیر نامطلوبی در میزان جابجایی رویه جلویی و پستی دارد، به طوریکه با این تغییر میزان جابجایی رویه پستی حدوداً ۶۲ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با تغییر جنس کل ساندویچ پنل از فولاد به آلومینیوم تاثیر بسیار نامطلوبی در میزان جابجایی رویه پستی دارد، به طوریکه با این تغییر میزان جابجایی رویه پستی حدوداً ۱۱۰ درصد افزایش می‌یابد.

جدول ۱۱ تاثیر تغییر ضخامت رویه هسته مشبک دوزنقه‌ای را بر میزان خیز رویه نشان می‌دهد. تحلیل عددی با ضخامت‌های هسته ۰/۳ میلی‌متر، ۰/۷ میلی‌متر و ۱ میلی‌متر انجام شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که با کاهش ۴۰ درصدی ضخامت هسته دوزنقه میزان خیز رویه جلویی ۲۸ درصد افزایش یافته و در عین حال میزان خیز رویه پستی به میزان ۶۳ درصد کاهش می‌یابد؛ همچنین با افزایش ۴۰ درصدی ضخامت هسته میزان خیز رویه جلویی ۲ درصد و خیز رویه پستی به میزان ۱۱ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش ۱۰۰ درصدی ضخامت هسته میزان خیز رویه جلویی و پستی ۱۲ درصد کاهش می‌یابد.

جدول ۱۱- تاثیر ضخامت ورق هسته در نتایج ساندویچ پنل با هسته مشبک دوزنقه

| ضخامت ورق هسته (mm) | ۰/۳ | ۰/۵ | ۰/۷ | ۱ |
|--|-------|-------|-------|-------|
| حداکثر خیز رویه جلویی (cm) | ۲/۱۱ | ۱/۶۶ | ۱/۶۴ | ۱/۴۵ |
| حداکثر خیز رویه پستی (cm) | ۰/۱۹۵ | ۰/۵۳۹ | ۰/۵۹۷ | ۰/۴۷۵ |
| میزان درصد تغییرات خیز رویه جلویی نسبت به حالت اولیه | ٪۲۸ | ٪۲ | ٪۱۲ | -٪۱۲ |
| میزان درصد تغییرات خیز رویه پستی نسبت به حالت اولیه | ٪۶۳ | ٪۱۱ | ٪۱۲ | -٪۱۲ |
| میزان درصد تغییرات ضخامت هسته نسبت به حالت اولیه | ٪۴۰ | ٪۴۰ | ٪۱۰۰ | ٪۱۰۰ |

جدول ۹- تاثیر تغییر جنس رویه‌ها و هسته در نتایج

| ساندویچ پنل با هسته مشبک دوزنقه | | | | |
|--|-------|------|--------|--------|
| جنس رویه‌ها | ST12 | ST12 | AL1050 | AL1050 |
| حداکثر خیز رویه جلویی (cm) | ۱/۶۴ | ۲/۳ | ۴/۴۲ | ۴/۷۶ |
| حداکثر خیز رویه پستی (cm) | ۰/۵۳۹ | ۰/۱۷ | ۰/۸۴۴ | ۱/۸۴ |
| میزان تغییرات خیز رویه پستی نسبت به حالت اولیه | -٪۶۸ | ٪۵۷ | ٪۲۴۱ | ٪۲۴۱ |

تاثیر تغییر جنس رویه و هسته فلزی در میزان خیز رویه‌ها در جدول ۹ برای ساندویچ پنل با هسته دوزنقه ای ارائه شده است. با توجه نتایج، تغییر جنس هسته از فولاد ST12 به AL1050 باعث کاهش ۶۸ درصدی جابجایی رویه پستی می‌گردد. این به خاطر تغییر شکل پلاستیک کمتر هسته فولادی نسبت به هسته آلومینیومی شده است، همچنین با تغییر جنس رویه‌ها از فولاد به آلومینیوم تاثیر نامطلوبی در میزان جابجایی رویه جلویی و پستی دارد، به طوریکه با این تغییر میزان جابجایی رویه پستی حدوداً ۵۷ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با تغییر جنس کل ساندویچ پنل از فولاد به آلومینیوم تاثیر بسیار نامطلوبی در میزان جابجایی رویه پستی دارد به طوریکه با این تغییر میزان جابجایی رویه پستی حدوداً ۲۴۱ درصد افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه ضریب الاستیسیته آلومینیوم بسیار پایین‌تر از فولاد است، فلز نرم‌تری نسبت به فولاد است، این مساله توجیه می‌گردد.

جدول ۱۰- تاثیر تغییر جنس رویه‌ها و هسته در نتایج

| ساندویچ پنل با هسته مشبک مثلثی | | | | |
|--|-------|-------|--------|--------|
| جنس رویه‌ها | ST12 | ST12 | AL1050 | AL1050 |
| حداکثر خیز رویه جلویی (cm) | ۱/۲۷ | ۱/۹۸ | ۳/۳۹ | ۴/۳۸ |
| حداکثر خیز رویه پستی (cm) | ۰/۶۹۹ | ۰/۴۸۳ | ۱/۱۳ | ۱/۴۷ |
| میزان تغییرات خیز رویه پستی نسبت به حالت اولیه | -٪۴۰ | ٪۶۲ | ٪۱۱۰ | ٪۱۱۰ |

جدول ۱۲- تاثیر ضخامت ورق هسته در نتایج ساندویچ پنل

| با هسته مشبک مثلثی | | | |
|--------------------|-------|-------|-------|
| ۱ | ۰/۷ | ۰/۵ | ۰/۳ |
| ۰/۷۱۹ | ۰/۸۸۶ | ۱/۲۷ | ۱/۸۴ |
| ۰/۶۴۴ | ۰/۸۱۴ | ۰/۶۹۹ | ۰/۵۲۰ |
| -۰/۴۳ | -۰/۳۰ | | ۰/۴۵ |
| -۰/۸ | ۰/۱۶ | | -۰/۲۵ |
| | | | -۰/۴۰ |

جدول ۱۲ تاثیر ضخامت هسته در نتایج ساندویچ پنل با هسته مشبک مثلثی را نشان می‌دهد. با بررسی نتایج مشاهده می‌شود که با کاهش ۴۰ درصدی ضخامت هسته مثلثی میزان خیز رویه جلویی ۴۵ درصد افزایش یافته و در عین حال میزان خیز رویه پشتی به میزان ۲۵ درصد کاهش می‌یابد؛ همچنین با افزایش ۴۰ درصدی ضخامت هسته میزان خیز رویه جلویی ۳۰ درصد کاهش و خیز رویه پشتی به میزان ۱۶ درصد افزایش می‌یابد؛ همچنین با افزایش ۱۰۰ درصدی ضخامت هسته میزان خیز رویه جلویی ۴۳ درصد و خیز رویه پشتی ۸ درصد کاهش می‌یابد.

با توجه به نتایج جدول ۱۱ و ۱۲ این نتیجه حاصل می‌گردد که با افزایش ضخامت هسته از ۰/۳ میلی‌متر به ۱ میلی‌متر حداکثر خیز رویه جلویی به طور پیوسته کاهش می‌یابد. این به این دلیل است که در این سازه‌ها با افزایش ضخامت هسته از ۰/۳ میلی‌متر به ۱ میزان صلبیت هسته به طور پیوسته افزایش می‌یابد که این امر باعث کاهش خیز رویه جلویی می‌گردد. همچنین با توجه نتایج جدول ۱۲ و ۱۳ می‌توان به این نتیجه رسید که کمترین خیز رویه پشتی در سازه با ضخامت هسته ۰/۳ میلی‌متر اتفاق می‌افتد. این ساندویچ پنل، یعنی سازه با ضخامت هسته ۰/۳ میلی‌متر می‌تواند بهینه‌ترین سازه از نظر حداکثر خیز رویه پشتی باشد. چون با افزایش حدود ۲۳۳ درصدی وزن هسته (ضخامت از ۰/۳ میلی‌متر به ۱ میلی‌متر) کمترین جابجایی رویه پشتی در این هسته اتفاق می‌افتد.

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق، تاثیر انفجار بر روی رفتار خیز ساندویچ پنل با دو نوع هسته مشبک دوزنقه‌ای و مثلثی در حالت تجربی و شبیه سازی عددی بررسی گردید. مقایسه نتایج تحلیل عددی با نتیجه تست تجربی تطابق خوبی را نشان می‌دهد. نتایج آزمایش تجربی نشان داد که هسته‌های مشبک فلزی در بارگذاری انفجاری مناسب می‌باشند؛ زیرا جابجایی رویه پشتی ساندویچ پنل کمتر از رویه جلویی است و هسته‌ها خاصیت جذب انرژی خوبی دارند. نتایج بدست آمده از آنالیز رویه در حالت های مختلف را می‌توان به صورت زیر بیان نمود.

۱- در تمامی تحلیل‌ها با تمامی هسته‌ها با افزایش میزان خرج ماده منفجره خیز رویه پشتی افزایش می‌یابد.
 ۲- در تمامی تحلیل‌ها با تمامی هسته‌ها با افزایش فاصله ماده منفجره تا هدف، خیز رویه پشتی به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

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

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

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

۶- میزان جذب انرژی هسته دوزنقه بیشتر از هسته مثلثی می‌باشد.

۷- از آنجایی که میزان جابجایی رویه پشتی بسیار مهم است، لذا هسته مشبک دوزنقه از هسته مثلثی بهتر است.

۶- مراجع

- [1] Teeling-Smith R, Nurick G. The deformation and tearing of thin circular plates subjected to impulsive loads. *Int. J. Impact Engineering*. 1991;11(1):77-91.
- [2] Nurick G, Gelman M, Marshall N. Tearing of blast loaded plates with clamped boundary conditions. *Int. J. impact engineering*. 1996;18(7-8):803-27.
- [3] Yuen SCK, Nurick G. The significance of the thickness of a plate when subjected to localised blast loads. *Blast Impact Load Struct*. 2000:471-99.

- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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. *J. of Solid and Fluid Mechanics*. 2022;12(4):27-40
- [18] Sayah Badkhor M, Mirzababaie Mostofi T, Babaei H. Investigation of the influence of standoff distance of explosive charge on the response of circular metallic plates. *J. Solid and Fluid Mechanics*. 2021;11(2):175-91.
- [19] Ghamarizadeh M, Khodarahmi H, Mirzababaie Mostofi T. Dynamic response of sandwich circular blast shield with tubular cores under free blast load. *J. Solid and Fluid Mechanics*. 2021;11(4):71-83.
- [20] Ghamarizadeh M, Khodarahmi H, Mirzababaie MT. Presenting an analytical model based on the energy method to study the plastic deformation of circular plates under uniformly repeated blast loading. *J. Solid and Fluid Mechanics*. 2022.
- [21] Yousefi A, Kia F, Mahdavi SA. Simulation and Optimizations of Truck's Cabin Structure Exposed to Explosion. *J. Solid and Fluid Mechanics*. 2022;12(5):109-22.
- [22] Kaffash Mirzarahimi M, Khodarahmi H, Ghamarizadeh M, Zia Shamami M, Hosseini R. Experimental investigation of the mechanical behavior of the core composed of polyurethane foam and scoria mineral pumice for use in explosive energy absorbent sandwich panels. *J. Solid and Fluid Mechanics*. 2024;14(3):95-106.
- [23] Solooki M. Numerical modeling of sandwich panel with different layers and core gradient under explosive impact. *J. Solid and Fluid Mechanics*. 2024;11(2):116-101.
- [24] Draganić H, Sigmund V. Blast loading on structures. *Tehnički vjesnik*. 2012;19(3):643-52
- [4] Balden VH, Nurick GN. Numerical simulation of the post-failure motion of steel plates subjected to blast loading. *Int J Impact Eng* 2005;32:14-34.
- [5] Jacob N, Nurick GN, Langdon GS. The effect of stand-off distance on the failure of fully clamped circular mild steel plates subjected to blast loads. *Engineering Structures*. 2007 Oct 31;29(10):2723-36.
- [6] Ahmad MS. Study of dynamic behaviour of multi-layered structures subjected to blast loading (Doctoral dissertation, University of Cape Town).
- [7] Spranghers K, Vasilakos I, Lecompte D, Sol H, Vantomme J. Numerical simulation and experimental validation of the dynamic response of aluminum plates under free air explosions. *Int. J. Impact Engineering*. 2013 Apr 1;54:83-95.
- [8] Aune V, Valsamos G, Casadei F, Larcher M, Langseth M, Børvik T. Numerical study on the structural response of blast-loaded thin aluminium and steel plates. *Int. J. Impact Engineering*. 2017 Jan 1;99:131-44.
- [9] Remennikov A, Ngo T, Mohotti D, Uy B, Netherton M. Experimental investigation and simplified modeling of response of steel plates subjected to close-in blast loading from spherical liquid explosive charges. *Int. J. Impact Engineering*. 2017 Mar 1;101:78-89.
- [10] Zheng C, Kong XS, Wu WG, Xu SX, Guan ZW. Experimental and numerical studies on the dynamic response of steel plates subjected to confined blast loading. *Int. J. Impact Engineering*. 2018 Mar 31;113:144-60.
- [11] Sabzevari S, Shahabian F. Optimum Selection of Corrugated Sandwich Panels Shape and Materials Subjected to Blast Loading. *Persian, J. Structural and Construction Engineering*. 2018;5(2):39-52.
- [12] 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. *J. of Solid and Fluid Mechanics*. 2018; 8 106.
- [13] Ziya-Shamami M, Babaei H, Mostofi TM, Khodarahmi H. Plastic deformation of similar and dissimilar multi-layered metallic plates with the same areal density subjected to repeated impulsive loading. *Aerospace Mechanics*. 18 (1), 137-159.
- [14] Nasiri S, Sadegh-Yazdi M, Mirzababaie Mostofi T, Mousavi SM, Ziya SM. Optimization of effective parameters in free iron sheet forming process by underwater explosion method. *Aerospace Mechanics*. 2022.