

«علمی - پژوهش»

## بررسی عددی تأثیر هندسه بر میزان جذب انرژی پانل‌های ساندویچی تحت بارگذاری انفجاری

صفا پیمان<sup>۱\*</sup>، علی ابراهیمزاده<sup>۲</sup>

۱- استادیار، ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۷/۱۲/۱۹، پذیرش: ۹۸/۱۲/۲۳)

### چکیده

در سال‌های اخیر با پیشرفت فناوری‌های نوین در حوزه سازه، توجه زیادی به المان‌هایی مانند پانل‌های ساندویچی شده است. این نوع از المان‌ها در عین حال که وزن کمی دارند دارای مقاومت بالایی نیز هستند. اجزای ساندویچی از پرکاربردترین المان‌ها برای مقابله با فشار ناشی از موج انفجار هستند. هسته پانل‌های ساندویچی مهم‌ترین نقش را در جذب و استهلاک انرژی، بر عهده دارد. شکل هندسی هسته می‌تواند در میزان جذب انرژی نقش تعیین‌کننده‌ای داشته باشد. بر این اساس، در این مقاله، اثر شکل هندسی هسته پانل ساندویچی فولادی، بر رفتار و میزان جذب انرژی آن در برابر موج انفجار با روش عددی بررسی شده است. حل عددی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام می‌شود. اعتبارسنجی پاسخ‌های به دست آمده از حل عددی، با داده‌های تجربی مقالات معتبر انجام شده است. در ادامه، پانل‌های ساندویچی با چهار نوع هسته مختلف متداول و دارای قابلیت ساخت آسان، تحت اثر فشارهای متفاوت موج انفجار مدل شدند و اثر هندسه هسته بر میزان جابجایی و جذب انرژی، مورد بررسی قرار گرفت. دو معیار مهم در طراحی این نوع پانل‌های ساندویچی بیشینه کردن میزان جذب انرژی و کمینه کردن مقدار بیشینه جابجایی است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، در فشارهای پایین مدل ۴ با هسته دارای شبکه افقی چهارضلعی، بیشترین میزان جذب انرژی و کمترین جابجایی را دارد. با این وجود، در فشارهای بالا مدل ۲ با هسته دارای شبکه عمودی شش ضلعی دارای کمترین میزان جابجایی و مدل ۱ با شبکه عمودی شش ضلعی دارای بیشینه میزان جذب انرژی است. به عبارت دیگر وابسته به میزان فشار انفجار، پانل ساندویچی با هندسه خاصی می‌تواند بهترین عملکرد را داشته باشد.

**کلیدواژه‌ها:** پانل ساندویچی، تحلیل عددی، موج انفجار، جذب انرژی

## Numerical Investigation of the Effect of Geometry on the Energy Absorption Rate of Sandwich Panels under Blast Loading

S. Peyman\*, A. Ebrahimzade

Imam Hossein University

(Received: 10/03/2019; Accepted: 13/03/2020)

### Abstract

In the recent years, advent of new technologies in the field of Structural Engineering, elements such as Sandwich Panels has attracted more attention, which are lightweight and highly resistant. Sandwich components are the most widely used elements to resist against the pressure of explosion wave. The core of the sandwich panels does the most important role in absorbing and dissipating the energy of the explosion. And geometric shape of the core can have a decisive role in the amount of energy absorption. Accordingly, in this paper, the effect of geometric shape of the core of the steel sandwich panel on its behavior and amount of energy absorption against the explosion wave is analyzed by numerical methods. Abaqus finite element software is used for simulation and analyzing. Validation of the responses obtained from numerical solution was performed with experimental data of valid papers. In the following, sandwich panels with four different types of regular and easily fabricated cores, were modeled under different pressures of explosive wave. And the effect of core geometry on the amount of energy absorption and displacement was investigated. Two important criteria in designing these types of sandwich panels are maximizing energy absorption and minimizing maximum displacement. The results show that at low pressures Model 4 with a quadrilateral horizontal core has the maximum energy absorption and minimum displacement value. However, at high pressures Model 2 with a hexagonal vertical core has the minimum displacement and Model 1 with a quadrilateral vertical has the maximum energy absorption. In other words related to the explosion pressure, a sandwich panel with the special geometry can have the best performance.

**Keywords:** Sandwich Panel, Numerical Analysis, Explosion Wave, Energy Absorption

## ۱. مقدمه

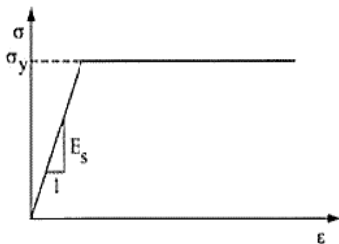
تعیین عملکرد و مودهای شکست سازه‌های ساندویچی که تحت اثر موج انفجار واقع شده بود، صورت گرفت. عملکرد سازه‌های ساندویچی نسبت به صفحه فلزی معادل مورد ارزیابی قرار گرفت. این مطالعه پیشنهاد کرد که استفاده از سازه‌های ساندویچی مفید است و قادر است مقدار بیشینه جابجایی را به ۶۸٪ جابجایی ورق معادل برساند. این مطالعه روابط تئوری که پیشنهاد می‌دهد هسته نرم میزان عملکرد پانل را ارتقاء می‌دهد را نیز تأیید کرد. والدویت [۱۰] یک مطالعه تحلیلی-آزمایشگاهی روی پانل ساندویچی فلزی با هسته موج‌دار، تحت بارگذاری‌های طولی و عرضی انجام داد. طراحی پانل بر اساس طرح‌های سازوکار شکست با استفاده از مدل‌های تحلیلی شکست صورت گرفت. نتایج با داده‌های آزمایشگاهی و تحلیل اجزاء محدود مقایسه شدند. والدویت بارگذاری‌های محدود را نیز مورد تحلیل قرارداد و به این نتیجه رسید که این بارها می‌توانند نسبت به سازوکارهای شکست حساس باشند. بر اساس نتایج وقتی تسلیم رویه غالب می‌شود، سخت‌شدگی قابل‌ملاحظه‌ای که در اثر غیرخطی شدن اولیه رخ می‌دهد، موجب استحکام زیادی می‌شود. در مقابل، برای طراحی‌هایی که توسط کمناش الاستیک یا پلاستیک کنترل می‌شود، شروع گسیختگی توسط نرم‌شدگی رخ می‌دهد. این نشان می‌دهد که وقتی که استحکام سازه یک نیاز کلیدی است، توصیه می‌شود که طراحی بر اساس دامنه گسیختگی رویه پانل ساندویچی صورت گیرد. جینگ [۱۱] پاسخ دینامیکی پانل ساندویچی استوانه‌ای با هسته‌های آلومینیوم و فوم را به صورت عددی در مقابل موج انفجار مورد بررسی قرارداد. نتایج عددی نشان داد که کرنش فشاری که مهم‌ترین نقش را در جذب انرژی سازه ساندویچی دارد، تقریباً با ایمپالس نرمال شده به صورت خطی افزایش می‌یابد. این کرنش با افزایش چگالی نسبی (افزایش ضخامت هسته یا پوسته‌ها)، نیز کاهش می‌یابد.

وطنی اسکویی و کیا کجوری [۱۲] مطالعاتی روی اثر موج انفجار روی پانل ساندویچی با هسته I-شکل به صورت عددی انجام داد؛ و به این نتیجه رسید که هسته I-شکل با سوراخ‌های دایره‌ای در جان خود می‌تواند جذب انرژی بیشتر و جابجایی کمتری نسبت به هسته I-شکل و همچنین صفحه فلزی معادل داشته باشد. آری هاران و همکاران [۱۳]، رفتار ساندویچ پانل با هسته لانه زنبوری تماماً فولادی را با ساندویچ پانلی که لایه در معرض انفجار آن فولادی و هسته لانه زنبوری و لایه پایینی آن از جنس سبک پلیمری باشد، را با هم مقایسه نمودند. مطالعه آنها نشان داد ساندویچ پانل کامپوزیتی در عین سبک بودن عملکرد بسیار مناسب‌تری دارد. سلیمانی و همکاران اثر انفجار بر پانل‌های ساندویچی با هسته‌های لانه زنبوری و مربعی را به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی نمودند. نتایج بررسی آنها نشان داد با افزایش سائز المان‌های هسته میانی، هسته با شکل مربع عملکرد بهتری دارد [۱۴]. سبزواری و شهابیان تحلیل

نیاز به سازه‌های سبک و ایمن، اهمیت طرح سازه‌های جدید از نظر طرح هندسی و مواد را روشن می‌کند. پانل ساندویچی از ارزشمندترین آرایش‌های سازه‌ای جهت استفاده بهینه و مؤثر در طراحی و ساخت سازه‌ها می‌باشد. پانل‌های ساندویچی از دو جزء اصلی هسته و پوسته تشکیل شده‌اند. استفاده از پانل ساندویچی در سازه موجب می‌شود که با توجه به فضای خالی موجود در آن، علاوه بر کاهش وزن سازه، عملکرد سازه را در برابر حرارت و ارتعاشات وارده بهبود بخشد. همچنین این نوع از سازه‌ها به دلیل سختی زیاد و ظرفیت جذب انرژی قابل توجهی که دارند در برابر بارهای دینامیکی مانند خستگی، ضربه یا بارهای انفجاری مقاومت خوبی را از خود نشان می‌دهند. اخیراً به مسئله اثر موج انفجار روی پانل ساندویچی فلزی توجه ویژه‌ای شده است. اغلب وقتی تنش خمشی و ساختار فوق سبک در طراحی مورد توجه است، ساختار ساندویچی مطرح می‌شود [۱]. پانل ساندویچی نسبت به کامپوزیت‌های لایه‌ای قابلیت جذب انرژی بیشتری دارند. هرچه ضخامت هسته پانل ساندویچی بیشتر شود، مقاومت آن در برابر ضربه ناشی از موج انفجار افزایش پیدا می‌کند [۲]. پانل‌ها به دلیل شکل هندسی ویژه‌ای که دارند، علاوه بر فاکتور سبکی، رفتار بسیار مناسبی در برابر ضربه ناشی از انفجار و جذب انرژی ناشی از آن، دارد. از این رو بسیاری از جاذب‌های انرژی به شکل پانل طراحی می‌گردند. هسته پانل مهم‌ترین نقش را در استهلاک انرژی انفجار دارد؛ که به عنوان فدا شونده می‌تواند از دو جنبه هندسی و خواص مکانیکی مواد مورد ارزیابی قرار بگیرد. ویژگی‌های هندسی هسته مانند اندازه و تعداد سلول‌ها، شکل هندسی سلول‌ها، ضخامت ورق هسته، ضخامت یا عمق هسته و... می‌توانند در میزان جذب انرژی پانل مؤثر باشند [۳].

نوریک و مارتین [۴ و ۵] روابط تئوری و نتایج آزمایشگاهی تغییر شکل صفحات نازک در برابر بار انفجاری را تحلیل و ارائه نمودند. در مطالعه آن‌ها نسبت ضخامت به خیز به عنوان تابعی از بار وارده، خواص مواد، هندسه و ابعاد صفحه، مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین راجندران و لی [۶] به بررسی رفتار ورق‌ها تحت بارگذاری انفجاری پرداختند و روابط ریاضی حاکم بر مدل‌سازی بار انفجاری را به دست آمده آوردند. ژاکوب و همکارانش [۷] تحقیقات خود را روی صفحات فولادی با نسبت‌های متغیر طول به عرض و همچنین تغییر در ضخامت، ارائه نموده و نتایج تحقیقات خود را با روش المان محدود ارزیابی نمودند. زئو و هاتچینسون [۸] مطالعه‌ای جهت ارزیابی پانل ساندویچی تحت موج انفجار انجام دادند. مطالعه آن‌ها نشان داد که پانل ساندویچی با هسته دارای مقاومت کافی، می‌تواند ایمپالس بزرگ‌تری را نسبت به یک صفحه فلزی با جرم یکسان، تحمل کند. یکی از مطالعات آزمایشگاهی توسط موری [۹] باهدف

رفتاری، چهار نوع ورق موجدار مستطیلی، دوزنقه‌ای، مثلثی و بیضوی را برای هسته پانل‌های ساندویچی در معرض انفجار بررسی نمودند [۱۵]. در بحث جذب انرژی، پارامترهای مختلفی مانند اندازه و هندسه‌ی سازه، جنس سازه و نحوه اعمال بار و همچنین میزان بار وارده بر رفتار سازه اثرگذار می‌باشند. برای دستیابی به یک جاذب بهینه، باید سازه از دیدگاه‌های گوناگونی بررسی گردد. مهم‌ترین معیار طراحی در سازه، معیار سختی است؛ بدین معنا که هرچه سازه سخت‌تر باشد مفیدتر خواهد بود. این مهم با کمینه کردن میزان جابجایی سازه حاصل می‌گردد. سختی یک المان با میزان جذب انرژی آن رابطه مشخصی ندارد. در اینجا چون المان‌های ساندویچی نقش غیر سازه‌ای و فداشونده دارند بنابراین، بهتر است معیار طراحی را در این المان‌های فداشونده میزان جذب انرژی قرار داد. اگر معیار طراحی، جذب انرژی باشد؛ (این معیار بیشتر جهت طراحی جاذب‌های فدا شونده به کار می‌رود). باید میزان جذب انرژی سازه را حداکثر نمود. میزان استهلاک انرژی وابسته به سرعت با عنوان انرژی جنبشی، میزان استهلاک انرژی در اثر کرنش‌های الاستیک با عنوان انرژی کرنشی و میزان استهلاک انرژی در اثر کرنش‌های در محدوده پلاستیک با عنوان انرژی پلاستیک معرفی شده است. در بارگذاری‌های انفجاری چون غالباً مواد وارد محدوده پلاستیک می‌شوند و میزان انرژی کرنشی در مقابل انرژی پلاستیک قابل چشم‌پوشی است. لذا معیار غالب جهت بررسی میزان جذب انرژی، جذب انرژی پلاستیک در نظر گرفته شده است. از طرفی معیار مقایسه باید جذب انرژی ویژه باشد؛ اما با توجه به این که در این پژوهش جرم همه پانل‌ها با یکدیگر برابر فرض شده‌اند؛ بنابراین، خود جذب انرژی ملاک ارزیابی قرار گرفته است. قسمت بیشتر انرژی ناشی از موج انفجار، توسط تغییر شکل‌های پلاستیک هسته میانی پانل ساندویچی جذب می‌شود. هسته‌های دارای سلول‌های با هندسه چهارضلعی و شش‌ضلعی به دلیل قابلیت ساخت آسان و همچنین مقاومت و استحکام هندسی بالا در صنعت کاربرد زیادی دارند. در این مقاله این پانل‌های دارای هسته با شبکه‌های چهارضلعی و شش‌ضلعی مدل شده‌اند. ضمن مقایسه شبکه‌های چهارضلعی و شش‌ضلعی، میزان جذب انرژی و جابجایی پانل‌ها در صورت قرار گرفتن شبکه هسته به صورت افقی و عمودی نیز مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱. رفتار الاستوپلاستیک کامل

در طی این مدل از رفتار مواد، پس از رسیدن نیرو به حد جاری شدن، نیرو دیگر افزایش نمی‌یابد؛ و نیروی خارجی اعمال شده به صورت انرژی کرنشی درون ماده ذخیره می‌شود؛ که به صورت تغییر شکل ظاهر می‌گردد. این تغییر شکل تا آنجا ادامه می‌یابد که سازه دیگر قادر به جذب انرژی خارجی نباشد؛ و سرانجام گسیختگی در حدود جابجایی حد پلاستیک روی دهد. از این رو مواد شکل‌پذیر در برابر مواد ترد، قابلیت جذب انرژی بیشتری دارند. شکل (۱) منحنی تنش-کرنش را برای یک المان پانل ساندویچی، تحت بارگذاری انفجاری نشان می‌دهد. سطح زیر منحنی تنش-کرنش، انرژی جذب شده توسط المان را ارائه می‌دهد. برای به دست آوردن کل انرژی جذب شده ( $E_A$ ) می‌توان از رابطه (۱) استفاده نمود.

$$E_A = \int_0^{S_b} P ds \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $P$  نیروی اعمالی،  $S_b$  میزان جابجایی نهایی و  $ds$  المان جابجایی در طول روند مچاله شدن است.

### ۳. شناخت و بررسی موج انفجار

انفجار ناشی از یک خرج کروی در هوای آزاد، امواجی با فشار و سرعت زیاد به شکل کروی تولید و در محیط اطراف منتشر می‌کند. با گذشت زمان هر قدر که شعاع کره و به تبع آن حجم محیط متأثر از امواج انفجار بیشتر می‌شود، فشار و سرعت موج ناشی از انفجار به شدت کاهش می‌یابد.

به فشار ناشی از موج انفجار در هر نقطه از محیط اطراف انفجار که مقدار آن با وزن ماده منفجره رابطه مستقیم و بافاصله از مرکز انفجار رابطه معکوس دارد، اضافه فشار می‌گویند. محاسبه

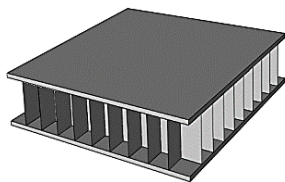
جذب انرژی با تغییر شکل بروز کرده و با کمیت‌های مربوط به

### ۲. جذب انرژی

جذب انرژی با تغییر شکل بروز کرده و با کمیت‌های مربوط به

#### ۴. طرح آزمایش و اعتبارسنجی

با توجه به پرهزینه بودن تحقیق‌های آزمایشی و نظر به موجود بودن نتایج آزمایش‌های انجام‌شده، برای بررسی و صحت‌سنجی تحلیل‌های عددی انجام‌شده در این تحقیق، با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده توسط ده‌ماسنا [۲۰] صحت مدل‌سازی پانل ساندویچی تحت بار انفجار در محیط نرم‌افزار موردبررسی قرار گرفته است.



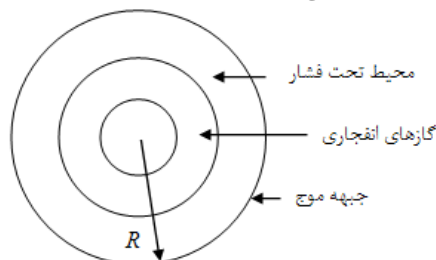
شکل ۳. پانل ساندویچی با هسته مربعی دارای شبکه عمودی

همان‌گونه که در شکل (۳) نشان داده شده است. پانل ساندویچی شامل یک هسته مربعی دارای شبکه عمودی که به دو صفحه بالایی و پایینی متصل است، تحت بار انفجار ناشی از انفجار خرج ۱،۲ و ۳ کیلوگرمی قرار گرفته است. ابعاد بیرونی پانل ۶۱×۶۱×۶۱ میلی‌متر، ضخامت صفحه بالایی و پایینی ۵ میلی‌متر و ضخامت هسته مربعی ۰/۷۶ میلی‌متر است. پانل ساندویچی از جنس فولاد ضدزنگ با شکل‌پذیری بالا می‌باشد که آلیاژی از ۰/۴۹٪ آهن، ۰/۲۴٪ نیکل، ۰/۲۱٪ کروم و ۰/۶٪ مولیبدن است [۲۱]. خواص مکانیکی فولاد در جدول (۲) ارائه شده است [۲۱]. برای مدل‌سازی رفتار الاستیک-پلاستیک از مدل جانسون-کوک استفاده شده است که پارامترهای آن در جدول (۳) ارائه شده است. پروفیل‌های فشار-زمان و ایمپالس-زمان موج انفجار در هوا برای خرج‌های موجود در فاصله موردنظر بر اساس آیین‌نامه انفجاری آمریکا (یو-اف-سی) قابل تعیین است. در جدول (۱) مقادیر بیشینه فشار و ایمپالس برای خرج‌های موجود در فاصله موردنظر از آیین‌نامه تعیین و ارائه گردیده است. با فرض رفتار متقارن برای پانل ساندویچی مفروض، فقط یک‌چهارم آن در نرم‌افزار مدل شده است. منبع انفجار در نقطه‌ای به فاصله عمودی ۱۰۰ میلی‌متر از مرکز صفحه بالایی پانل ساندویچی قرار گرفته است. لبه‌های پانل ساندویچی گیردار و ثابت تعریف شدند. در شکل (۴) نحوه تغییر شکل یک‌چهارم پانل ساندویچی تحت بارگذاری‌های مختلف در آزمایشگاه نشان داده شده است.

جدول ۱. بیشینه فشار و ایمپالس انعکاسی حل عددی

جرم خرج (کیلوگرم)	حداکثر فشار (مگاپاسکال)	ایمپالس (کیلوپاسکال ثانیه)
۱	۳۶۶	۲۱/۵
۲	۴۵۸	۲۸/۴
۳	۵۰۶	۳۳/۷

اندازه این فشار و تغییرات آن در طی زمان از اهمیت کاربردی زیادی برخوردار است. در ادامه فرایند موردنیاز برای محاسبه اضافه فشار آورده می‌شود.



شکل ۲. انتشار موج انفجار در محیط [۱۶]

با توجه به پیچیده بودن پدیده انفجار، معمولاً رابطه‌های ارائه شده برای محاسبه اضافه فشار یا فشار ناشی از انفجار، ترکیبی از روابط تئوری و نتایج آزمایشگاهی است. در قرن نوزده میلادی آزمایش‌های گسترده‌ای درباره بررسی پدیده انفجار و آثار آن بر سازه‌ها و تأسیسات نزدیک به محل انفجار توسط پژوهشگران انجام شده است [۱۷]. بر مبنای نتایج حاصل از این آزمایش‌ها و نظریه‌های حاکم بر انتشار موج، روابط مختلفی برای محاسبه اندازه اضافه فشار ناشی از انفجار ارائه شده است. در ادامه دو رابطه‌ای که ارزش کاربردی بیشتری دارند و توسط آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های طراحی سازه‌ها در برابر انفجار نیز پذیرفته شده‌اند، برای محاسبه اضافه فشار آورده می‌شوند:

برود [۱۸] در سال ۱۹۵۵، با توجه به اندازه فشار در هر نقطه، رابطه‌ای دو ضابطه‌ای را برای محاسبه اضافه فشار انفجار در فاصله‌های نزدیک و دور از محل انفجار ارائه کرد:

$$P_s = \frac{6.7}{z^3} + 1 \quad P_s > 10 \text{ bar} \quad (2)$$

$$P_s = \frac{0.975}{z} + \frac{1.455}{z^2} + \frac{5.85}{z^3} - 0.019 \quad P_s < 10 \text{ bar}$$

هنریج [۱۹] بر مبنای مطالعات نظری و آزمایشگاهی رابطه‌ای سه ضابطه‌ای را برای محاسبه اضافه فشار ناشی از انفجار ارائه نمود:

$$P_s = \frac{14.027}{z} + \frac{5.540}{z^2} + \frac{0.357}{z^3} + \frac{0.00625}{z^4} \text{ bar} \quad 0.05 \leq z \leq 0.3$$

$$P_s = \frac{6.194}{z} - \frac{0.326}{z^2} + \frac{2.132}{z^3} \text{ bar} \quad 0.3 \leq z \leq 1 \quad (3)$$

$$P_s = \frac{0.662}{z} + \frac{4.05}{z^2} + \frac{3.288}{z^3} \text{ bar} \quad 1 \leq z \leq 10$$

در این رابطه‌ها  $P_s$  اضافه فشار دینامیکی و  $Z$  فاصله مقیاس شده است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

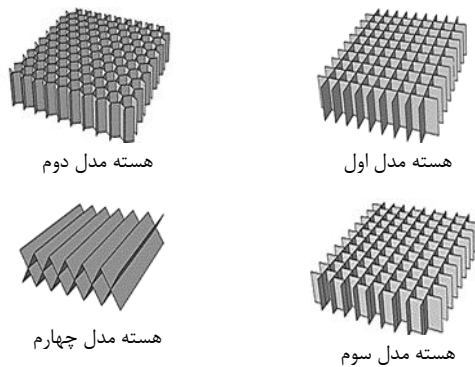
$$Z = R \left[ \frac{1}{w} \right]^{1/3} \quad (4)$$

در رابطه بالا،  $w$  وزن تی‌ان‌تی معادل ماده انفجاری موردنظر یا قدرت انفجار و  $R$  فاصله نقطه موردبررسی تا مرکز انفجار است.

## ۵. مدل‌سازی عددی

### ۵-۱. هندسه مدل

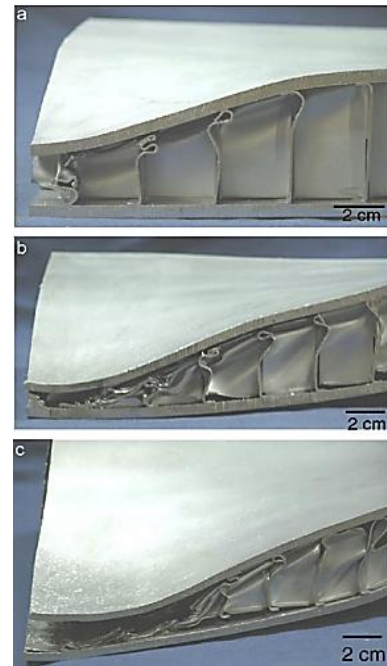
در این مقاله چهار مدل پانل ساندویچی با ابعاد کلی  $610 \times 610$  میلی‌متر در برابر موج انفجار مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. پوسته برای همه مدل‌ها یکسان و با ابعاد  $610 \times 610$  میلی‌متر و ضخامت ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. هسته‌ها نیز در ابعاد یکسان  $51 \times 610 \times 610$  میلی‌متر، وزن برابر و چگالی نسبی یکسان تقریباً برابر ۰.۶ ولی با هندسه متفاوت است. به خاطر تقارن سازه و شرایط بارگذاری، جهت ساده‌سازی فقط یک چهارم پانل مدل‌سازی و تحلیل شده است. مدل اول و دوم و سوم دارای هسته با شبکه عمودی، و مدل چهارم دارای هسته با شبکه افقی می‌باشند. شبکه‌های عمودی به علت این که مقاومت بیشتری در برابر فشار دارند، در صنعت کاربرد بیشتری دارند. متداول‌ترین شبکه‌ها در صنعت که دارای استحکام هندسی بالایی هستند، و همچنین قابلیت ساخت آسانی دارند، شبکه‌های با سلول‌های چهارضلعی و شش‌ضلعی می‌باشند. در اینجا هسته مدل اول و سوم دارای شبکه عمودی چهارضلعی، هسته مدل دوم دارای شبکه عمودی شش‌ضلعی و هسته مدل چهارم دارای شبکه چهارضلعی است. در شکل (۶) هندسه هسته مدل‌ها آورده شده است.



شکل ۶. هسته‌های شبیه‌سازی شده پانل‌های ساندویچی

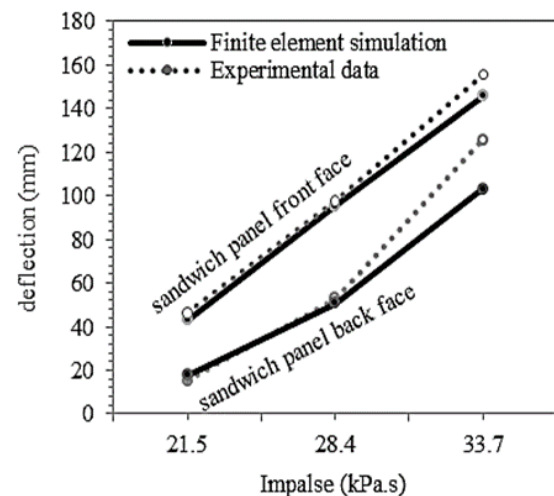
### ۵-۲. خواص مواد

پانل ساندویچی از جنس فولاد ضدزنگ با شکل‌پذیری بالا است. این فولاد آلیاژی از ۴۹٪ آهن، ۲۴٪ نیکل، ۲۱٪ کروم و ۶٪ مولیبدن است [۲۱]. در ناحیه الاستیک خواص پانل توسط جدول ۱ و ۲ و ضریب پواسون و در ناحیه پلاستیک نیز توسط تنش و کرنش پلاستیک معرفی شده است. برای مدل‌سازی رفتار الاستیک-پلاستیک از مدل جانسون کوک استفاده شده است که تنش جاری شدن فولاد را با استفاده از معادله (۵) بیان می‌کند. خواص مکانیکی فولاد در جدول (۲) و پارامترهای مدل جانسون-کوک در جدول (۳) آورده شده است [۲۱].



شکل ۴. فشرده شدن یک چهارم هسته لانه‌زنبوری مدل شده در آزمایشگاه برای خرج‌های یک، دو و سه کیلوگرم [۲۰]

در هر کدام از حالت‌های مدل‌سازی شده، جابجایی مرکز بعد از ۱/۵ میلی‌ثانیه با مقدار متناظر آن در نتایج آزمایش تجربی ده‌ماسنا<sup>۱</sup> [۲۰] مقایسه شده است. مقایسه نتایج در شکل (۵) ارائه گردیده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تطابق مناسبی بین داده‌های تجربی و نتایج مدل‌سازی وجود دارد. علت تفاوت بین نتایج آزمایشگاهی و عددی در حالت ایمپالس ۳۳/۷ کیلو پاسکال ثانیه پایین آمدن دقت نتایج حل عددی در فواصل معادل کوچک است.



شکل ۵. مقایسه جابجایی مرکز رویه‌های پانل برای مدل‌سازی اجزاء محدود و داده‌های تجربی

<sup>۱</sup> Dharmasena

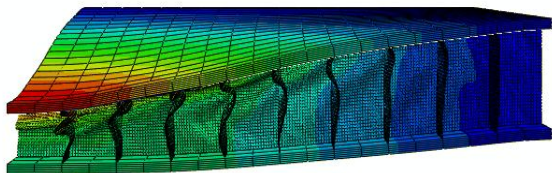
از آنجایی که نیازی به مدل هوا و ماده منفجره نیست، از المان‌های تماسی استفاده نمی‌شود و برای شبیه‌سازی موج انفجار، نیازمند ورودی‌های جرم معادل تی‌ان‌تی، نوع موج انفجار، مکان ماده منفجره در فضا و مشخصات سطح برای انتخاب نوع فشار اعمالی است. با اطلاعات کسب‌شده، کانوپ فشار مناسب را برای نوع سطح انتخاب‌شده، محاسبه می‌کند. این روش، از نظر هزینه محاسباتی نسبت به روش لاگرانژی-اویلری انتخابی دارای هزینه کمتری است.

#### ۵-۴. روش تحلیل، نوع المان‌ها و مش‌بندی

در این مقاله برای تحلیل دینامیکی اجزاء محدود از روش صریح استفاده شده است. این روش نسبت به روش انتگرال ضمنی برای بارگذاری‌های شدید در زمان کوتاه (مانند ضربه و انفجار) بهتر است و جواب‌های مناسب‌تری ارائه می‌دهد. برای مدل‌سازی ورق‌های پوسته از المان سه‌بعدی بیست گرهی و پانزده گرهی و برای هسته از المان‌های پوسته‌ای استفاده شده است. ورق‌های پوسته با ۵ لایه المان R4D2C در راستای ضخامت ورق، مش بندی شده است. این المان‌ها قابلیت این را دارند که تنش و کرنش را با دقت خیلی بالایی برآورد کنند. هسته نیز با ۳۰ لایه المان R4S در راستای ارتفاع هسته، مش بندی می‌گردد. اگرچه این المان‌ها امکان تغییر شکل محدودی دارند اما امکان دوران بالایی را دارا هستند. این عامل موجب می‌شود، المان‌های مزبور گزینه مناسبی برای تحلیل کمانشی هسته باشند.

#### ۶. بررسی نتایج

برای ارزیابی اثر هسته‌های مختلف، در جذب انرژی موج انفجار چهار مدل هسته با ضخامت و شکل هندسی متفاوت اما با ابعاد، وزن و مواد یکسان در مقابل موج انفجار ناشی از سه نوع خرج یک، دو و سه کیلوگرمی مورد مقایسه قرار می‌گیرد. شکل (۷) مدل تغییر شکل یافته مدل ۱ را برای ایمپالس ۲۸/۴ kPa.s نشان می‌دهد.



شکل ۷. فشرده شدن یک‌چهارم مدل ۱ برای خرج دو کیلوگرم تی‌ان‌تی

#### ۶-۱. بررسی جابجایی ناشی از موج انفجار

همان‌طور که انتظار می‌رود به علت جذب انرژی توسط هسته، جابجایی پوسته مقابل خرج نسبت به پوسته دیگر باید بیشتر

$$\sigma_y = [A + B\varepsilon_p^{eqn}] \left[ 1 + c \ln \left( \frac{\varepsilon_p^{eq}}{\varepsilon_0} \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (5)$$

که  $\varepsilon_p^{eq}$  کرنش پلاستیک معادل،  $\varepsilon_p^{eq}$  نرخ کرنش پلاستیک معادل،  $\varepsilon_0$  نرخ کرنش اولیه،  $A$  و  $B$  ضرایب ثابت،  $T$  دمای ماده،  $T_m$  دمای ذوب ماده و  $T_r$  دمای محیط می‌باشد.

#### جدول ۲. خصوصیات فولاد [۲۱]

مقادیر	خصوصیات فولاد
۱۶۱ (GPa)	مدول الاستیسیته
۰/۳۵	ضریب پواسون
۷۸۵۰ (kg/m <sup>3</sup> )	چگالی

#### جدول ۳. پارامترهای مدل جانسون- کوک

مقادیر	پارامترها
۴۰۰ (MPa)	تنش تسلیم (A)
۱۵۰۰ (MPa)	ثابت سختی (B)
۰/۰۴۵	ثابت نرخ کرنش (C)
۰/۴	توان سختی (n)
۱/۲	شاخص نرم شوندگی حرارتی (m)
۰/۰۰۱ (s <sup>-1</sup> )	کرنش (ε)
۲۹۳ (k)	دمای محیط (T <sub>r</sub> )
۱۸۰۰ (k)	دمای ذوب ماده (T <sub>m</sub> )

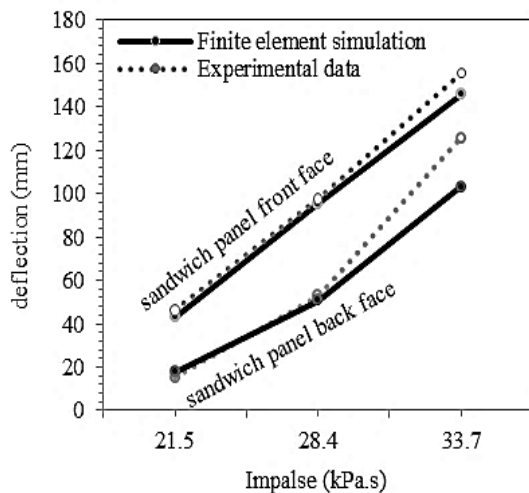
#### ۵-۳. شرایط مرزی و بارگذاری

شرایط مرزی در پانل اصلی به صورت گیردار در نظر گرفته شده است؛ اما با توجه به اینکه یک‌چهارم پانل مدل‌سازی شده است، در اینجا دو سمت از پانل با شرایط مرزی متقارن تعریف شده است. موج انفجار به دو قسمت فاز مثبت و فاز منفی تقسیم می‌شود. در بخش فاز مثبت بیشینه اضافه فشار به صورت آنی تقریباً در زمان صفر شکل‌گرفته و طی زمان کوتاهی به مقدار فشار محیط کاهش پیدا می‌کند. بعد از آن موج وارد فاز منفی خود می‌شود که دارای زمان طولانی‌تر اما دامنه‌ای کمتر از اضافه فشار فاز مثبت است. رابطه بین فشار انفجار و زمان بر طبق معادله نمایی (۶) تعریف می‌شود.

$$p(t) = P_s \left( 1 - \frac{t}{T_a} \right) e^{\frac{-bt}{T_a}} \quad (6)$$

$P(t)$  اضافه فشار در زمان  $t$ ،  $T_a$  مدت زمان رسیدن موج به سازه،  $P_s$  بیشینه اضافه فشار و  $b$  یک ثابت تجربی است. از روش‌های مرسوم در حل مسائل موج شوک، اعمال مستقیم فشار موج انفجار به سازه لاگرانژی و یا کانوپ است. فشار اعمالی با توجه به معادلات تجربی تنظیم‌شده در قسمت بارگذاری انفجار محاسبه می‌شود که این معادلات با استفاده از جمع‌آوری نتایج هزاران آزمایش انفجار ماده منفجره به دست آمده‌اند. در این روش،

(۴۵۸ مگاپاسکال) همه پانل‌ها تقریباً دارای عملکرد مشابه می‌باشند. در فشارهای پایین‌تر موج انفجار (۳۶۶ مگاپاسکال) مدل ۴ که دارای هسته با هندسه غیر عمودی است، دارای کمترین میزان جابجایی بوده و بهترین عملکرد را دارد؛ اما این مدل در فشارهای بالا (۵۰۶ مگاپاسکال) دارای بدترین عملکرد یعنی بیشترین جابجایی نسبت به سایر مدل‌ها است. در این فشار مدل ۲ کمترین جابجایی و در نتیجه بهترین عملکرد را خواهد داشت.

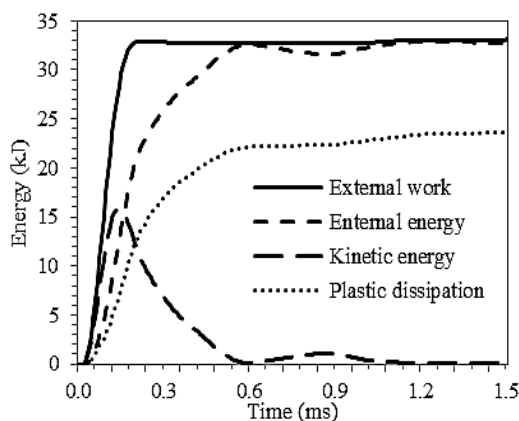


شکل ۸. بیشینه جابجایی مرکز رویه عقب پانل ساندویچی در برابر موج انفجار

باشد. همچنین مسلم است که جابجایی در فشارهای بالاتر، مقادیر بیشتری خواهد داشت. برای ارزیابی کارایی سازه‌های موردنظر، یک ورق فلزی با وزن معادل، در برابر موج انفجار مدل شده و از نتایج به دست آمده از آن برای مقایسه استفاده شده است. در جدول (۴) بیشینه جابجایی استخراج شده از مدل‌سازی برای مدل‌های مختلف ارائه گردیده است. جابجایی کمتر پوسته عقب پانل، نسبت به ورق فلزی معادل، جذب انرژی هسته و کارایی پانل ساندویچی در مقابل موج انفجار را مشخص می‌کند. شکل (۸) میزان بیشینه جابجایی پوسته عقب پانل ساندویچی و ورق فلزی را در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد. محدوده فشارهای بررسی شده در این مقاله بین ۳۶۶ تا ۵۰۶ مگاپاسکال است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر صورت پوسته عقب پانل ساندویچی به علت جذب انرژی هسته دارای جابجایی کمتری نسبت به ورق فلزی است بنابراین، می‌توان گفت اگر معیار طراحی میزان جابجایی بیشینه باشد، یک پانل ساندویچی در هر صورت عملکرد بهتری نسبت به ورق فلزی معادل خواهد داشت. جابجایی پوسته عقب پانل ساندویچی برای فشار بیشتر (۵۰۶ مگاپاسکال) حدود ۷۰-۹۰٪ ورق فلزی معادل و برای فشارهای ضعیف‌تر (۳۶۶ مگاپاسکال) حدود ۲۵-۵۰٪ ورق فلزی معادل است. پانل ساندویچی دارای قابلیت کارایی بهینه باید بر اساس میزان فشار وارده از موج انفجار طراحی شود. در فشار متوسط

جدول ۴. بیشینه جابجایی (برحسب میلی‌متر) مرکز پانل ساندویچی در مقابل موج انفجار

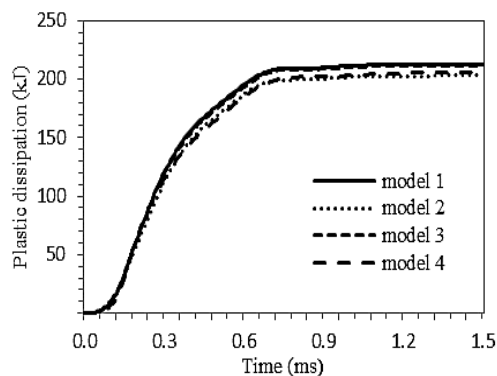
ورق فلزی معادل	مدل ۴		مدل ۳		مدل ۲		مدل ۱		جابجایی (میلی‌متر)
	رویه عقب	رویه جلو	رویه عقب	رویه جلو	رویه عقب	رویه جلو	رویه عقب	رویه جلو	
۳۷/۴۸	۹/۸۶	۵۶/۰۵	۱۶/۲۵	۴۴/۳۷	۱۷/۹۴	۳۶/۲۸	۱۷/۸	۴۳/۱	۱ کیلوگرم تی‌ان‌تی
۶۸/۳۶	۴۸/۵۹	۹۰/۰۸	۵۰/۲۷	۹۵/۱۲	۴۸/۸	۸۲/۲۶	۵۰/۸	۹۵/۵	۲ کیلوگرم تی‌ان‌تی
۱۳/۱۱	۱۱۳/۵	۱۵۶	۱۰۳/۶۱	۱۴۶/۹	۹۷/۹	۱۴۳/۸	۱۰۳/۰۰۲	۱۴۵/۷	۳ کیلوگرم تی‌ان‌تی



شکل ۹. مقایسه کل انرژی و انرژی استهلاک شده پلاستیک (مدل ۱، ۱ کیلوگرم تی‌ان‌تی)

## ۲-۶. بررسی جذب انرژی ناشی از موج انفجار

نمودار انرژی-زمان که برای خرج‌های ۱ و ۳ کیلوگرم برای مدل ۱ در شکل‌های (۹ و ۱۰) رسم شده است. در این شکل‌ها External work، Internal energy، Kinetic energy و Plastic dissipation به ترتیب بیانگر کار خارجی، کار داخلی، انرژی جنبشی و انرژی استهلاک شده ناشی از کرنش پلاستیک است. مقایسه بین کار انجام شده و انرژی استهلاک شده ناشی از کرنش پلاستیک، نشان می‌دهد که نسبت زیادی از کار انجام شده توسط موج انفجار، با کرنش‌های پلاستیک که در سازه به وجود می‌آید، مستهلک می‌شود. همچنین مشاهده می‌گردد که با افزایش جرم خرج و در نتیجه آن با افزایش میزان فشار، چون مواد به محدوده غیرخطی می‌رسند، این نسبت بیشتر می‌شود.

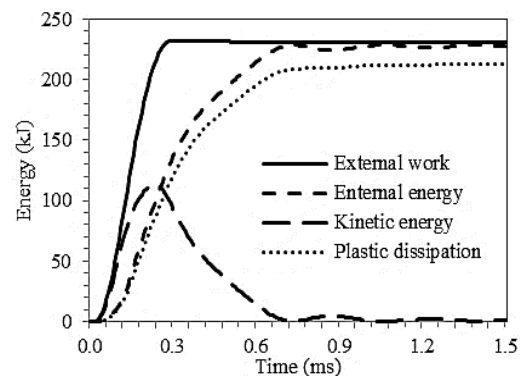


شکل ۱۳. مقایسه انرژی استهلاک شده پلاستیک (۳ کیلوگرم تی‌ان‌تی)

با توجه به شکل (۱۱) در فشارهای پایین (۳۶۶ مگاپاسکال) مدل ۴ با هسته دارای شبکه افقی با جذب انرژی ۲۳/۷۵۵ کیلوژول دارای بیشترین جذب انرژی و بهترین عملکرد خواهد بود. در فشارهای بالاتر (۵۰۶-۴۵۸ مگاپاسکال) با توجه به شکل‌های (۱۲) و (۱۳) مدل ۱ دارای هسته با شبکه عمودی با جذب انرژی ۸۷/۳۳ و ۲۱۲/۷۷ کیلوژول به ترتیب برای خرج‌های ۲ و ۳ کیلوگرم بیشترین جذب انرژی و بهترین عملکرد را خواهد داشت.

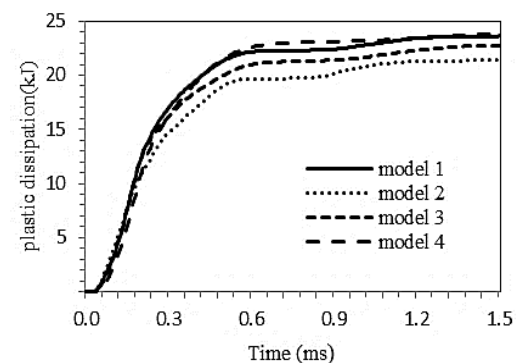
#### ۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله میزان جابجایی و جذب انرژی ناشی از موج انفجار توسط چند مدل پانل ساندویچی با هسته‌های متفاوت با روش عددی مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های به‌دست‌آمده از روش عددی اجزاء محدود، با مقادیر آزمایشگاهی متناظر مقایسه شد و تطابق خوبی بین داده‌های تجربی و عددی مشاهده گردید. با بررسی دو پارامتر متغیر فشار موج انفجار (ناشی از تفاوت در وزن خرج) و هندسه هسته‌های پانل ساندویچی روشی جهت بررسی عملکرد سازه ساندویچی ارائه شد. نتایج نشان داد که پانل‌های ساندویچی نسبت به ورق فلزی معادل آن، نقش بسیار مؤثرتری جهت مقاومت در برابر موج انفجار دارند. از طرفی برای هر مقدار فشار انفجار و برای هر کاربرد مشخص، یک پانل ساندویچی خاصی می‌تواند بهترین عملکرد را داشته باشد؛ که این عملکرد متأثر از هندسه هسته پانل ساندویچی است. معیارهای موردبررسی جهت برآورد کارایی سازه در مقابل فشار ناشی از موج انفجار، جابجایی مرکز پانل و میزان جذب انرژی پانل در نظر گرفته شد. برای چهار نمونه پانل مدل‌سازی شده نتایج نشان داد که در محدوده فشارهای موردبررسی، در فشارهای پایین‌تر مدل ۴ که دارای هسته با شبکه چهارضلعی افقی بود، با توجه به اینکه وب افقی نسبت به وب‌های عمودی زودتر منبسط شده بیشترین جذب انرژی را داشت و در نتیجه کمترین جابجایی را داشت.

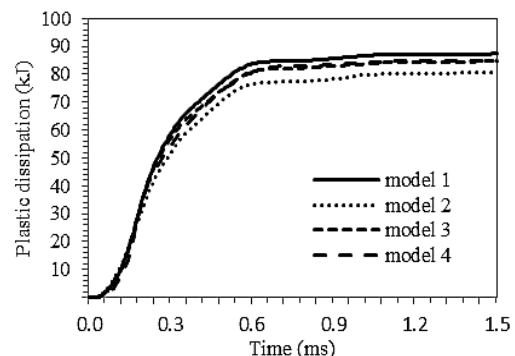


شکل ۱۰. مقایسه کل انرژی و انرژی استهلاک شده پلاستیک (مدل ۱، ۳ کیلوگرم تی‌ان‌تی)

بیشتر فشار ناشی از موج انفجار توسط کرنش‌های پلاستیک ایجاد شده در هسته مستهلک می‌شود. در هنگام انفجار مقدار کمی از انرژی جنبشی می‌تواند توسط خمش و کشش به وجود آمده در کل سازه جذب گردد. از سوی دیگر نسبت زیادی از انرژی جنبشی به‌وسیله تغییر شکل‌های پلاستیک جذب می‌شود [۲۰]؛ بنابراین، برای مقایسه جذب انرژی مدل‌های مختلف میزان انرژی مستهلک شده توسط کرنش‌های پلاستیک در آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. شکل‌های (۱۲)، (۱۱) و (۱۳) این انرژی را به ترتیب برای خرج‌های یک، دو و سه کیلوگرم تی‌ان‌تی در طول زمان نشان می‌دهند.



شکل ۱۱. مقایسه انرژی استهلاک شده پلاستیک (۱ کیلوگرم تی‌ان‌تی)



شکل ۱۲. مقایسه انرژی استهلاک شده پلاستیک (۲ کیلوگرم تی‌ان‌تی)



- [9] Mori, L.; Queheillalt, D.; Wadley, H.; Espinosa, H. "Deformation and Failure Modes of I-core Sandwich Structures Subjected to Underwater Impulsive Loads"; *Exp. Mech.* 2009, 49, 257-275.
- [10] Valdevit, L.; Wei, Z.; Mercer, C.; Zok, F. W.; Evans, A. G.; "Structural Performance of Near-Optimal Sandwich Panels with Corrugated Cores"; *Int. J. Solids. Struct.* 2006, 43, 4888-4905.
- [11] Jing, L.; Yang, F.; Wang, Z.; Zhao, L. "A Numerical Simulation of Metallic Cylindrical Sandwich Shells Subjected to Air Blast Loading"; *Lat. Am. J. Solids Stru.* 2013, 10, 631-645.
- [12] Vatani Oskouei, A.; Kiakojouri, F. "Non-linear Dynamic Analysis of Steel Hollow I-Core Sandwich Panel under Air Blast Loading"; *Civil. Eng. Civil. Infr.* 2015, 48, 323-344.
- [13] Peyman, S.; Ghazanfarinia, S. "Defence and Security Structures"; MAUT Press, 2007.
- [14] Sayed M. Soleimani, Nader H. Ghareeb, Nourhan H. Shaker, Modeling, Simulation and Optimization of Steel Sandwich Panels under Blast Loading, *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2018.
- [15] Sabzevari, S.; Shahabian, F. "Optimum Selection of Corrugated Sandwich Panels Shape and Materials Subjected to Blast Loading".
- [16] Peyman, S.; Sonbolestan, S.H. "Analysis of Underground Tunnels in Explosion Loading Based on Peak Particle Velocity"; *Advanced Defence Sci. & Technol.* 2017, 8, 45-50.
- [17] Bulson, P. S. "Explosive Loading of Engineering Structures"; CRC Press: 2002.
- [18] Brode, H. L. "Numerical Solutions of Spherical Blast Waves"; *J. Appl. Phys.* 1995, 26, 766-775.
- [19] Henrych, J.; Major, R. "The Dynamics of Explosion and its Use"; Elsevier/North-Holland, Inc., New York, 1979.
- [20] Dharmasena, K. P.; Wadley, H. N.; Xue, Z.; Hutchinson, J. W. "Mechanical Response of Metallic Honeycomb Sandwich Panel Structures to High-Intensity Dynamic Loading"; *Int. J. Impact. Eng.* 2008, 35, 1063-1074.
- [21] Nahshon, K.; Pontin, M.; Evans, A.; Hutchinson, J.; Zok, F.; "Dynamic Shear Rupture of Steel Plates"; *J. Mech. Mater. Struct.* 2007, 2, 2049-2066.
- بنابراین، در فشارهای پایین هندسه با شبکه افقی نسبت به شبکه‌های عمودی می‌تواند مناسب‌تر باشد. ولی در فشارهای بیشتر هسته با وب عمودی به علت مقاومت بالاتر کارایی بیشتری خواهد داشت. در این فشارها اگر معیار طراحی حداقل جابجایی باشد مدل ۲ با شبکه عمودی شش ضلعی بهترین مدل بوده و اگر معیار طراحی میزان جذب انرژی باشد مدل ۱ دارای شبکه عمودی چهارضلعی بیشترین میزان جذب انرژی را دارد و بهترین مدل جهت طراحی موردنظر خواهد بود.

## ۸. مراجع‌ها

- [1] Heimbs, S. "Foldcore Sandwich Structures and their impact Behaviour: an Overview"; *Dynamic failure of composite and sandwich structures.* Springer, Dordrecht, 2013.
- [2] Gilkie, R.; Sundararaj, P. "The Impact Resistance of Plastics Sandwich Constructions using Low Density Urethane Foam Cores"; *J. Cell. Plast.* 1971, 7, 313-318.
- [3] Nayak, S. K.; "Optimization of Honeycomb Core Sandwich Panel to Mitigate the Effects of Air Blast Loading"; MS. Thesis, The Pennsylvania State University, 2010.
- [4] Nurick, G.; Martin, J. "Deformation of Thin Plates Subjected to impulsive Loading—a Review Part II: experimental Studies"; *Int. J. Impact. Eng.* 1989, 8, 171-186.
- [5] Nurick, G.; Martin, J. "Deformation of Thin Plates Subjected to Impulsive Loading—a Review: Part i: Theoretical Considerations"; *Int. J. Impact. Eng.* 1989, 8, 159-170.
- [6] Rajendran, R.; Lee, J. "Blast Loaded Plates"; *Mar. Struct.* 2009, 22, 99-127.
- [7] Jacob, N.; Yuen, S. C. K.; Nurick, G.; Bonorchis, D.; Desai, S.; Tait, D. "Scaling Aspects of Quadrangular Plates Subjected to Localised Blast Loads—Experiments and Predictions"; *Int. J. Impact. Eng.* 2004, 30, 1179-1208.
- [8] Xue, Z.; Hutchinson, J. W. "Preliminary Assessment of Sandwich Plates Subject to Blast Loads"; *Int. J. Mech. Sci.* 2003, 45, 687-705.