

Numerical Investigation of Deflection of Sandwich Panel with Auxetic Core Topology under Simultaneous Symmetrical Impulsive Loading

Mehdi Niajalili^{1*}, Majid Alitavoli², Reza Ansari Khalkhali², Mojtaba Haghighi³

¹ Ph.D. Student, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

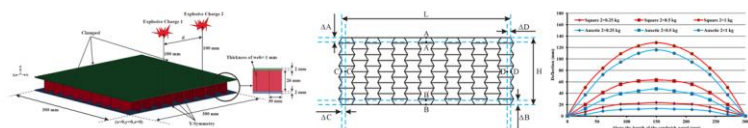
² Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

³ Ph.D., Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

HIGHLIGHTS

- Investigating the effect of simultaneous impulsive loading on a sandwich panel with an auxetic core topology
- Comparing the deflection of a sandwich panel with square and auxetic cores under impulsive loading
- Investigating the effect of changing the distance between the loading points on deflection of the sandwich panel

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 18 November 2024

Received in revised form: 7 December 2024

Accepted: 26 December 2024

Available online: 31 December 2024

*Correspondence:

mehdi_niajalili@yahoo.com

How to cite this article:

M. Niajalili, M. Alitavoli, R.A. Khalkhali, M. Haghighi. Numerical investigation of deflection of sandwich panel with auxetic core topology under simultaneous symmetrical impulsive loading. Journal of Aerospace Mechanics. 2025; 21(1):47-60.

Keywords:

Auxetic

Simultaneous symmetrical impulsive loading

Sandwich panel

Core topology

Finite element software

ABSTRACT

Nowadays, the use of sandwich panels has increased due to their low weight and desirable load absorption properties. These structures may be subjected to various loading. Therefore, designing a structure with minimal displacement under various loadings can have many positive effects. In this study, a two-point simultaneous symmetrical impulsive loading was applied to a sandwich panel with an auxetic honeycomb core topology and compared with a similar model with a square core topology. Due to the high cost of conducting experimental tests, in this study, the investigations were carried out numerically using the finite element software LS-DYNA. After designing the sandwich panel and verifying it with the data available in the literature, amounts of 0.5, 1 and 2 kg of selected charge were applied at one and two points (2×0.25, 2×0.5 and 2×1 kg) at a distance of 10 cm from the sandwich panel with the mentioned topologies and their displacements were evaluated. In the next step, to investigate the effect of the distance between the explosive charges on the displacement of the sandwich panel, this distance was considered to be 8, 10 and 12 cm and the displacement of the sandwich panels with the auxetic and square core topologies under the mentioned loading was investigated. According to the studies conducted, the sandwich panel with an auxetic core showed better performance than the square core in all cases and the displacement of its front and rear faces decreased between 1.6% and 45.3% under different loadings.

This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC) license.

Publisher: Imam Hossein University

© Authors





بررسی عددی جابجایی پنل ساندویچی با توپولوژی هسته آگزتیک تحت بارگذاری دفعی همزمان مقارن

مهدی نیاجلیلی^{۱*}، مجید علی طاوولی^۲، رضا انصاری خلخالی^۲، مجتبی حقگو^۳

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

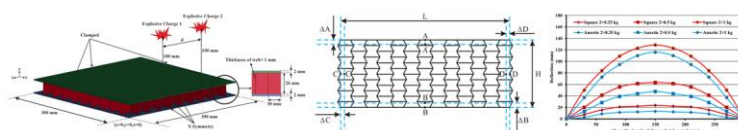
^۲ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

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

برجسته‌ها

- بررسی اثرات بارگذاری دفعی همزمان روی پنل ساندویچی با هسته آگزتیک
- مقایسه جابجایی پنل ساندویچی با هسته‌های مربع و آگزتیک تحت بارگذاری دفعی
- بررسی تأثیر تغییر فاصله بین نقاط بارگذاری بر جابجایی پنل ساندویچی

چکیده گرافیکی



مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۸

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۱۷

پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۶

ارائه برخط: ۱۴۰۳/۱۰/۱۱

*نویسنده مسئول:

mehdi_niajalili@yahoo.com

کلیدواژه‌ها:

آگزتیک

بارگذاری دفعی همزمان مقارن

پنل ساندویچی

توپولوژی هسته

نرم افزار المان محدود

چکیده

امروزه استفاده از پنل‌های ساندویچی به دلیل وزن پایین و خاصیت جذب بار مطلوب افزایش یافته است. این سازه‌ها ممکن است تحت بارگذاری‌های گوناگونی قرار گیرند. لذا طراحی سازه‌ای با حداقل جابجایی تحت بارگذاری‌های مذکور می‌تواند اثرات مثبت بسیاری را در پی داشته باشد. در این پژوهش بارگذاری دوقطبی همزمان مقارن دفعی روی پنل ساندویچی با توپولوژی هسته لانه‌زنبوری آگزتیک، اعمال شده و با مدل مشابه، با توپولوژی هسته مربعی مقایسه شده است. با توجه به پرهزینه بودن انجام آزمایش‌های تجربی، در این پژوهش بررسی‌ها به صورت عددی توسط نرم‌افزار المان محدود LS-DYNA انجام شده است. پس از طراحی پنل ساندویچی و راستی آزمایی با داده‌های موجود در ادبیات تحقیق، مقادیر ۰/۵، ۱ و ۲ کیلوگرم TNT، در یک و دوقطبه (۲۵/۲، ۵/۲× و ۱×۲ کیلوگرم) در فاصله ۱۰ سانتی‌متری پنل ساندویچی با توپولوژی‌های مذکور منفجر شده و جابجایی آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مرحله بعد جهت بررسی تأثیر فاصله بین بارهای انفجاری روی جابجایی پنل ساندویچی، این فاصله، ۸، ۱۰ و ۱۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شده و میزان جابجایی پنل‌های ساندویچی با توپولوژی‌های هسته آگزتیک و مربعی، تحت بارگذاری‌های مذکور، بررسی شده است. بر طبق بررسی‌های انجام شده پنل ساندویچی با هسته آگزتیک در تمام موارد عملکرد بهتری را نسبت به هسته مربعی از خود نشان داده و در بارگذاری‌های مختلف بین ۱/۶ تا ۴۵/۳ درصد، جابجایی صفحات جلو و عقبی آن کاهش یافته است.



۱- مقدمه

افزایش تقاضای استفاده از سازه‌های سبک و یکپارچه، ضرورت تحقیق روی پنل‌های ساندویچی را افزایش داده است [۱]. در سال‌های گذشته استفاده از پنل‌های ساندویچی به دلایلی مانند استحکام به وزن، جذب مطلوب انرژی، جذب ارتعاشات و غیره، جایگاه خود را در بیشتر زمینه‌های مهندسی ثابت کرده است [۲-۴]. ساندویچ‌پانل‌ها در واقع شکل خاصی از کامپوزیت‌های چندلایه بوده که از دو صفحه نازک با استحکام بالا تشکیل شده است که به دو طرف یک هسته ضخیم با چگالی کم متصل شده‌اند که یک ساختار سبک با سفتی خمشی بالا را ایجاد می‌کند. در واقع پنل‌های ساندویچی نسبت به کامپوزیت‌های لایه‌ای قابلیت جذب انرژی بیشتری دارند [۵]. این پنل‌های ساندویچی برای صنعت حمل‌ونقل و جاهایی که کاهش جرم از اهمیت بالایی برخوردار است، پرکاربرد هستند [۶]. این پنل‌ها با توجه به کاربردهای ممکن است تحت بارگذاری‌های مختلف قرار گیرند. یکی از مهم‌ترین انواع بارگذاری روی سازه‌های مختلف، بارگذاری انفجاری بوده که به دلیل اهمیت این موضوع، مورد توجه پژوهشگران بسیاری قرار گرفته است [۷-۱۰]. پدیده انفجار به دلیل آزاد شدن یک‌باره انرژی، کاربردهای متعددی در مواردی همچون حفاری تونل‌ها [۱۱]، شکل‌دهی ورق‌ها [۱۲-۱۴]، تخریب [۱۵] و غیره دارد. این در حالی است که انفجارهای عمدی می‌تواند اثرات مخرب بسیاری بر سازه‌های مختلف در پی داشته باشد. با توجه به مقاومت سازه‌های ساندویچی، استفاده از آن‌ها می‌تواند آسیب‌های ناشی از بارگذاری‌های انفجاری را حداقل نماید [۱۶]. جذب مطلوب انرژی انفجار، سازه‌های ساندویچی را به‌عنوان یکی از سازه‌های مورد تأکید به‌عنوان سپر انفجار مطرح کرده‌اند [۱۰]. در بارگذاری‌های انفجاری گزینش ماده مناسب برای صفحات جلو و عقبی پنل ساندویچی در کنار انتخاب ساختار مطلوب برای هسته، تأثیر مستقیم بر عملکرد آن در جذب ضربات دارد [۶]. لذا دقت در طراحی هسته می‌تواند توانایی پنل ساندویچی در جذب بارهای دفعی را بهبود بخشد. توپولوژی آگرتیک ساختار خاصی با نسبت پواسون منفی بوده که هنگامی که تحت

بارگذاری قرار می‌گیرد، به‌گونه‌ای تغییرشکل داده که سفتی موضوعی زیاد شده و مقاومت کلی سازه افزایش یابد.

با توجه به پرهزینه بودن انجام آزمایش‌های تجربی انفجار و آلودگی زیست‌محیطی و صوتی ایجادشده ناشی از آن، پژوهشگران بسیاری استفاده از روش‌های عددی برای تجزیه و تحلیل انفجار را قابل قبول دانسته‌اند [۲، ۷، ۱۷ و ۱۸]. رای و همکاران [۸] تأثیر انفجار روی هندسه خاصی از پنل ساندویچی لانه‌زنبوری را مورد بررسی قرار داده‌اند. این محققان استفاده از پنل‌های ساندویچی را به دلیل مناسب بودن وزن و جذب انرژی مطلوب برای محافظت از سازه‌های مختلف در برابر اثرات بارگذاری‌های دفعی مناسب دانسته‌اند. آن‌ها بیان کردند که توپولوژی آگرتیک نسبت پواسون منفی داشته و می‌تواند مقاومت بالاتری در برابر بارگذاری‌های مختلف ایجاد کند. این پژوهشگران تحلیل خود را با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA و با رویکرد LBE¹ انجام داده و سعی کردند با تغییر تعداد لایه‌ها، ضخامت هسته و جرم بار انفجاری، بهترین حالت پنل ساندویچی را تحت بارگذاری دفعی تعیین کنند. این محققان در نهایت اعلام کردند که ساندویچ‌پانل لانه‌زنبوری با توپولوژی آگرتیک، مقاومت و جذب ضربه خوبی در مواجهه با بار انفجاری از خود نشان می‌دهد. لازم به ذکر است رویکرد LBE یک رویکرد لاگرانژی بوده که فشار انفجار را با محاسبات تجربی بر اساس فاصله و جرم بار انفجاری بررسی می‌کند [۸]. بوهارا و همکاران [۱۹] عملکرد پنل ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری آگرتیک را تحت بار انفجاری مورد تجزیه و تحلیل قرار داده‌اند. آن‌ها از پنل ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری آگرتیک برای محافظت از قطعه بتنی در مقابل انفجار استفاده کرده‌اند. این محققان جهت شبیه‌سازی عددی از نرم‌افزار المان محدود LS-DYNA استفاده کرده‌اند. آن‌ها پنل با هسته لانه‌زنبوری آگرتیک و معمولی را شبیه‌سازی کرده و نتایج تأثیر انفجار تک‌نقطه‌ای روی هردوی آن‌ها را با یکدیگر مقایسه کردند. این پژوهشگران در نهایت اعلام داشتند که پنل ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری آگرتیک نه تنها انرژی انفجار بالاتری را جذب می‌کند، بلکه توزیع تنش در آن نیز یکنواخت می‌باشد. آن‌ها پاسخ کلی پنل ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری آگرتیک را بهتر از پنل ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری معمولی

¹ LOAD_BLAST_ENHANCED

بیان داشته و آن را برای محافظت از قطعه بتنی مناسبتر دانسته‌اند.

کیاکجوری و همکاران [۲۰] تأثیر پدیده انفجار روی پنل‌های ساندویچی با هسته ۱ شکل را موردبررسی قرار داده‌اند. این محققان مدل پیکربندی ۱ شکل سوراخ‌دار را برای هسته پنل‌های ساندویچی پیشنهاد داده و بررسی‌های خود را پیرامون تأثیر انفجار روی آن انجام داده‌اند. آن‌ها برای تحلیل خود از نرم‌افزار المان محدود LS-DYNA استفاده کرده و پارامترهای مختلف مانند شرایط مرزی و وزن ماده منفجره که می‌تواند در پاسخ‌های ساختاری و دینامیکی پنل تحت انفجار تأثیر بگذارد را در بررسی‌های خود در نظر گرفته و اعلام نمودند که پاسخ دینامیکی پنل ساندویچی به شدت به وزن بار انفجاری بستگی دارد. این پژوهشگران طرح پیشنهادی خود را برای پیکربندی هسته پنل‌های ساندویچی، اقتصادی دانسته و درنهایت اعلام کردند که پنل‌های ساندویچی با هسته ۱ سوراخ‌شده، تغییرشکل پلاستیک و اتلاف انرژی بیشتر و جابجایی نقطه میانی کمتری را در مقایسه با سازه‌های معادل با وزن و مواد مشابه دارد.

با توجه به تأثیر بارگذاری انفجاری بر تغییر سازه‌های مختلف، انجمن‌های مهندسی دستورالعمل‌هایی را برای طراحی آن‌ها جهت افزایش مقاومت صادر نموده‌اند [۲۱-۲۳]. بیشتر این راهنماها اثرات انفجارهای ناشی از چندین منبع انفجاری را در نظر نگرفته‌اند. حتی دستورالعمل UFC [۲۴] نیز اثرات بارهای انفجاری همزمان را کمتر موردبحث قرار داده است که یکی از دلایل مهم آن نبود داده‌های نظری و تجربی در این مقوله می‌باشد. برای تجزیه و تحلیل سیستم‌هایی که با مواد منفجره عمل می‌کنند، داشتن اطلاعات دقیق از نحوه ایجاد، پیشروی و گسترش موج انفجار بسیار حائز اهمیت است [۲۵]. می‌توان گفت هنگامی که انفجارهای متعدد رخ می‌دهد، امواج انفجار در فاصله‌های دورتر با هم ادغام شده و رابطه فشار-زمان به تدریج مانند یک ماده منفجره واحد می‌شود [۲۶].

زغلول و همکاران [۲۶] تأثیر پارامترهای موج انفجار بر یکدیگر را در انفجار همزمان موردبررسی قرار داده‌اند. این محققین با بیان این که در راهنماهای انفجار معمولاً اثرات بارهای انفجاری همزمان در نظر گرفته نمی‌شود، پژوهش در این زمینه را مهم و ضروری دانسته‌اند. آن‌ها اظهار داشتند که

این نوع انفجار در مسائل مربوط به تخریب بسیار مفید است. علاوه بر این، هنگام انفجار همزمان بارهای انفجاری، فشار و ضربه متفاوتی در مقایسه با یک بار منفرد معادل به وجود می‌آید. این پژوهشگران درنهایت روش‌های تقریبی را برای محاسبه پارامترهای موج انفجار از چندین بار کروی که به‌طور همزمان منفجرشده‌اند ارائه نموده که در آن فشار و ضربه ناشی از بارهای انفجاری با دانستن پارامترهای یک بار معادل منفرد قابل محاسبه است. انفجار همزمان دو و سه نقطه‌ای توسط موهوتی و همکاران [۲۷] موردبررسی قرار گرفته است. آن‌ها بیان کردند زمانی که بارهای انفجاری به یکدیگر نزدیک شوند، اثرات انفجاری آن‌ها تشدید می‌شود. لذا فاصله بین بارهای انفجاری می‌تواند تأثیر مستقیم روی حداکثر فشار ایجادشده داشته باشد. در حالت کلی اثرات انفجاری همزمان دونقطه‌ای با توجه به فاصله بین بارها و وزن بارگذاری ممکن است کمتر یا بیشتر از بار انفجاری معادل تک‌نقطه‌ای گردد [۲۶ و ۲۸].

شکل موج ایجادشده در حالت انفجار دو بار انفجاری به‌طور همزمان، به دلیل تأثیر بارهای انفجاری بر یکدیگر، با انفجار تک‌نقطه‌ای تفاوت دارد. در این پژوهش ساندویچ پانل لانه‌زنبوری با توپولوژی‌های هسته آگزتیک و مربعی در نرم‌افزار LS-DYNA طراحی شده و تحت بارگذاری دونقطه‌ای انفجاری همزمان متقارن قرار گرفته است. در مرحله بعد، تأثیر تغییر وزن بار انفجاری بر جابجایی پنل‌های ساندویچی موردبررسی قرار گرفته و درنهایت، جابجایی این سازه‌های ساندویچی با تغییر فاصله بین بارهای انفجاری ارزیابی شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- معادلات حاکم برای انفجار در هوای آزاد

وقتی ماده منفجره در هوای آزاد منفجر می‌شود، نمودار فشار-زمان برای هدفی که در فاصله مشخصی از بار انفجاری قرار گرفته است، مانند شکل ۱ نشان داده می‌شود [۲۴]. پس از گذشت زمان t_a از انفجار، فشار به جسم موردنظر رسیده و بلافاصله به مقدار P_p افزایش می‌یابد که t_a و P_p به ترتیب زمان رسیدن و پیک فشار نامیده می‌شوند. همان‌طور که در شکل

[۳۰-۳۲]، برای مدل سازی پنل های ساندویچی استفاده شده است. فرمول مدل ماده جانسون-کوک به صورت زیر بیان می شود [۳۳]:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}))(1 - (\frac{T - T_r}{T_m - T_r})^m) \quad (4)$$

در اینجا، σ تنش سیلان، ε کرنش، $\dot{\varepsilon}$ نرخ کرنش و $\dot{\varepsilon}_0$ نرخ کرنش مرجع است. T ، T_m و T_r به ترتیب دمای کنونی، دمای ذوب و دمای مرجع هستند. پارامترهای A ، B ، C ، n و m نیز ثابت های معادله جانسون-کوک می باشند. لازم به ذکر است مدل ماده جانسون-کوک دارای سه قسمت مهم سخت شدن کرنشی، سخت شدن نرخ کرنشی و اثر نرم شدن حرارتی است [۳۴]. در این تحقیق به دلیل این که اثرات حرارتی مدنظر نیست، از مدل ساده شده جانسون کوک به شرح زیر استفاده شد [۳۵]:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})) \quad (5)$$

۲-۳- راستی آزمایی

در این پژوهش شبیه سازی بارگذاری انفجاری با استفاده از الگوریتم ConWep¹ در LS-DYNA، به روش LBE انجام شده است. الگوریتم ConWep که توسط ارتش ایالات متحده توسعه داده شده، یک فرمول تجربی برای تخمین فشار ناشی از بارهای انفجاری روی سطوح است. در مدل تجربی ConWep، پارامترهای ورودی شامل جرم معادل TNT، فاصله بارگذاری از سازه، نوع انفجار، نقطه شروع انفجار و سازه هدف برای ارزیابی انفجار مورد نیاز است [۳۶]. در روش LBE با تعیین وزن و مختصات ماده منفجره، اثرات موج انفجار روی سازه اعمال شده و نیازی به مدل سازی مستقیم ماده منفجره نیست. لذا این رویکرد باعث کاهش قابل توجه زمان محاسبات و پیچیدگی مدل سازی می گردد. عملیات پیش و پس پردازش نیز در محیط LS-PREPOST انجام شده است. همان طور که قبلاً ذکر شد، مدل ماده مورد استفاده در این پژوهش، مدل جانسون-کوک ساده شده است که با مدل ماده MAT_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK در نرم افزار LS-

۱ نشان داده شده است، پس از انفجار، نمودار به دو بخش فاز منفی و فاز مثبت تقسیم می شود که به صورت زیر تعریف می شوند:

$$t_p = t_b - t_a \quad (1)$$

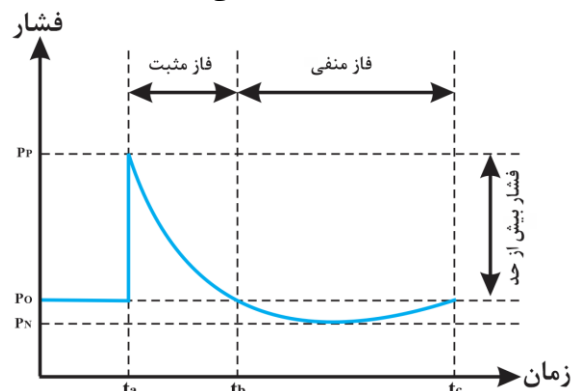
$$t_N = t_c - t_b \quad (2)$$

در معادلات (۱) و (۲)، t_a زمان شروع فاز مثبت (زمان رسیدن)، t_b زمان پایان فاز مثبت و زمان شروع فاز منفی و t_c زمان پایان فاز منفی است. t_p و t_N به ترتیب فازهای مثبت و منفی را نشان می دهند. در طول زمان t_p ، فشار در هدف به فشار محیط (P_0) باز می گردد و سپس برای مدت زمان t_N ، تحت یک فاز مکش با فشار منفی P_N قرار می گیرد که مدت زمان فاز فشار منفی بیشتر از فاز فشار مثبت است.

با توجه به اینکه معمولاً تغییر شکل هدف در فاز مثبت برجسته تر است؛ بنابراین، معمولاً از فاز منفی در مطالعات چشم پوشی می شود [۱۷]. تغییر فشار در فاز مثبت با معادله اصلاح شده فریدلندر (معادله ۳) به صورت زیر بیان شده است [۲۹].

$$P(t) = (P_p - P_0) \left[1 - \frac{t - t_a}{t_p} \right] e^{-\frac{t - t_a}{\gamma}} \quad (3)$$

که در این رابطه γ ثابت اتلاف زمان می باشد.



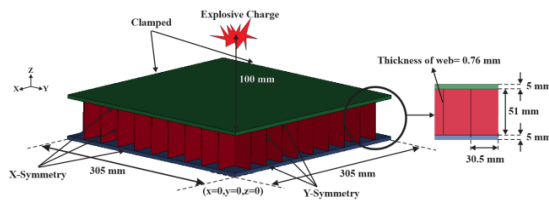
شکل (۱): تغییرات فشار وارد شده به هدف پس از انفجار.

۲-۲- انتخاب مدل ماده

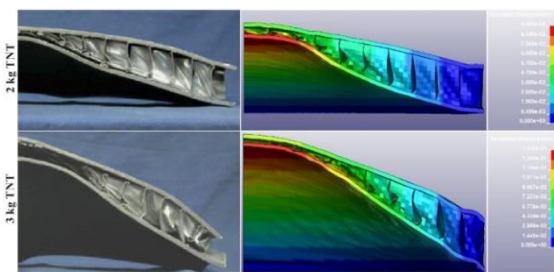
در این پژوهش از مدل ماده جانسون-کوک (J-C) که بهترین انتخاب برای بررسی رفتار فلزات در تغییر شکل پلاستیک است

¹ Conventional weapons effects program

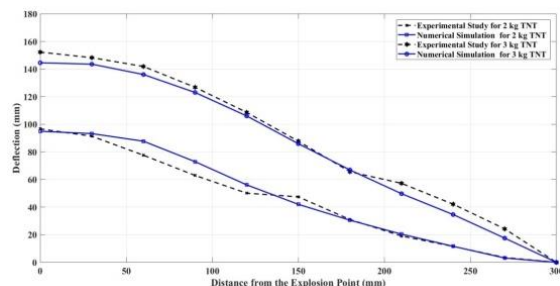
حساسیت مش انتخاب شده است. از الگوریتم تماس AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE، بین صفحه‌های جلو و عقبی با اولین و آخرین لایه هسته استفاده شده است. این نوع الگوریتم برای مدل‌سازی تماس بین مجموعه‌ای از گره‌ها و یک سطح به کار می‌رود. در میان روش‌های اتصال در LS-DYNA، روش AUTOMATIC از الگوریتم‌هایی استفاده می‌کند که می‌تواند پایداری تماس را در مسائل نرخ کرنش بالا تضمین کند [۳۸]. در ادامه زمان پایان محاسبات ۰/۰۱ ثانیه و پارامتر TSSFAC نیز ۰/۶۷ در نظر گرفته شده است. برای بررسی دقیق جابجایی نیز، مقدار DT در BINARY_D3PLOT، ۰/۱ میلی‌ثانیه لحاظ شده است. مقایسه میزان تغییر شکل و جابجایی در تحقیق حاضر و مطالعه تجربی [۷] در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. با مقایسه الگوی تغییر شکل و میزان جابجایی بین مطالعه تجربی و شبیه‌سازی حاضر، تطابق مطلوبی مشاهده شده که اعتبار مدل‌های تحقیقاتی را تأیید می‌کند.



شکل (۲): طراحی مدل دارماسنا و همکاران [۷] در نرم‌افزار LS-DYNA



شکل (۳): مقایسه تغییر شکل بین مطالعه تجربی [۷] و پژوهش حاضر.



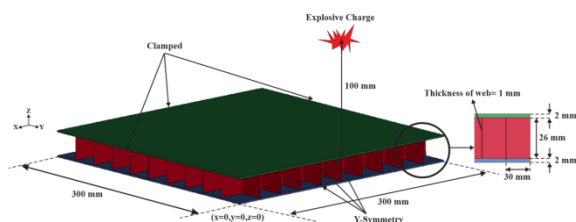
DYNA ارائه شده است. لازم به ذکر در این پژوهش از خواص ماده فولاد AL6XN که توسط دارماسنا و همکاران [۷] مورد استفاده قرار گرفت، در تمام مدل‌های مورد بررسی، استفاده شده است. جدول ۱ پارامترهای مدل ماده جانسون-کوک را برای فولاد AL6XN نشان می‌دهد.

جدول (۱): خواص مواد و پارامترهای مدل ماده جانسون-کوک برای فولاد AL6XN [۳۷].

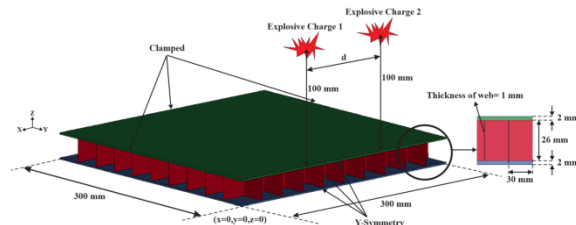
E (GPa)	۱۶۱
ρ (kg/m ³)	۷۸۵۰
ν	۰/۳۵
A (GPa)	۰/۴
B (GPa)	۱/۵
C	۰/۰۴۵
m	۱/۲
n	۰/۴
ε_0 (s ⁻¹)	۰/۰۰۱

برای راستی آزمایی این پژوهش، از پارامترهای مطالعه تجربی دارماسنا و همکاران [۷] استفاده شده است. این محققان از یک پنل ساندویچی با توپولوژی هسته مربعی به ابعاد ۶/۱ × ۶۱ سانتی‌متر مکعب استفاده نموده که بارگذاری انفجاری در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از مرکز آن در نظر گرفته شده است. ضخامت صفحات جلو و عقب ۵ میلی‌متر و ارتفاع هسته ۵۱ میلی‌متر است. برای کوتاه کردن زمان محاسبات از مدل هندسی یک‌چهارم در طراحی آن، استفاده شده است. شکل ۲ مدل یک‌چهارم پنل ساندویچی دارماسنا و همکاران [۷] را همراه با شرایط اولیه، مرزی و دیگر جزئیات نشان می‌دهد. از مواد AL6XN با مشخصات ذکر شده در جدول ۱ در طراحی صفحه‌های جلو و عقب و هسته استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، در مدل هندسی یک‌چهارم، اندازه صفحه‌های جلو و عقب، ۳۰۵ میلی‌متر × ۳۰۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، ابعاد هر کدام از سلول‌های هسته نیز ۳۰/۵ میلی‌متر × ۳۰/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. صفحات جلویی و پشتی با المان سالیید ۵ میلی‌متری و هسته با المان پوسته ۵ میلی‌متری مش‌بندی شده‌اند. اندازه مش المان‌های هسته، صفحات بالایی و پایینی بعد انجام بررسی

نوع توپولوژی مورد بررسی ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ میلی متر لحاظ شده است.



شکل (۵): جزئیات طراحی پل ساندویچی شبیه سازی شده در پژوهش حاضر با یک بار انفجاری.



شکل (۶): جزئیات طراحی پل ساندویچی شبیه سازی شده در پژوهش حاضر با دو بار انفجاری متقارن هم زمان.

۲-۵- توپولوژی های مورد بررسی برای هسته

در این پژوهش از دو نوع توپولوژی مختلف آگزتیک و مربعی برای هسته پل ساندویچی لانه زنبوری استفاده شده است. مبحث افزایش قدرت جذب انرژی پل های ساندویچی در مقابل بارگذاری های دفعی، بسیار حائز اهمیت می باشد. برای رسیدن به این مهم، پل های ساندویچی با نسبت پواسون منفی که به عنوان ساختارهای آگزتیک شناخته می شوند، به عنوان یک راه حل مفید و قابل اجرا مطرح می شوند. ساختارهای آگزتیک سازه هایی هستند که دارای نسبت پواسون منفی بوده و هنگامی که تحت بارگذاری قرار می گیرند، به گونه ای تغییر شکل داده تا فضاهای خالی ساختارهای سلولی را پر کرده و سفتی موضعی را افزایش می دهند. لذا با افزایش سفتی موضعی، مقاومت سازه در برابر بارهای وارد شده افزایش می یابد. یک سازه آگزتیک که در شکل ۷ نشان داده شده است، وقتی به صورت طولی فشرده شود، در جهت عرضی منقبض می شود و وقتی به صورت محوری کشیده می شود، منبسط می شود که از این خاصیت در بهبود جذب ضربه و انفجار در پل های ساندویچی استفاده می شود. چنین خاصیت منحصر به فرد پل آگزتیک باعث بهبود خواص فیزیکی ای

شکل (۴): مقایسه جابجایی بین مطالعه تجربی [۷] و پژوهش حاضر.

۲-۴- مدل سازی هندسی تحقیق حاضر

در این پژوهش یافتن اثرات بارهای انفجاری متقارن هم زمان روی ساندویچ پانل با توپولوژی هسته آگزتیک و مربعی، هدف اصلی می باشد. بر طبق بررسی های انجام شده، اثرات بارگذاری انفجاری هم زمان به دلیل تأثیر امواج انفجار، با یکدیگر متفاوت است [۲۶]؛ بنابراین در این مرحله اثرات دو بار انفجاری متقارن که به صورت هم زمان روی پل ساندویچی منفجر می شوند، بررسی شده و با مدل مشابه با انفجار تک نقطه ای مورد مقایسه قرار گرفته است.

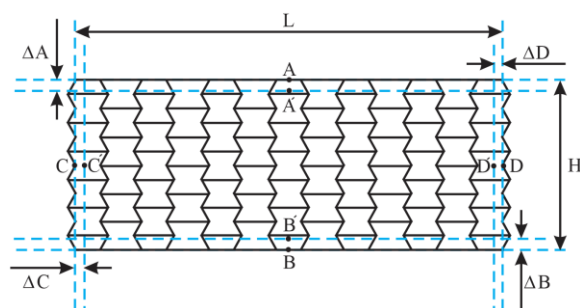
در این تحقیق ابعاد پل ساندویچی ۳۰۰ میلی متر $\times$ ۶۰۰ میلی متر $\times$ ۳۰ میلی متر در نظر گرفته شده است. به منظور کوتاه کردن زمان محاسبات از مدل هندسی یک دوم بهره برده شده است؛ بنابراین پل با ابعاد ۳۰۰ میلی متر $\times$ ۳۰۰ میلی متر $\times$ ۳۰ میلی متر مطابق شکل های ۵ و ۶ برای اعمال بارگذاری انفجاری تک نقطه ای و دونقطه ای طراحی شده است. مقدار ضخامت صفحه های جلو و عقب ۲ میلی متر و ارتفاع هسته ۲۶ میلی متر در نظر گرفته شده است. همچنین ضخامت المان های هسته در تمامی مدل های تحقیقاتی ۱ میلی متر در نظر گرفته شده است. مطابق شکل های ۵ و ۶، شرط مرزی گیردار در سه وجه و شرط مرزی تقارن در یک وجه اعمال شده است. مدل ماده، نوع المان، سازه مش، فاصله نقطه انفجار از نمای جلو و سایر پارامترهای طراحی با توجه به پل ساندویچی طراحی شده توسط دارماسنا و همکاران [۷] که در بخش ۲-۳ ذکر شد، لحاظ شده است.

وزن بارهای انفجاری در دو حالت تک نقطه ای و دونقطه ای برابر در نظر گرفته شده است. به این صورت که در حالت انفجار تک نقطه ای از بارگذاری های ۱/۵ و ۲ کیلوگرمی و در حالت انفجار دونقطه ای از دو بارگذاری ۰/۲۵ و ۰/۵ و ۱ کیلوگرمی روی پل ساندویچی استفاده شده است. همچنین برای بررسی دقیق تر تأثیر فاصله بارهای انفجاری روی جابجایی پل ساندویچی، فاصله بارهای انفجاری که در شکل های ۵ و ۶ با حرف d نشان داده شده است، برای هر دو

ذکرشده را نشان می‌دهد. با توجه به این که وزن سازه‌های ساندویچی با توپولوژی‌های هسته آگزتیک و مربعی با یکدیگر تفاوت دارد. مقدار نرمال شده حداکثر جابجایی یعنی حاصل تقسیم حداکثر جابجایی بر وزن سازه‌های ساندویچی نیز در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ آورده شده است. همان‌طور که مشخص است، عملکرد پنل ساندویچی با هسته آگزتیک در تمام حالات از پنل مذکور با هسته مربعی بهتر بوده است. مقدار جابجایی صفحه جلویی پنل ساندویچی با هسته آگزتیک تحت انفجار بارهای ۰/۵، ۱ و ۲ کیلوگرم به ترتیب ۱۱/۷، ۱۳/۸ و ۱۹/۸ میلی‌متر کمتر نسبت به پنل مذکور با هسته مربعی ارزیابی شده است. این پارامتر تحت بارگذاری‌های تعیین شده برای صفحه عقبی نیز به ترتیب ۴/۷، ۵/۹ و ۷ میلی‌متر محاسبه شده است. عملکرد مطلوب هسته آگزتیک و افزایش سفتی موضعی آن باعث می‌شود، پنل ساندویچی با هسته آگزتیک جابجایی کمتری را نسبت به هسته مربعی از خود نشان دهد.

۳-۲- بررسی انفجار دونقطه‌ای

در این قسمت مطابق شکل ۶، دو بار انفجاری در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از پنل‌های ساندویچی با توپولوژی‌های هسته آگزتیک و مربعی منفجرشده و اثرات آن روی جابجایی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مرحله بعد جهت تعیین تأثیر فاصله بین بارهای انفجاری بر جابجایی پنل‌های ساندویچی مذکور، میزان فاصله بین بارهای انفجاری ۸، ۱۰ و ۱۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شده و جابجایی پنل‌های ساندویچی تحت بارگذاری‌های مذکور بررسی شده است. شکل‌های ۱۲ تا ۱۷ جابجایی صفحات جلو و عقبی پنل ساندویچی تحت شرایط تعیین‌شده را نشان می‌دهد.



همچون استحکام تسلیم بیشتر، مدول برشی بالاتر و چقرمگی شکست بالاتر [۳۹ و ۴۰] می‌گردد. با توجه به شکل ۷، ضریب پواسون مؤثر توپولوژی آگزتیک بر اساس جابجایی چهار گره نشان داده شده تحت بارگذاری، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\nu_{XY} = -\frac{\varepsilon_Y}{\varepsilon_X} = -\frac{(\Delta C - \Delta D)}{(\Delta A - \Delta B)} \times \frac{H}{L} \quad (6)$$

که در آن ε_X و ε_Y کرنش‌های لحظه‌ای هسته آگزتیک هستند. ΔC و ΔD جابجایی‌های گره‌های C و D در جهت X و ΔA و ΔB جابجایی گره‌های A و B در جهت Y هستند. H و L نیز به ترتیب فاصله بین گره‌های A، B و گره‌های C، D هستند.

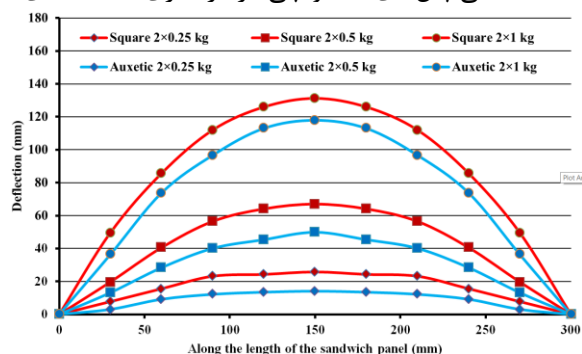
لازم به ذکر است که انواع مختلف هندسه آگزتیک لانه‌زنبوری برای پنل‌های ساندویچی وجود دارد. این موارد شامل درون رو، چیرال، چرخشی و غیره می‌باشند که در این پژوهش از هسته آگزتیک درون رو استفاده شده است. شکل ۸ هسته‌های طراحی‌شده پنل ساندویچی تحقیق حاضر که شامل آگزتیک و مربعی می‌باشند، توسط نرم‌افزار LS-DYNA را نشان می‌دهد. برای افزایش دقت مقایسه، سطح مقطع هر کدام از لانه‌های هسته پنل ساندویچی که ضربات انفجاری بر آن‌ها اثر می‌کند در هر دو نوع توپولوژی مطابق اندازه‌گذاری نشان داده شده در شکل ۹ برابر یکدیگر (۶/۲۵ سانتی‌متر مربع) در نظر گرفته شده است. همان‌طور که پیش‌تر گفته شده است، جزئیات اندازه‌گذاری پنل ساندویچی شامل طول، عرض و ارتفاع در هر دو مورد یکسان در نظر گرفته شده‌اند. همچنین ضخامت پوسته‌ها در هسته نیز یک میلی‌متر لحاظ شده است.

۳- نتایج

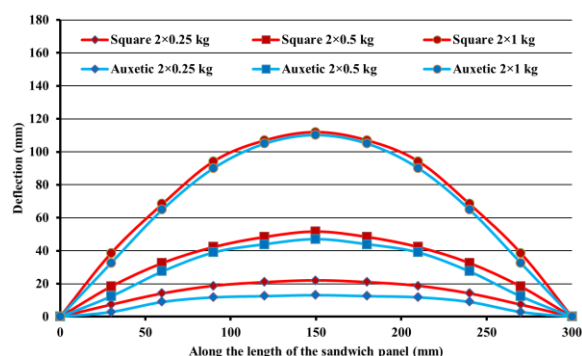
۳-۱- انفجار تک نقطه‌ای

در این قسمت پنل‌های ساندویچی با هسته‌های لانه‌زنبوری آگزتیک و مربعی تحت بارگذاری انفجاری تک نقطه‌ای قرار گرفته است. بدین صورت که بارهای انفجاری ۰/۵، ۱ و ۲ کیلوگرم در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از پنل ساندویچی منفجرشده و اثرات انفجار روی جابجایی پنل‌های ساندویچی با توپولوژی‌های مذکور ارزیابی شده است. شکل ۱۰ و ۱۱ میزان جابجایی صفحات جلو و عقب پنل ساندویچی تحت شرایط

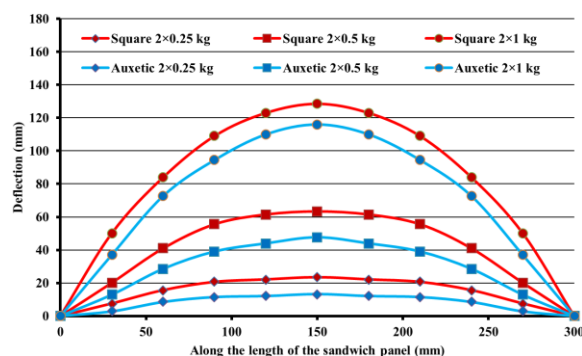
شکل (۱۱): نمودار حداکثر جابجایی و جابجایی نرمال شده صفحه عقبی پنل‌های ساندویچی در بارگذاری تک نقطه‌ای.



شکل (۱۲): مقایسه جابجایی صفحه جلویی پنل ساندویچی با هسته آگزتیک و مربعی تحت بارگذاری انفجاری هم‌زمان دونقطه‌ای در $d=8\text{ cm}$.

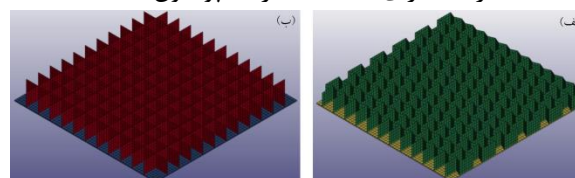


شکل (۱۳): مقایسه جابجایی صفحه عقبی پنل ساندویچی با هسته آگزتیک و مربعی تحت بارگذاری انفجاری هم‌زمان دونقطه‌ای در $d=8\text{ cm}$.

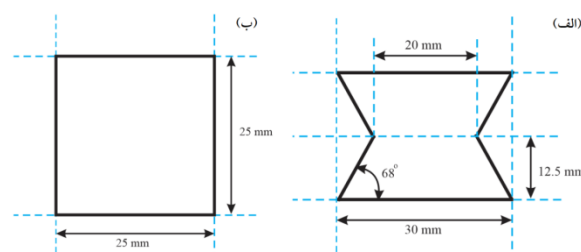


شکل (۱۴): مقایسه جابجایی صفحه جلویی پنل ساندویچی با هسته آگزتیک و مربعی تحت بارگذاری انفجاری هم‌زمان دونقطه‌ای در $d=10\text{ cm}$.

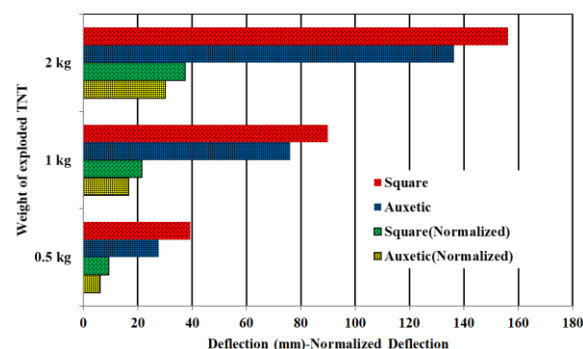
شکل (۷): حرکت گره‌ها در پنل‌های ساندویچی با هسته آگزتیک برای محاسبه ضریب پواسون [۴۱].



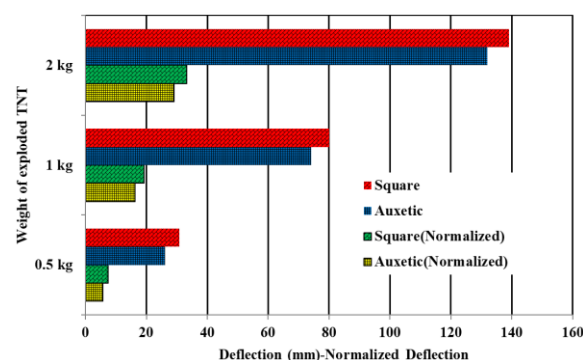
شکل (۸): نمایی از توپولوژی‌های شبیه‌سازی شده برای هسته پنل ساندویچی: (الف) آگزتیک؛ (ب) مربعی.



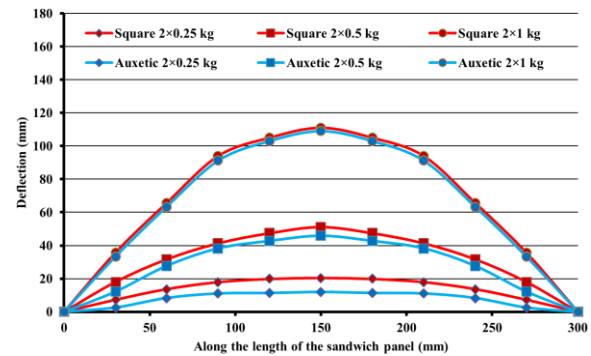
شکل (۹): جزئیات اندازه‌گذاری هر کدام از خانه‌های هسته پنل ساندویچی: (الف) آگزتیک؛ (ب) مربعی.



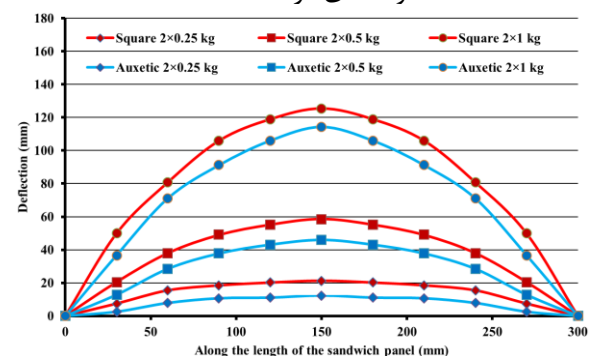
شکل (۱۰): نمودار حداکثر جابجایی و جابجایی نرمال شده صفحه جلویی پنل‌های ساندویچی در بارگذاری تک نقطه‌ای.



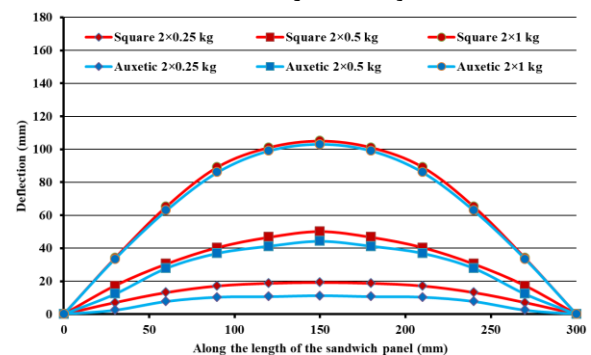
آگزتیک از پنل مذکور با هسته مربعی کمتر ارزیابی شده است. به‌گونه‌ای که مقدار جابجایی در بارگذاری دفعی هم‌زمان دونقطه‌ای در بهترین حالت ۴۵/۳ درصد و در پایین‌ترین وضعیت ۸/۷ درصد برای صفحات جلویی کاهش یافته است. این در حالی است که مقدار کاهش پارامتر مذکور برای صفحه عقبی در بیشترین حالت ۴۱/۶ و در کمترین حالت ۱/۶ درصد ارزیابی شده است. ضریب پواسون منفی و فشرده شدن سلول‌های هسته آگزتیک در زمان اعمال بارگذاری، ازجمله دلایل عملکرد مطلوب این نوع توپولوژی هسته محسوب شده که باعث جابجایی کمتر آن در بارگذاری‌های مذکور شده است. جزئیات درصد مقدار کاهش جابجایی برای پنل‌های ساندویچی مطالعاتی، در جدول ۲ آورده شده است. بر طبق بررسی‌های انجام‌شده عملکرد پنل ساندویچی با هسته آگزتیک در بارگذاری‌های کوچک بسیار بهتر از هسته مربعی ارزیابی شده است. با افزایش وزن بارهای انفجاری در هر دو حالت انفجار تک‌نقطه‌ای و دونقطه‌ای درصد کاهش جابجایی صفحات جلویی و عقبی پنل ساندویچی کاهش می‌یابد. تغییرات فاصله بین بارهای انفجاری، تأثیرات متفاوتی روی صفحات جلو و عقبی می‌گذارد. پاسخ صفحات جلویی به تغییر فاصله بارهای انفجاری مانند حالت تک‌نقطه‌ای بوده و همان‌طور که در جدول بالا مشخص است، درصد کاهش جابجایی صفحه جلویی در پنل ساندویچی آگزتیک نسبت به مربعی با افزایش فاصله بارهای انفجاری کمتر می‌شود. با بررسی درصد کاهش جابجایی صفحه عقبی می‌توان به این مهم دست یافت که با توجه به هندسه هسته آگزتیک، مقدار تغییر شکل هسته در هنگام وارد شدن ضربات انفجاری کمتر بوده و از این‌رو درصد کاهش جابجایی کلی پنل ساندویچی کاهش می‌یابد؛ اما با افزایش فاصله بین بارهای انفجاری به‌تدریج درصد کاهش جابجایی صفحه عقبی پنل ساندویچی بیشتر می‌شود. توضیح اینکه درصد کاهش جابجایی صفحه عقبی با هسته آگزتیک نسبت به مربعی، در اعمال بارگذاری انفجاری دونقطه‌ای ۰/۵ کیلوگرمی در فاصله ۱۲ سانتی‌متری بارهای انفجاری با یکدیگر، تقریباً ۲/۹ درصد نسبت بارگذاری مشابه در فاصله ۸ سانتی‌متری بیشتر ارزیابی شده است.



شکل (۱۵): مقایسه جابجایی صفحه عقبی پنل ساندویچی با هسته آگزتیک و مربعی تحت بارگذاری انفجاری هم‌زمان دونقطه‌ای در $d=10$ cm.



شکل (۱۶): مقایسه جابجایی صفحه جلویی پنل ساندویچی با هسته آگزتیک و مربعی تحت بارگذاری انفجاری هم‌زمان دونقطه‌ای در $d=12$ cm.



شکل (۱۷): مقایسه جابجایی صفحه عقبی پنل ساندویچی با هسته آگزتیک و مربعی تحت بارگذاری انفجاری هم‌زمان دونقطه‌ای در $d=12$ cm.

با بررسی جابجایی صفحات جلو و عقبی پنل‌های ساندویچی با مشخصات نام برده شده تحت شرایط مسئله، عملکرد مطلوب هسته آگزتیک در جذب ضربات انفجاری نسبت به هسته مربعی به‌وضوح مشخص شده است. با توجه به شکل‌های ۱۲ تا ۱۷ در تمام حالات، جابجایی پنل ساندویچی با هسته

استفاده شده است. به این صورت که پنل ساندویچی مورد پژوهش با هسته آگزتیک و مربعی در نرم افزار LS-DYNA طراحی شده و سپس بار انفجاری تک نقطه‌ای و دونقطه‌ای در فاصله ۱۰ سانتی متری از پنل ساندویچی منفجر شده و اثرات این بارگذاری روی جابجایی پنل ساندویچی مورد بررسی قرار گرفته است. وزن بارهای انفجاری در حالت تک نقطه‌ای ۰/۵، ۱ و ۲ کیلوگرم و در حالت دونقطه‌ای ۲ بار ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ کیلوگرمی در نظر گرفته شده است. در مرحله بعد جهت تعیین تأثیر فاصله بارهای انفجاری روی جابجایی پنل‌های ساندویچی مذکور، این بارها در فواصل ۸، ۱۰ و ۱۲ سانتی متری از یکدیگر قرار داده شده و جابجایی صفحات جلو و عقبی پنل ساندویچی بررسی شده است. لذا در حالت کلی مهم ترین نتایج این پژوهش به صورت زیر بیان می گردد:

- استفاده از توپولوژی آگزتیک می تواند مقاومت پنل های ساندویچی را در مقابل بارگذاری های انفجاری افزایش دهد.
- عملکرد پنل ساندویچی با توپولوژی هسته آگزتیک در تمام حالات از پنل مذکور با هسته مربعی بهتر می باشد.
- پنل ساندویچی با هسته آگزتیک بهترین عملکرد را در بارگذاری های کوچک از خود نشان داده است. لذا استفاده از آن برای حفاظت از سازه هایی که تحت این نوع بارگذاری ها قرار می گیرند، اکیداً توصیه می گردد.
- نسبت به جابجایی صفحه جلویی، جابجایی صفحه عقبی پنل ساندویچی با هسته آگزتیک تفاوت کمتری با هسته مربعی دارد.
- تغییر شکل هسته آگزتیک نسبت به هسته مربعی کمتر است.
- با افزایش فاصله بارهای انفجاری درصد کاهش جابجایی صفحه جلویی پنل ساندویچی با هسته آگزتیک نسبت پنل مذکور با هسته مربعی کاهش می یابد.
- کاهش جابجایی پنل ساندویچی در بهترین حالت برای انفجار تک نقطه‌ای ۲۹/۷ درصد و دونقطه‌ای ۴۵/۳ درصد محاسبه شده است.

جدول (۲): درصد کاهش مقدار جابجایی صفحات جلو و عقبی پنل ساندویچی با توپولوژی هسته آگزتیک نسبت به مربعی

بارگذاری	% کاهش جابجایی	
	صفحه عقبی	صفحه جلویی
تک نقطه‌ای	۱۵/۲	۲۹/۷
	۷/۳	۱۵/۴
	۵	۱۲/۶
دونقطه‌ای	۴۰/۷	۴۵/۳
d=8 cm	۸/۸	۲۵/۵
	۱/۶	۱۰/۲
	۴۱/۱	۴۳/۵
d=10 cm	۱۰/۱	۲۴/۷
	۱/۸	۹/۷
	۴۱/۶	۴۱/۷
d=12 cm	۱۱/۷	۲۱/۵
	۱/۹	۸/۹

۴- نتیجه گیری

با توجه به تأثیر امواج انفجار روی یکدیگر، بررسی اثرات انفجار همزمان روی سازه های مختلف بسیار حائز اهمیت است؛ زیرا اثرات بارگذاری انفجاری همزمان دونقطه‌ای ممکن است کمتر یا بیشتر از بارگذاری انفجاری تک نقطه‌ای معادل باشد. از این رو، در این پژوهش اثرات بارگذاری انفجاری همزمان متقارن دونقطه‌ای روی پنل ساندویچی با توپولوژی هسته آگزتیک و مربعی به صورت عددی بررسی شده است. جهت بررسی عددی از نرم افزار تحلیل المان محدود LS-DYNA

exposed to blast loading. *Materials Today: Proceedings*. 2023;87:197-203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.495>.

[9] Haghighi M, Babaei H, Mostofi TM. Dynamic response of thin triangular plates under gaseous detonation loading. *Materials Today Communications*. 2022;31:103423. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103423>.

[10] Ghamarizadeh M, Khodarahmi H, Mirzababaei 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) DOI: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455323.1400.14.4.6.4>.

[11] Li Z. Study on vibration effect of pre-splitting crack in tunnel excavation under thermal explosion loading. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021;28:101401. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021>.

[12] Haghighi M, Babaei H, Mirzababaei Mostofi T. Analytical modeling of triangular plate deflection under gaseous detonation loading. *Aerospace Mechanics*. 2022;18(3):41-52. (In Persian) DOI: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455323.1401.18.3.4.6>.

[13] Mirzababaei Mostofi T, Sayah Badkhor M, Babaei H. Experimental study and regression analysis of free and die forming of circular metallic plates using gas mixture explosion. *Aerospace Mechanics*. 2021;17(2):85-99. (In Persian) DOI: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455323.1400.17.2.6.9>.

[14] Kouzehgaran M, Khodarahmi H, Sadegh Yazdi M, Ziya-Shamami M, Mirzababaei Mostofi T. Female Die Forming of Metallic Plates using Repeated Underwater Explosions. *Aerospace Mechanics*. 2024;20(3):1-16. (In Persian) DOI: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455323.1403.20.3.1.7>.

[15] Haghighi M, Babaei H, Mostofi TM. 3D numerical investigation of the detonation wave propagation influence on the triangular plate deformation using finite rate chemistry model of LS-DYNA CESE method. *International Journal of Impact Engineering*. 2022;161:104108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.104108>.

[16] Mohammadi Hooyeh H, Naddaf Oskouei A, Mirzababaei Mostofi T, Vahedi K. Experimental and numerical investigation of trapezoidal corrugated core sandwich panels under oblique blast loading.

لذا در حالت کلی می‌توان گفت با توجه به مقاومت موضعی مطلوب هسته آگزتیک در جذب ضربات، با توسعه استفاده از این نوع هسته در ساخت پنل‌های ساندویچی، مقاومت بالاتر، ایمنی بهتر و جابجایی کمتری را می‌توان اکتساب نمود.

۵- مراجع

[1] Birman V, Kardomateas GA. Review of current trends in research and applications of sandwich structures. *Composites Part B: Engineering*. 2018;142:221-40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.01.027>.

[2] Liu J, Chen T, Zhang Y, Wen G, Qing Q, Wang H, et al. On sound insulation of pyramidal lattice sandwich structure. *Composite Structures*. 2019;208:385-94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.10.013>.

[3] Lee WG, Kim J-S, Sun S-J, Lim J-Y. The next generation material for lightweight railway car body structures: Magnesium alloys. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2018;232(1):25-42. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409716646140>.

[4] Wang Z. Recent advances in novel metallic honeycomb structure. *Composites Part B: Engineering*. 2019;166:731-41. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.02.011>.

[5] Seyman S, Ebrahimzade A. Numerical investigation of the effect of geometry on the energy absorption rate of sandwich panels under blast loading. *Journal of Advanced Defense Science & Technology*. 2020;11(4):347-55. (In Persian) DOI: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26762935.1399.11.4.1.6>.

[6] Langdon GS, von Klemperer CJ, Sinclair GM. Blast response of sandwich structures: The influence of curvature. *Dynamic Deformation, Damage and Fracture in Composite Materials and Structures*: Elsevier; 2023. p. 337-59. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823979-7.00013-2>.

[7] Dharmasena KP, Wadley HN, Xue Z, Hutchinson JW. Mechanical response of metallic honeycomb sandwich panel structures to high-intensity dynamic loading. *International Journal of Impact Engineering*. 2008;35(9):1063-74. DOI: <https://doi.org/10.16/j.ijimpeng.2007.06.008>.

[8] Rai M, Chawla A, Mukherjee S. Parametric study of re-entrant honeycomb cored auxetic sandwich panel

- [27] Mohottige NW, Wu C, Hao H. Characteristics of free air blast loading due to simultaneously detonated multiple charges. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 2014;14(04):1450002. **DOI:** <http://dx.doi.org/10.1142/S0219455414500023>.
- [28] Bai F, Liu Y, Yan J, Xu Y, Shi Z, Huang F. Study on the characteristics 1303 of blast loads due to two simultaneous detonated charges in real air. *International Journal of Non-1304 Linear Mechanics*. 2022;146(104108):1305. **DOI:** <https://doi.org/10.016/j.ijnonlinmec.2022.104108>.
- [29] Patel M, Patel S. Novel design of honeycomb hybrid sandwich structures under air-blast. *Journal of Sandwich Structures & Materials*. 2022;24(8):2105-23. **DOI:** <https://doi.org/10.1177/10996362221127967>.
- [30] Gaur B, Patel M, Patel S. Strain rate effect on CRALL under high-velocity impact by different projectiles. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2023;45(2):103. **DOI:** <https://doi.org/10.1007/s40430-023-04031-1>.
- [31] Patel M, Patel S, Ahmad S. Blast analysis of efficient honeycomb sandwich structures with CFRP/Steel FML skins. *International Journal of Impact Engineering*. 2023;178:104609. **DOI:** <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023>.
- [32] Gaur B, Patel M, Patel S. Strain rate effect analysis of hybrid composites under the high-velocity impact. *Materials Today: Proceedings*. 2023;72:2811-6. **DOI:** <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.082>.
- [33] Haghighoo M, Babaei H, Mirzababaei 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>.
- [34] Bakhshan H, Oñate E, Carbonell i Puigbó JM. A Review of the Constitutive Modelling of Metals and Alloys in Machining Process. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2024;31(3):1611-58. **DOI:** <https://doi.org/10.007/s11831-023-0026-x>.
- [35] Geng G, Ding D, Duan L, Jiang H. A modified Johnson-Cook model of 6061-T6 Aluminium profile. *Australian Journal of Mechanical Engineering*. 2022;20(2):516-26. **DOI:** <https://doi.org/10.1080/14484846.2020.1721966>.
- 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] Sawant R, Patel M, Patel S. Numerical analysis of honeycomb sandwich panels under blast load. *Materials Today: Proceedings*. 2023;87:67-73. **DOI:** <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.547>.
- [18] Ghate N, Goel MD. Influence of core topology on blast mitigation application of multi-layered honeycomb core sandwich panel. *Materials Today Communications*. 2023;36:106531. **DOI:** <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023>.
- [19] Bohara RP, Linforth S, Ghazlan A, Nguyen T, Remennikov A, Ngo T. Performance of an auxetic honeycomb-core sandwich panel under close-in and far-field detonations of high explosive. *Composite Structures*. 2022;280:114907. **DOI:** <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021>.
- [20] Kiakojouri F, Tavakoli HR, Sheidaii MR, De Biagi V. Numerical analysis of all-steel sandwich panel with drilled I-core subjected to air blast scenarios. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2022;7(5):320. **DOI:** <https://doi.org/10.1007/s41062-022-00912-x>.
- [21] ASCE. American Society of Civil Engineers(ed.) ASCE standard. Reston, VA: /Structural Engineering Institute.
- [22] Karlos V, Solomos G. Calculation of blast loads for application to structural components. Luxembourg: Publications Office of the European Union. 2013;5. <https://core.ac.uk/download/pdf/38628317.pdf>
- [23] Gilsanz R, Hamburger R, Barker D, Smith JL, Rahimian A. Steel design guide 26: Design of blast resistant structures: American Institute of Steel Construction.; 2013.
- [24] UFC. 3-340-02 Structures to resist the effects of accidental explosions. Department of Defense, USA. 2008.
- [25] Mazaheri K, H. Assadollahi. Determination of the parameters in HOM and BKW equations of state for detonation products. *Journal of Advanced Materials in Engineering*. 2022;21(2):73-89. (In Persian) **DOR:** <https://dori.net/dor/20.1001.1.22287698.1381.21.2.6.0>.
- [26] Zaghoul A, Remennikov A, Uy B. Enhancement of blast wave parameters due to shock focusing from multiple simultaneously detonated charges. *International Journal of Protective Structures*. 2021;12(4):541-76. **DOI:** <https://doi.org/10.1177/20414196211033310>.

[36] Hyde D. CONWEP: Conventional weapons effects program. US Army Engineer Waterways Experiment Station, USA. 1991;2.

[37] Patel S, Patel M. The efficient design of hybrid and metallic sandwich structures under air blast loading. Journal of Sandwich Structures & Materials. 2022;24(3):1706-25. DOI: <https://doi.org/10.177/10996362211065748>.

[38] Dev L-D. LS-DYNA®-Theory Manual. LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY (LST), AN ANSYS COMPANY. 1992.

[39] Saxena KK, Das R, Calius EP. Three decades of auxetics research– materials with negative Poisson's ratio: a review. Advanced Engineering Materials. 2016;18(11):1847-70. DOI: <https://doi.org/10.002/adem.201600053>.

[40] Evans KE, Alderson A. Auxetic materials: functional materials and structures from lateral thinking! Advanced materials. 2000;12(9):617-28. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)521-4095\(200005\)12:9%3C617::AID-ADMA617%3E3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/(SICI)521-4095(200005)12:9%3C617::AID-ADMA617%3E3.0.CO;2-3).

[41] Qi C, Remennikov A, Pei L-Z, Yang S, Yu Z-H, Ngo TD. Impact and close-in blast response of auxetic honeycomb-cored sandwich panels: Experimental tests and numerical simulations. Composite structures. 2017;180:161-78. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.020>.