



A Study on the Explosive Resistance of Sandwich Panels with a New Negative Poisson Bowtie Core

Hossein Khosravi^{1*}, Mojtaba Lezghi-Nazargah², Ali Abedi³

¹Correspondence: Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran. Email Address: h.khosravi@hsu.ac.ir

²Associate Professor, Department of Civil Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran. Email Address: m.lezgy@hsu.ac.ir

³MSc, Department of Civil Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran. Email Address: aliabedi.hsu@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 22 May 2025

Received in revised form: 28 September 2025

Accepted: 23 November 2025

Available online: 20 January 2026

Keywords:

Antielastic

Finite Elements

Explosion

Sandwich Panel

ABSTRACT

The selection of materials, geometry, and structures resistant to explosive loading plays an important role in the stability of the structure and minimizing human and financial losses in critical situations such as war. Therefore, in this study, in order to investigate the impact and resistance of sandwich panels with traditional negative Poisson bowtie cores against explosive loading and with the aim of reducing damage, old sandwich panels have been modeled in the Abaqus finite element software. And then, inspired by the traditional bowtie structure, a new symmetrical lattice structure with negative Poisson ratio and used as the core of a sandwich panel between two metal surfaces has been designed and modeled. Two main criteria, the internal angle and the thickness of the sheet forming the acoustic microstructures, have been evaluated as effective factors in the explosive resistance of sandwich panels. The explosive resistance of sandwich panel samples with traditional and new cores has been investigated under a load of 300 grams of TNT at a distance of 10 centimeters from the center of the upper face of the sandwich panel. The results indicate a decrease in the negative Poisson's ratio due to an increase in the thickness of the bowtie cell sheet and an increase in the internal angle of the microstructures forming the core. The highest value of the negative Poisson's ratio, 0.514, was obtained in the internal sample with an internal angle of 50 degrees and a sheet thickness of 0.6 mm. The results indicate a significant decrease in the stress on the foundation and an increase in the response time of the structure due to an increase in the negative Poisson's ratio and isotropic performance. The maximum stress on the foundation in the sample with an isotropic internal angle of 50 degrees decreased by more than one third compared to the sample with the same traditional angle. The reduction in stress on the foundation at an internal angle of 60 degrees was more noticeable in the traditional and new cores. The findings of this study can be a good guide for developers and researchers active in the field of structural reinforcement.

Cite this article: H. Khosravi, M. Lezghi-Nazargah, and A. Abdi, "A Study on the Explosive Resistance of Sandwich Panels with a New Negative Poisson Bowtie Core," Journal of Passive Defence, vol. 16, no. 4, pp. 57-69, 2026.

DOR: [20.1001.1.20086849.1404.16.4.1.1](https://doi.org/10.1001.1.20086849.1404.16.4.1.1)



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



Publisher: Imam Hossein University.

Introduction

Optimization of structures is an important field in civil engineering. Researchers have always used two strategies to optimize structures in order to reduce costs and materials: increasing the strength of materials and reducing the weight of the structure. Therefore, sandwich panels are widely used materials in the civil engineering industry due to their acceptable strength and lightness. However, these elements have little resistance to out-of-plane forces due to their low thickness. Today, with the increasing probability of war and explosion, the need to improve the mechanical properties of sandwich panels is felt more than ever. In this research, an attempt has been made to analyze and improve the explosive resistance of sandwich panels using the auxetic structure as the core. The new negative Poisson structure, which is inspired by the traditional re-entrant auxetic structure, has a two-way function and is lighter than the traditional auxetic structure.

Methodology

At first, a traditional re-entrant axetic core was simulated in the Abaqus software, inspired by the traditional structure, a new two-way re-entrant negative Poisson structure was simulated. Sandwich panels created with traditional and new aluminum alloy cores were tested under different explosive loadings and variable distances to clarify the performance of the sandwich panel and to investigate hazard scenarios.

The samples were placed on a concrete foundation and the amount of energy transferred from the sandwich panel to the foundation was evaluated.

Results and Discussion

By comparing the maximum contact force in the new and traditional sandwich panels, we find that the new core has performed much better in damping explosive energy. In such a way that the maximum contact force in the new sandwich panel sample under a load of 1200 grams of explosive with a distance of 300 mm was more than 50 percent lower than the traditional sandwich panel sample with the same amount of explosive and a distance of 100 mm.

By examining the time history of the maximum reaction force, we notice a significant decrease in the support reaction along with the blast wave and a longer reaction response.

Looking closely at the graphs for the four models with new and old internal angles of 50 and 60, we notice a reduction of more than 8 times in the sample with an internal angle of 50 degrees and more than 6 times the maximum simulated support reaction in the new and traditional core.

Also, the new core with an angle of 50 degrees has resulted in a 6 times reduction in the total support reaction force in the 2-millisecond period of study compared to the traditional sample with the same internal angle. These numbers reach more than 5 times the internal angle of 60 degrees.

Conclusion

The results obtained include changes in Poisson's ratio, maximum stress on the foundation, maximum depression of the face facing the blast wave in the sandwich panel, total support reaction and maximum support force. The effect of the two-way performance in the new auxetic core has had a significant impact on the resistance of the sandwich panel to external forces perpendicular to the sandwich panel plane. The weight of the new core is lighter than the traditional auxetic core due to the hollow structure.

مطالعه‌ای بر مقاومت انفجاری ساندویچ پنل با هسته‌ی جدید پاپیونی پواسون منفی

حسین خسروی^{۱*}، مجتبی لژگی نظرگاه^۲، علی عابدی^۳

^۱ استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران (نویسنده مسئول). رایانامه: h.khosravi@hsu.ac.ir

^۲ دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران. رایانامه: m.lezgy@hsu.ac.ir

^۳ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران. رایانامه: aliabedi.hsu@gmail.com

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۰۶

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۲

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۱۰/۳۰

کلیدواژه‌ها:

پادکشان

اجزا محدود

انفجار

ساندویچ پنل

چکیده

انتخاب مصالح، هندسه و ساختارهای مقاوم در برابر بارگذاری انفجاری، نقش مهمی در پایداری سازه و به حداقل رسیدن تلفات جانی و مالی در شرایط بحرانی مانند جنگ ایفا می‌کند. از این رو در این پژوهش به منظور بررسی میزان تاثیر و مقاومت ساندویچ پنل با هسته پاپیونی پواسون منفی سنتی در برابر بارگذاری انفجار و با هدف کاهش خسارات، اقدام به مدل‌سازی ساندویچ پنل‌های قدیمی در نرم افزار المان محدود آباکوس شده است. و در ادامه با الهام از ساختار پاپیونی سنتی اقدام به طراحی و مدل‌سازی ساختار مشبک و متقارن جدیدی با نسبت پواسون منفی و استفاده به عنوان هسته یک ساندویچ پنل در میان دو رویه فلزی شده است. دو معیار اصلی زاویه داخلی و ضخامت ورق سازنده ریز ساختارهای آگستیک به عنوان عوامل موثر در مقاومت انفجاری ساندویچ پنل مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. مقاومت انفجاری نمونه ساندویچ پنل‌ها با هسته سنتی و جدید تحت بارگذاری ۳۰۰ گرم TNT در فاصله ۱۰ سانتیمتری از مرکز وجه بالایی ساندویچ پنل مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج حاکی از کاهش نسبت پواسون منفی در اثر افزایش ضخامت ورق سلول‌های پاپیونی و افزایش زاویه داخلی ریزساختارهای تشکیل دهنده هسته بوده است. بیشترین مقدار نسبت پواسون منفی ۰/۵۱۴ - در نمونه داخلی با زاویه داخلی ۵۰ درجه و ضخامت ورق ۰/۶ میلی‌متر به دست آمده است. نتایج نشان‌دهنده کاهش چشمگیر میزان تنش روی فونداسیون و افزایش زمان پاسخ سازه در اثر افزایش میزان نسبت پواسون منفی و عملکرد ایزوتروپیک می‌باشد. بیشینه میزان تنش روی فونداسیون در نمونه با زاویه داخلی ۵۰ درجه ایزوتروپیک کاهش بیش از یک سوم نسبت به نمونه‌ای با همین زاویه سنتی داشته است. میزان کاهش تنش روی فونداسیون در زاویه داخلی ۶۰ درجه در هسته سنتی و جدید محسوس تر بوده است. یافته‌های این پژوهش می‌تواند راهنمای خوبی برای توسعه دهندگان و پژوهشگران فعال در عرصه مقاوم‌سازی سازه باشد.

استناد: خسروی، حسین، لژگی نظرگاه، مجتبی، عابدی، علی، "مطالعه‌ای بر مقاومت انفجاری ساندویچ پنل با هسته‌ی جدید پاپیونی پواسون منفی"، نشریه

پدافند غیرعامل، دوره ۱۶، شماره ۴، صفحات ۶۹-۵۷، ۱۴۰۴. [DOR: 20.1001.1.20086849.1404.16.4.1.1](https://doi.org/10.1001.1.20086849.1404.16.4.1.1)

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



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

۱- مقدمه

ساختاری برای جذب انرژی کرده‌اند. آن‌ها توانستند با استفاده از موده‌های کرنش و تغییر شکل‌های کنترل شده تا ۶۸/۵ درصد افزایش جذب انرژی را تجربه کنند.

فنگ ژیان و همکاران [۴] در قالب مطالعه‌ای به‌عنوان مقاومت در برابر انفجار پانل‌های ساندویچی با هسته لانه زنبوری ساخته شده از منحنی‌های سینوسی سه بعدی با نسبت پواسون منفی اقدام به بررسی مقاومت ساندویچ پنل‌ها در برابر موج انفجار کرده‌اند. نتایج حاکی از جذب بالاتر انرژی در صورت انحراف کمتر ورق‌های سینوسی به علت تبدیل هر چه بیشتر نیروهای خارج از صفحه به نیروهای داخل صفحه بوده است.

ژن ژو و همکاران [۵] ساندویچ پنل با هسته‌های لانه زنبوری بازگردانده شده را که به صورت زنجیروار کنار هم قرار گرفته شده را تحت بارگذاری انفجاری قرار داده‌اند و نتایج را در قالب مقاله‌ای با عنوان مرتبط منتشر کرده‌اند. افزایش ۲۵/۷ درصد مقاومت بیشتر هسته‌های زنجیر شده نسبت به نمونه‌های سنتی از دستاوردهای این مطالعه بوده است.

چی و همکاران مقاومت ساندویچ پنل کامپوزیتی را در برابر بارگذاری ضربه مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها از فوم آلومینیوم به‌عنوان هسته^۱ CSP استفاده کردند. [۶]

لی و همکاران [۷] هسته‌های لانه زنبوری ساخته شده از آلومینیوم را برای هسته ساندویچ پنل انتخاب کردند و عملکرد این ساختار را در اثر انفجار به روش شبیه سازی عددی مورد ارزیابی قرار دادند.

دارماسنا و همکاران [۸] مطالعه مشابهی را روی هسته آلومینیوم مشبک مربعی انجام دادند. آن‌ها با استفاده از آزمایش و شبیه سازی المان محدود توانستند میزان فرورفتگی ورق پشتی ساندویچ پنل با هسته‌ی مربعی را اندازه گیری کنند. نتایج حاکی از کاهش میزان فرورفتگی ۶۰ درصد در بارگذاری با پالس کم و ۱۰ درصد در بارگذاری با پالس زیاد بود.

لیو و همکاران [۹] ساختار لانه زنبوری مرکب جدیدی را طراحی کردند که نسبت به ساختار لانه زنبوری ساده مقاومت بهتری در برابر انفجار دارد.

وانگ و همکاران [۱۰] مطالعه‌ای در مورد اثرات ضربه روی

۱-۱- چهارچوب نظری و پیشینه

وسایل نقلیه، ساختمان‌ها و تجهیزات مهم در بیشتر موارد از راه دور و توسط مواد منفجره مورد حمله و خرابی قرار گرفته‌اند. از این رو به‌منظور محافظت هر چه بیشتر نیاز به ارائه مدل‌ها و مکانیزم‌های مقاوم در برابر بارگذاری انفجار هستیم.

ساندویچ پنل‌های کامپوزیتی از لایه مقاوم خارجی برای مقاومت اولیه و هسته‌ی میانی تشکیل شده‌اند. هسته وظیفه انتقال، میرایی و استهلاک انرژی به پانل داخلی را دارد.

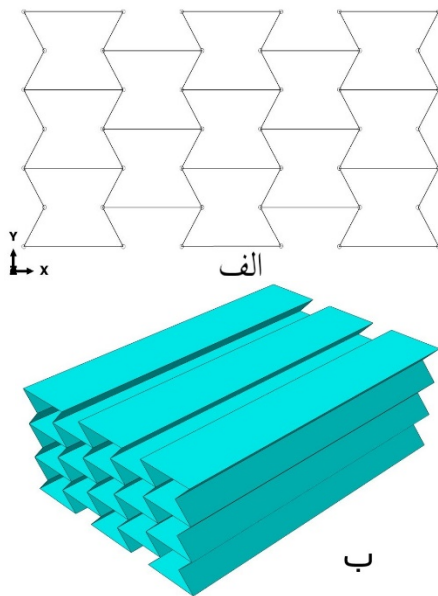
نوع ساختار مشبک و خواص مکانیکی هسته از مهمترین پارامترها در مقاومت ساندویچ پنل و کاهش هزینه و وزن بوده است.

رن و همکاران [۱۱] مطالعه‌ای تحت عنوان افزایش جذب انرژی ساختار لانه زنبوری ستاره‌ای شکل با استفاده از اثر نسبت پواسون منفی تحت ضربه با سرعت بالا انجام دادند. آن‌ها از ساختار ستاره‌ای استفاده کردند و دریافتند در آزمایش ضربه با سرعت پایین به علت خاصیت پواسون منفی جذب انرژی به خوبی انجام می‌شود؛ اما بعد از فشرده شدن نمونه نسبت پواسون از مقدار منفی به مثبت میل کرده و باعث کاهش عملکرد این ساختار در آزمایش‌های سرعت بالا می‌شود. آن‌ها با کاهش زاویه دیواره‌ها و بررسی تاثیر ضخامت دیواره توانستند ویژگی پواسون منفی را حفظ کرده و کارایی نمونه در جذب انرژی در سرعت‌های بالاتر را به‌دست آوردند.

ژن شن [۲] و همکاران با استفاده از صفحات موج دار فلزی در تیرهای ساندویچی با تکیه گاه‌های لانه زنبوری رفتار این تیرها را در برابر ضربه با سرعت پایین در حدود ۵۰ درصد افزایش داده‌اند. این نتیجه به سبب مقاومت فشاری-برشی در اثر ترکیب ساختار لانه زنبوری و ورق‌های موجدار پدید آمده است. در سرعت‌های بالاتر به علت افزایش تغییر شکل و خرد شدن، مکانیزم جذب انرژی کارایی خود را از دست می‌دهد.

ژانگ و همکاران [۳] با الهام از ساختار طبیعی مانند دم اسب، لاک لاکپشت و خارهای جوجه تیغی اقدام به ساخت لوله‌های فلزی جدار نازک از جنس فولاد ضد زنگ ۳۱۶ ال به‌منظور ایجاد

¹ Composite sandwich panel



شکل (۱): ساختار پاپیونی سنتی (الف) و ساختار پاپیونی سنتی اکستروود شده (ب)

برای ایجاد ساختار پاپیونی جدید ابتدا نوارهایی به شکل نیم پاپیون در اندازه دلخواه ترسیم شده و به منظور تقارن در شکل و رفتار مکانیکی به اندازه یک سوم وجه بالایی پاپیون اکستروود شده‌اند. شکل (۲) الف

سپس نوارها در دو راستا متعامد روی هم جایگذاری شده‌اند. شکل (۲) ب. به این طریق یک نیم لایه پاپیونی تشکیل شده است. شکل (۲) ج.

برای به دست آوردن یک لایه پاپیونی از ساختار آگستیک جدید بایستی نیم لایه بعدی با 180° درجه چرخش در زیر نیم لایه نخست قرارگیرد. شکل (۳)

نحوه اتصال نوارها، وجود تنش‌های پس ماند ناشی از عملیات حرارتی مانند نقطه جوش و قلع کاری، وجود زوایای حاده و ایجاد خستگی ناشی از عملیات خم کاری از موارد حائز اهمیت در عملیات ساخت این مدل هسته آگستیک می باشد.

به منظور عملکرد پادکشسانی و جمع شدگی هرچه بهتر ریزساختارها، در ساخت هسته فضاهای خالی در دو راستا تعبیه شده است؛ که موجب کاهش وزن هسته جدید به میزان ۶۱ درصد نسبت به هسته پواسون منفی سنتی شده است. و از مقدار $31/87$ کیلوگرم برای هسته سنتی ساخته شده از ورق به ضخامت $0/5$ میلیمتر به مقدار $12/84$ کیلوگرم برای هسته جدید با ضخامت یکسان و زاویه داخلی 50° درجه تنزل یافته است.

ساندویچ پنل‌ها انجام دادند. آن‌ها دریافتند که ساندویچ پنل‌های دولایه مقاومت ضربه‌ای بهتری نسبت به ساندویچ پنل‌های یک لایه دارند.

کوی و همکاران [۱۱] با بررسی رفتار مکانیکی ساندویچ پنل با هسته‌ی توری مربعی توانستند یک مدل تحلیلی برای پیش بینی پاسخ مکانیکی این مدل ساندویچ پنل‌ها ارائه دهند.

لیکز [۱۲] اولین ساختار پواسون منفی را در سال ۱۹۸۷ ابداع کرد. امروزه ساختارها و مواد زیادی ساخته شده‌اند که رفتار پواسون منفی و ویژگی‌های خوبی در جذب انرژی و ارتعاش دارند. مدل شبیه سازی شده ورونوی دونگ لی و همکاران [۱۳] از جمله ساختارهایی است که رفتار پواسون همسانگردی در برابر نیروهای خارجی از خود نشان می دهند. هسته‌ی ساندویچ پنل مورد مطالعه از فشرده سازی فوم همسانگرد و تکنیک رشته رشته کردن به دست آمد. آن‌ها سپس ساندویچ پنل‌هایی با هسته‌ی ورونوی و رویه‌های فلزی ساده را تحت اثر انفجار قرار دادند و دریافتند که هر میزانی که نسبت پواسون منفی کاهش پیدا کند مقاومت انفجاری افزایش پیدا می کند. نتایج حاکی از افزایش ۵۰ درصدی میزان مقاومت انفجاری ساندویچ پنل‌های با هسته ورونوی نسبت به ساندویچ پنل‌های سنتی بوده است.

وارون و همکاران [۱۴] اقدام به بررسی اثرات تخلخل بر خواص مکانیکی فوم ورونوی سلول باز در اثر بارگذاری تک محوره کرده‌اند.

ژانگ و همکاران [۱۵] خواص تسلیم فوم ورونوی سلول بسته را مورد ارزیابی قرار داده‌اند.

۱-۲- معرفی ساختار آگستیک سنتی و جدید

ساختار پاپیونی سنتی از پاپیون‌های کنار هم قرار گرفته در صفحه و اکستروود شدن تولید شده‌اند شکل (۱) این ساختار با توجه به زاویه داخلی ابعاد پاپیون‌ها، ضخامت ورق سازنده دار و جنس ساختار می‌تواند خواص مکانیکی متفاوتی داشته باشد. ساختار آگستیک پاپیونی تنها در صفحه پاپیون می‌تواند رفتار آگستیک داشته باشد و ساختار در راستای اکستروود شده هیچ گونه جمع شدگی را تجربه نخواهد کرد.

¹ Extrusion

۲- روش تحقیق

۲-۱- خواص مصالح

در این مطالعه از جنس آلیاژ آلومینیوم برای شبیه‌سازی هسته آگستیک و فولاد برای لایه‌های خارجی ساندویچ پل استفاده شده است. نمونه ساندویچ پل بر روی یک فونداسیون از جنس بتن جایگذاری شده است.

فاز پلاستیک و خرابی آلیاژ آلومینیوم با استفاده از تکنیک جانسون کوک تعریف شده است. از آنجایی که مدل جانسون-کوک فاز پلاستیک ماده را تحت شرایط کرنشی، دمایی و نرخ کرنشی مختلف به خوبی تعریف می‌کند، بطور گسترده‌ای برای شبیه‌سازی المان‌های فلزی در نرم‌افزار آباکوس مورد استفاده قرار می‌گیرد. معیار جانسون-کوک برای فاز پلاستیک از یک معادله‌ی سه جزئی تشکیل شده است [۱۶].

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

این معادله از سه بخش پیرامونی مجزا تشکیل شده است که به ترتیب سخت‌شدگی کرنشی، سخت‌شدگی نرخ کرنشی و عامل نرم‌شدگی دمایی را لحاظ می‌کند.

در رابطه‌ی فوق σ میزان تنش المان، ε کرنش المان، $\dot{\varepsilon}$ نرخ کرنش مؤثر، $\dot{\varepsilon}_0$ نرخ کرنش مرجع، T دمای فعلی المان، T_w دمای محیط، T_m دمای ذوب فلز است. و مقادیر A, B, C, n, m ضرایب و ثوابت معیار جانسون کوک می‌باشند که توسط آزمایشاتی مانند آزمایش فشارهاپکینسون محاسبه و تعیین می‌شوند.

لازم به ذکر است ضرایب فوق هر کدام مفهوم و مشخصه‌ای از رفتار ماده را مشخص می‌کنند.

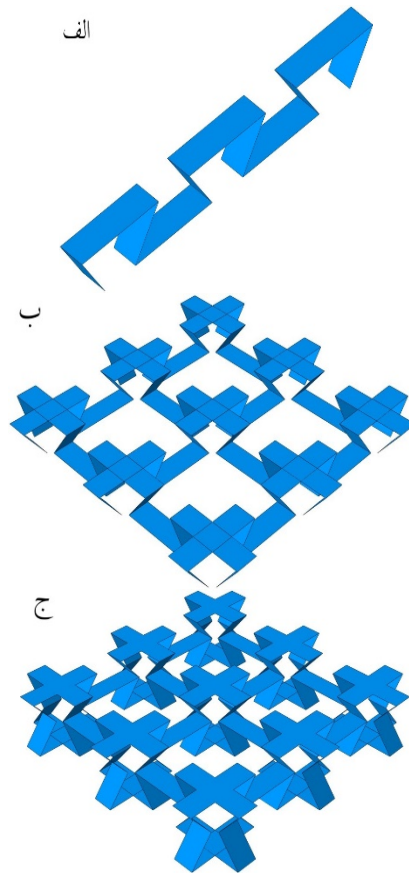
بدین‌صورت که فاکتور A مشخصه تنش تسلیم ماده، B فاکتور کرنش سختی، C فاکتور حساسیت به نرخ کرنش می‌باشد. n ضریب کرنش سختی و m ضریب گرمایی مربوط به نرم‌شدن است.

در فاز خرابی رابطه جانسون کوک توسط فرمول زیر تعیین شده است. [۱۶]

$$\begin{aligned} \varepsilon_D^{-PL} = & \left[d_1 + d_2 e^{-d_3 P/q} \right] \left[1 + d_4 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}^{PL}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \\ & \left[1 + d_5 \left(\frac{t - tr}{t_m - tr} \right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

در رابطه‌ی بالا ε_D^{-PL} کرنش پلاستیک در ابتدای فاز خرابی را نشان داده و ضرایب d_1 تا d_5 ضرایبی برای تعریف شکست بوده است.

الف



شکل (۲): نوار نیم پاپیون (الف)، یک نیم لایه آگستیک متقارن

جدید (ب)، یک لایه پاپیونی جدید (ج)

به‌منظور بررسی رفتار مکانیکی ساختار آگستیک جدید در این مقاله یک ساندویچ پل کامپوزیت متشکل از دو پوسته فلزی و یک هسته از ساختار فلزی آگستیک جدید مدل‌سازی و تحلیل شده است. برای مشخص شدن هر چه بهتر رفتار مکانیکی این ساندویچ پل با ساندویچ پل دیگری با هسته آگستیک سنتی مقایسه‌ای ارائه شده است.

در هر دو نمونه ساندویچ پل سنتی و جدید شرایط بارگذاری یکسان و شامل یک جرم ۳۰۰ گرم TNT در فاصله ۱۰ سانتیمتری وجه بالای نمونه بوده است.

لازم به ذکر است این مطالعه علاوه بر تاثیر تفاوت در نوع آگستیک متغیرهای دیگری نظیر زاویه داخلی آگستیک جدید و سنتی (a) همچنین ضخامت ورق سازنده این نمونه‌ها (t) را مورد ارزیابی قرار داده است.

نتایج نشان‌دهنده افزایش بیش از ۶ برابری مقاومت انفجاری ساندویچ پل به علت رفتار پواسون منفی و جمع‌شدگی در دو جهت عمود بر راستای بارگذاری در مقابل ساندویچ پل با هسته آگستیک سنتی با جمع‌شدگی یک جهته بوده است.

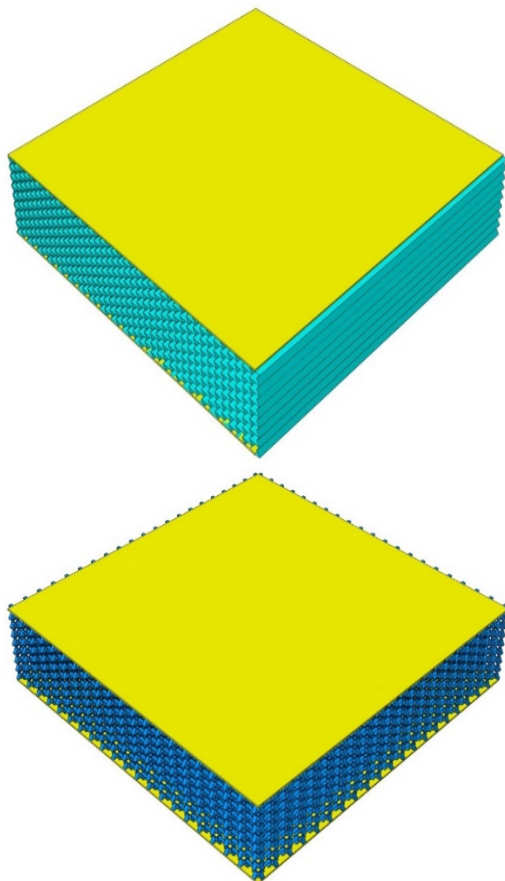
۳- نتایج و بحث

۳-۱- شبیه‌سازی اجزا محدود هسته مشبک

برای روشن شدن تاثیر پارامترهای a و t بر مقاومت انفجاری اقدام به شبیه‌سازی نمونه‌های ساندویچ پنل با هسته آگستیک سنتی در ضخامت (t) ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸، و ۱/۲ میلیمتر و زاویه داخلی (a) ۵۰، ۶۰ و ۷۰ شده است.

در گام بعدی با شبیه‌سازی ساندویچ پنل با هسته آگستیک جدید و ثابت نگه داشتن ضخامت ۰/۶ میلیمتر برای ریز ساختارهای پاپیونی جدید اقدام به شبیه‌سازی نمونه‌ها در زاویه‌های ۵۰ و ۶۰ درجه و مقایسه نتایج با ساندویچ پنل با هسته سنتی شده است. ابعاد ساندویچ پنل‌ها در دو حالت سنتی و جدید یکسان بوده و در شکل (۴) نشان داده شده است.

در تمامی نمونه‌ها ابعاد کلی ساندویچ پنل ۱۰۰۰x۱۰۰۰ بوده است. ضخامت هسته سنتی و جدید در تمامی نمونه‌ها ۲۰۰ میلیمتر در میان دو صفحه فولادی به ضخامت ۴ میلیمتر بوده است. شکل (۵)



شکل (۴): ساندویچ پنل با هسته پاپیونی سنتی و جدید

نسبت P/q نشان‌دهنده‌ی تنش سه محوری است به طوری که p تنش فشاری و q تنش معادل وون میسز و مقادیر ϵ^{PL} و ϵ_0 به ترتیب نرخ کرنش پلاستیک معادل و نرخ مرجع کرنش هستند. و برای شبیه‌سازی خرابی بتن از تئوری پلاستیسیته آسیب بتن استفاده شده است.

مدل پلاستیسیته آسیب دیده‌ی بتن، کامل شده‌ی روش معیار شکست دراگر-پراگر بوده است. معیار شکست دراگر-پراگر یک روش قوی و قابل استناد در مدل‌سازی شکست در بتن می‌باشد. معیار دراگر-پراگر از یک سطح شکست مخروطی استفاده کرده است. در این روش، با استفاده از مفهوم الاستیک آسیب دیده ایزوتروپیک و پلاستیک در کشش و فشار رفتار غیر خطی بتن تعریف می‌شود.

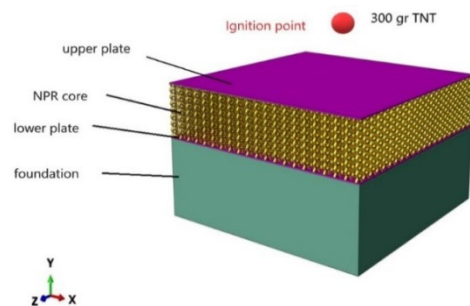
۲-۲- بارگذاری انفجار

نمودار تاریخچه زمانی فشار انفجار در فضای باز از فرمول زیر قابل استخراج است. [۱۷]

$$P(t) = P_s - P_a \left[1 - \frac{t-t_a}{td} \right] e^{-(t-t_a)/\theta} \quad (3)$$

در این فرمول p میزان فشار حاصل از انفجار در طول زمان (t) است. t_a مدت زمانی است که موج انفجار به سطح نمونه برخورد می‌کند و td زمانی است که موج انفجار سبب فشار بر سطح برخورد می‌شود. همچنین فشار حاصل از انفجار به پارامترهای دیگری نظیر فشار اتمسفر (p_a) و بیشینه فشار انفجار (p_s) و تابع تاخیر زمان (θ) است. از روش conwep برای شبیه‌سازی انفجار استفاده شده است.

شبیه‌سازی در نرم افزار تجاری ABAQUS انجام شده است. که شمای کلی از ساندویچ پنل با هسته آگستیک و همچنین محل قرارگیری جرم ماده منفجره در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳): نمونه شبیه‌سازی شده از ساندویچ پنل با هسته آگستیک جدید در نرم افزار آباکوس

۳-۳- شیب‌سازی المان محدود ساندویچ پنل کامپوزیتی

ساندویچ پنل از دو صفحه فلزی از جنس فولاد AISI4340 در بالا و پایین و یک هسته آگستیک از جنس آلیاژ آلومینیومی AA5083-H116 در وسط روی یک فونداسیون بتنی با مقاومت ۳۲ مگاپاسکال تشکیل شده است. مشخصات مکانیکی آلیاژ آلومینیوم و فولاد مورد استفاده در جدول (۱) و مقادیر مدل آسیب دیده بتن مورد استفاده در جدول (۲) آورده شده است.

شرایط مرزی برای بررسی رفتار ساندویچ پنل به صورت متقارن در جهت Z و X به ترتیب در صفحه‌های xoy و zoy به ساندویچ پنل اعمال شده است.

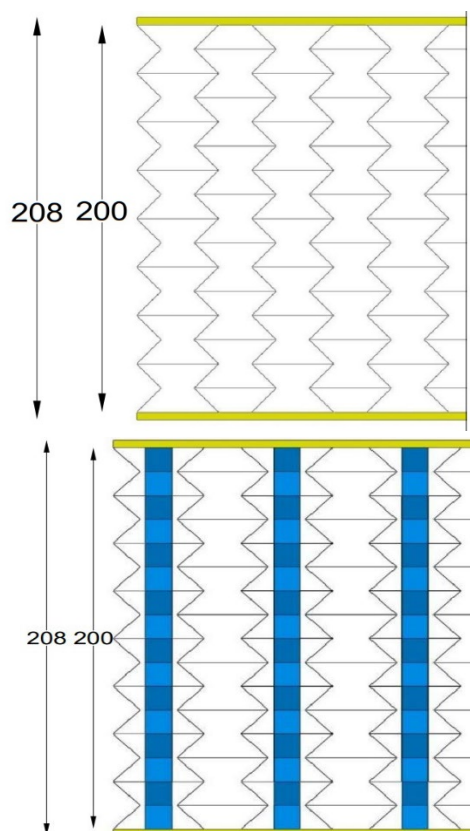
صفحات بالایی و زیرین فلزی به ابعاد $1000 \times 1000 \times 4$ میلیمتر و هسته آگستیک فلزی به ابعاد $1000 \times 1000 \times 200$ میلیمتر ساخته شده از سلول‌هایی به ابعاد $35 \times 35 \times 25$ میلیمتر شیب‌سازی شده است.

مش بندی صفحه فلزی بالایی و پایینی از نوع C3D8R به ابعاد ۲۵ میلیمتر در صفحه ZOx و یک لایه در ضخامت صفحه فلزی انتخاب شده است. هسته آگستیک به تعداد بیش از

۳۵۸۰۰ المان از نوع مش S4R مش بندی شده است. و فونداسیون از ۱۹۲۰۰ المان از نوع C3D8R تشکیل شده است. و از قید تماس کلی^۱ برای شیب‌سازی تماس‌ها بهره گرفته شده است. بدین‌صورت که ماده منفجره به جرم ۳۰۰ گرم در فاصله ۱۰۰ میلیمتری بالای مرکز صفحه فلزی فوقانی ساندویچ پنل جایگذاری شده است.

جدول (۱): مشخصات مکانیکی AA5083 و AISI 4340

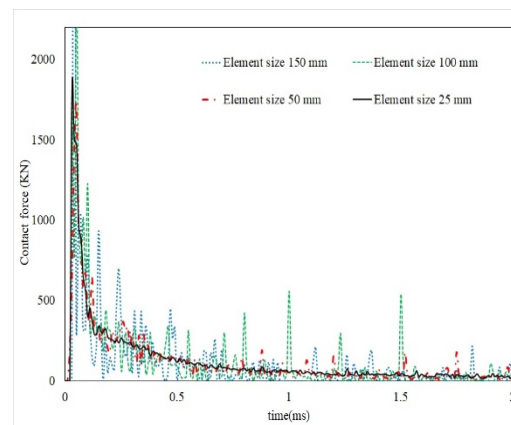
ماده	AA5083-H116	AISI4340
چگالی (KG.M-3)	۲۷۵۰	۷۸۵۰
مدول الاستیسیته (GPA)	۷۰	۲۱۰
نسبت پواسون	۰.۳	۰.۳
Tr (K)	۲۹۳	۲۹۳
Tm (K)	۸۹۳	۱۸۰۰
A (MPA)	۲۱۵	۷۹۲
B (MPA)	۲۸۰	۵۱۰
n	۰.۴۰۴	۰.۲۶
C	۰.۰۰۸۵	۰.۰۱۴
m	۱e-۳	۵e-۴
d1	۰.۰۸۵۹	۱.۰۳
d2	۰.۰۲۶۱	۰.۰۵
d3	۰.۲۶۳	۳.۴۴
d4	۰.۳۴۹	۲.۱۲
d5	۰.۱۴۷	۰.۰۰۲
d5	۱۶.۸	۰.۶۱



شکل (۵): برش ساندویچ پنل با هسته پاپیونی سنتی و جدید

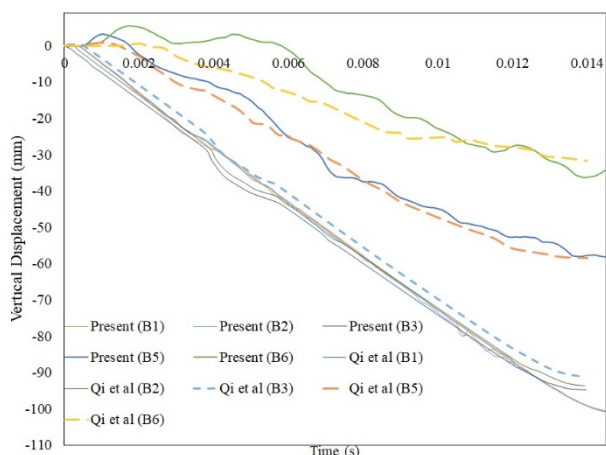
هسته با استفاده از تکنیک مش بندی از نوع S4R مش بندی شده است. و اندازه مش از ۲۵ تا ۱۵۰ میلیمتر متغییر بوده است. نتایج نشان داده شده در شکل (۶) نشان می‌دهد در اندازه مش ۲۵ میلیمتر پاسخ‌های مدل تمایل به همگرایی دارند. و از دقت قابل قبولی برخوردار هستند.

ما همچنین تمامی تجزیه و تحلیل پاسخ مدل‌ها را از نوع S4R و اندازه ۲۵ میلیمتر برای هسته سنتی و جدید در نمونه‌های ساندویچ پنل اجرا شده است.



شکل (۶): نمودارهای نیروی تماسی ساندویچ پنل در مش بندی متفاوت

¹ General Contact

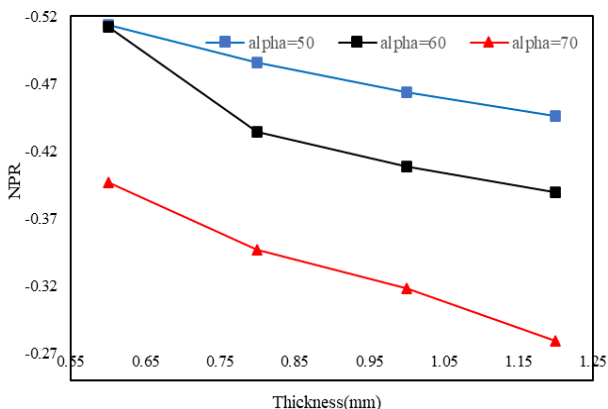


شکل (۸) : نمودار فرورفتگی در تست ضربه- مقایسه داده‌های تجربی و آزمایشگاهی

۳-۵- پواسون منفی

با استفاده از نرم افزار المان محدود آباکوس نسبت پواسون نمونه‌ها بررسی شده است. مدل‌های ارائه شده سه بعدی با زاویه داخلی α و ضخامت ورق t در یک جهت و در ناحیه الاستیک فشرده شده‌اند و میانگین جا به جایی گره‌های سطوح جانبی به دست آمده است. با استفاده از نسبت کرنش جانبی به کرنش محوری در جهت فشرده سازی، نسبت پواسون نمونه‌ها محاسبه شده است.

نسبت پواسون نمونه‌ها در شکل (۹) نشان داده شده است. لازم به ذکر است به دلیل ثابت بودن نسبت پواسون در ناحیه الاستیک تحلیل نمونه‌ها در این ناحیه بررسی شده است. با دقت در شکل (۹) می‌توان مشاهده کرد زاویه داخلی ریز ساختارهای آگستیک نسبت به ضخامت ریز ساختارها به مراتب تاثیر بیشتری در نسبت پواسون دارد.



شکل (۹) : نمودارهای نسبت پواسون مدل‌های ارائه شده با زاویه داخلی و ضخامت ورق‌های مختلف

جدول (۲) : مشخصات مکانیکی بتن

بتن	
وزن مخصوص (Kgm^{-3})	۲۴۰۰
مدول الاستیسیته (GPa)	۳۱.۱۹
نسبت پواسون	۰.۲
زاویه اتساع	۳۶
خروج از مرکزیت	۰.۱
f_{b0}/f_{c0}	۱.۱۶
k	۰.۶۶۷
پارامتر لزجت	۰

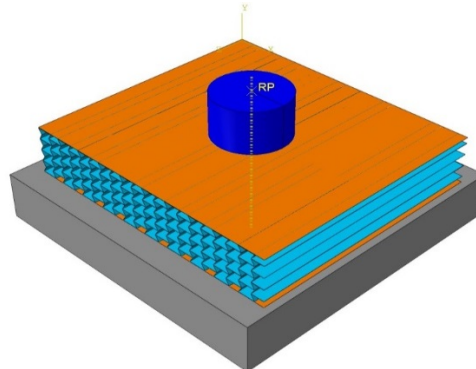
۳-۴- صحت سنجی

بمنظور راستی آزمایشی مدل سازی و نتایج ارائه شده در این مقاله اقدام به شبیه سازی نمونه‌های مطالعه‌ای با عنوان پاسخ پنل‌های ساندویچی با هسته لانه زنبوری اکستیک در اثر ضربه و انفجار شده است. در این مطالعه چنگ کی، الکس رمنیکوف و همکاران [۱۸] اقدام به بررسی نمونه آزمایشگاهی آگستیک سنتی تحت بارگذاری ضربه‌ای و انفجاری به دو روش تجربی و شبیه سازی عددی کرده‌اند.

صحت سنجی شامل شبیه سازی نمونه ساندویچ پنل با هسته پاپیونی سنتی تحت اثر یک پرتابه استوانه‌ای شکل به قطر ۱۵۰ میلیمتر با سرعت ۷,۶۷ متر بر ثانیه و بررسی میزان فرورفتگی وجه رویی نمونه بوده است.

شبیه سازی و شماتیک بارگذاری در شکل (۷) آورده شده است. نتایج خروجی حاصل از شبیه سازی المان محدود نمونه جهت صحت سنجی و داده‌های تجربی و آزمایشگاهی در شکل (۸) آورده شده است.

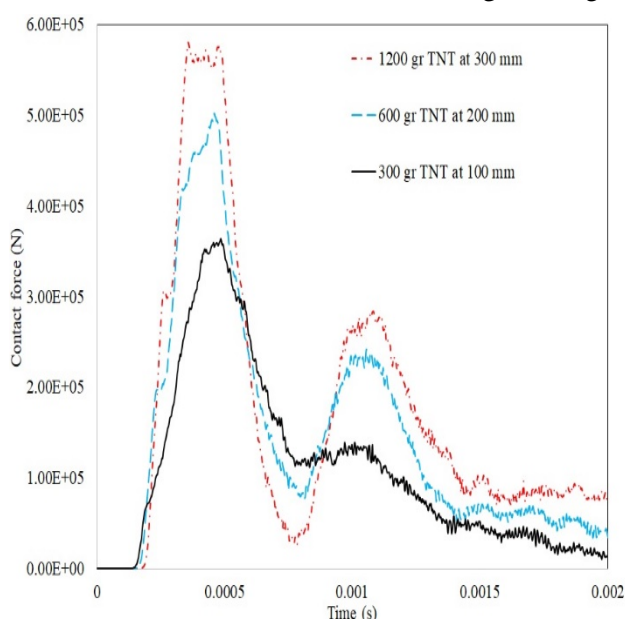
با توجه به شکل می‌توان نتیجه گرفت که روند شبیه سازی و نتایج از اعتبار و دقت خوبی برخوردار بوده است.



شکل (۷) : نمایش شماتیک بارگذاری در تست ضربه

درجه و عملکرد پواسون منفی ۰/۵۷- بوده است. این در حالی است که ساندویچ پنل با ضخامت ۰/۶ نمونه ۷۰ درجه سنتی با نسبت پواسون ۰/۳۹۶- بیشترین نیرو تماسی را ثبت کرده است. مدل سازی ساندویچ پنل با هسته جدید تحت بارگذاری ۳۰۰ گرم ماده منفجره در فاصله ۱۰۰ میلیمتری، ۶۰۰ گرم ماده منفجره در فاصله ۲۰۰ میلیمتری و ۱۲۰۰ گرم ماده منفجره در فاصله ۳۰۰ میلیمتری برای تحلیل هر چه بهتر عملکرد ساندویچ پنل با هسته جدید انجام شده است.

نمودارهای تاریخچه نیروی تماسی برای سه حالت بارگذاری در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل (۱۱): نمودار تاریخچه نیروی تماسی در سناریوهای بارگذاری متفاوت برای ساندویچ پنل با هسته جدید

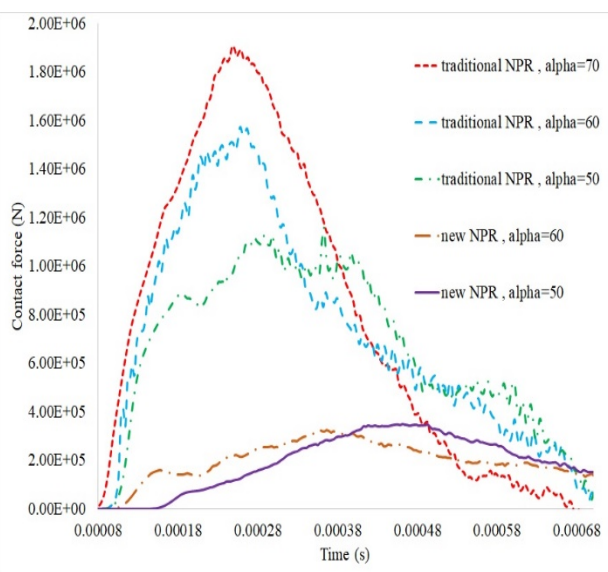
با دقت در شکل (۱۰) و (۱۱) و مقایسه بیشینه نیروی تماسی در ساندویچ پنل جدید و سنتی متوجه می شویم که نمونه جدید به مراتب عملکرد بهتری در میرایی انرژی انفجاری داشته است. به صورتی که بیشینه نیروی تماسی در نمونه ساندویچ پنل جدید تحت بارگذاری ۱۲۰۰ گرم ماده منفجره با فاصله ۳۰۰ میلیمتری نسبت به نمونه ساندویچ پنل سنتی با ۳۰۰ گرم ماده منفجره و فاصله ۱۰۰ میلیمتری بیش از ۵۰ درصد کمتر بوده است.

همچنین به منظور تحلیل هر چه بهتر مقاومت انفجاری ساندویچ پنل ها، تاریخچه مجموع عکس العمل تکیه گاهی و تاریخچه بیشینه عکس العمل تکیه گاهی برای چهار نمونه ۵۰ درجه و ۶۰ درجه سنتی و جدید مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۱۲) و (۱۳) نمودار عکس العمل تکیه گاهی و بیشینه عکس العمل تکیه گاهی در زمدت زمان انفجار را نشان می دهد.

۳-۶- مقاومت در برابر انفجار ساندویچ پنل با هسته

آگستیک

به منظور مقایسه مقاومت حفاظتی ساندویچ پنل در برابر انفجار معیار بیشینه نیروی تماسی بین ساندویچ پنل و فونداسیون معیار ارزیابی قرار گرفته است. از این رو تغییرات بیشینه نیروی تماسی در نمونه ساندویچ پنل ها با ضخامت و زاویه متفاوت هسته در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل (۱۰): نمودار تاریخچه نیروی تماسی در نمونه های جدید و سنتی آگستیک با زوایای داخلی متفاوت

با تحلیل رفتار مکانیکی و نمودار بیشینه نیروی تماسی برای پنج نمونه می توان متوجه شد که تغییرات در زاویه داخلی سلول ها به موجب ایجاد تغییر در نسبت پواسون منفی در مقاومت انفجاری ساندویچ پنل ها تاثیر گذار بوده است.

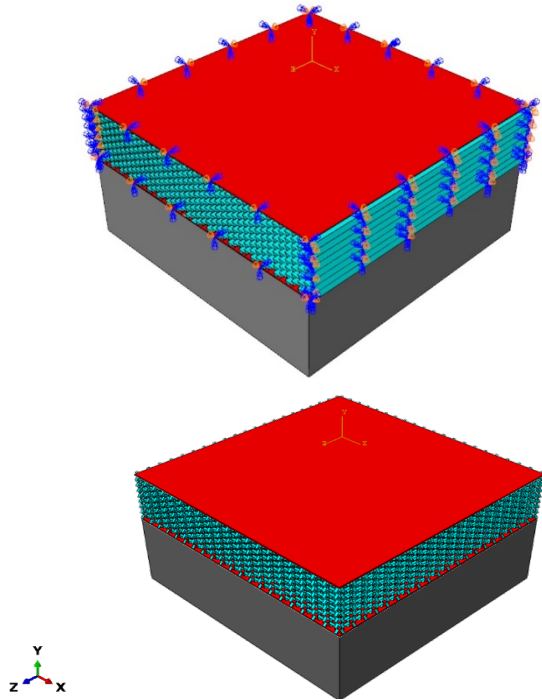
همچنین می توان در شکل (۱۰) به وضوح کاهش چشمگیر بیشینه نیروی تماسی روی فونداسیون در نمونه هایی با هسته نسبت پواسون منفی ارائه شده را نسبت به ساندویچ پنل هایی با هسته پواسون منفی سنتی مشاهده کرد.

این بدین دلیل است که در هسته جدید پیشنهاد شده جمع شدگی برخلاف هسته سنتی در دو جهت صورت گرفته است.

بیشینه نیروی تماسی در نمونه ۷۰ درجه سنتی، ۶۰ درجه سنتی، ۵۰ درجه سنتی، ۶۰ درجه جدید و ۵۰ درجه جدید به ترتیب برابر با ۱۹۰۰، ۱۵۷۰، ۱۱۴۰، ۳۴۳ و ۳۲۳ کیلونیوتن بوده است.

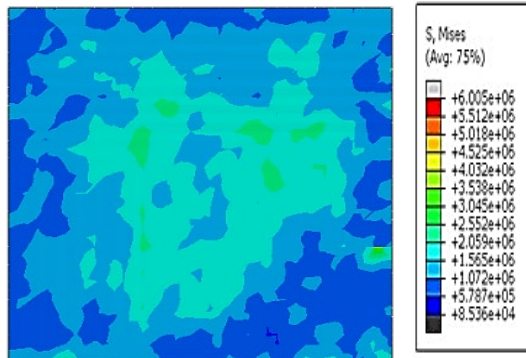
کمترین نیروی تماسی در نمونه های مورد بررسی با ضخامت ورق ۰/۶ میلیمتری مربوط به نمونه جدید با زاویه داخلی ۵۰

ساندویچ پنل‌های پیشنهادی، یک ساندویچ پنل با هسته سنتی و ساندویچ پنل با هسته آگستیک جدید با زاویه داخلی برابر (۵۰ درجه) و ضخامت ۰/۶ میلیمتر شبیه‌سازی شده است. که در شکل (۱۴) قابل مشاهده می‌باشد.

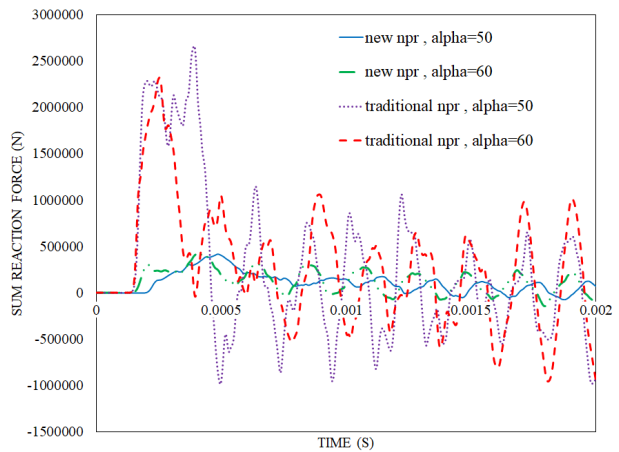


شکل (۱۴): نمونه ساندویچ پنل با هسته آگستیک سنتی و جدید

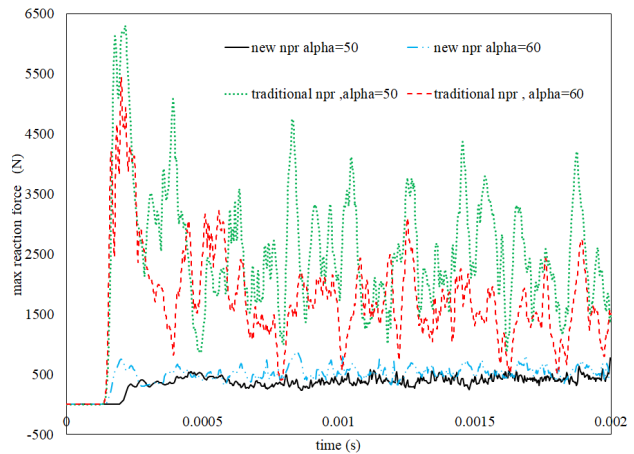
شکل (۱۵) کانتور بیشینه تنش در وجه در تماس با فونداسیون بتنی، وجه رو به موج انفجار و تنش هسته در اثر انفجار را نشان داده است. به علاوه از شکل (۱۵) نحوه گسترش تنش که در هسته جدید به صورت شبه دایروی و در هسته سنتی به صورت یک طرفه است قابل فهم است. عملکرد پخش نیرو به صورت یکنواخت و کنترل ایجاد نواحی با تنش بیشینه روی فونداسیون از کانتورهای تنش روی فونداسیون قابل دریافت است.



شکل (۱۵) الف: کانتور تنش در فونداسیون ساندویچ پنل با هسته آگستیک جدید



شکل (۱۲): تاریخچه مجموع عکس‌العمل تکیه‌گاهی



شکل (۱۳): نمودار تاریخچه زمانی بیشینه نیرو تکیه‌گاهی

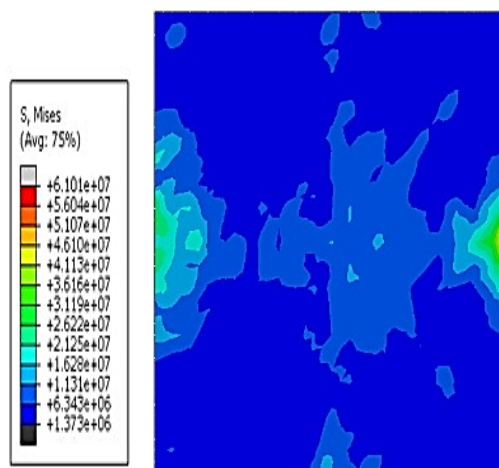
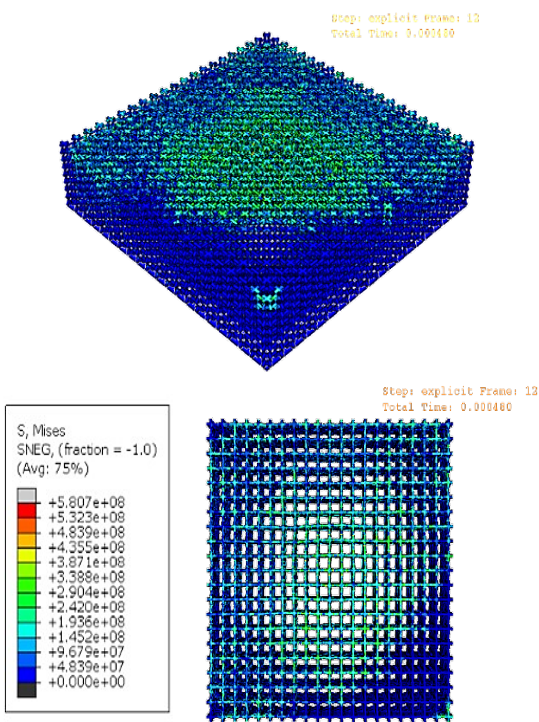
با بررسی نمودار تاریخچه زمانی از بیشینه عکس‌العمل تکیه‌گاهی متوجه کاهش چشمگیر عکس‌العمل تکیه‌گاهی هم راستا با موج انفجار و طولانی‌تر شدن پاسخ عکس‌العمل می‌شویم.

با دقت در نمودارها برای چهار مدل با زاویه داخلی ۵۰ و ۶۰ جدید و قدیمی متوجه کاهش بیش از ۸ برابری در نمونه با زاویه داخلی ۵۰ درجه و بیش از ۶ برابری بیشینه عکس‌العمل تکیه‌گاهی شبیه‌سازی در هسته جدید و قدیمی می‌شویم.

همچنین هسته جدید با زاویه ۵۰ درجه موجب کاهش ۶ برابری مجموع نیرو عکس‌العمل تکیه‌گاهی در بازه مورد بررسی ۲ میلی ثانیه‌ای نسبت به نمونه سنتی با همین زاویه داخلی شده است. این اعداد برای زاویه داخلی ۶۰ درجه به بیش از ۵ برابری می‌رسد.

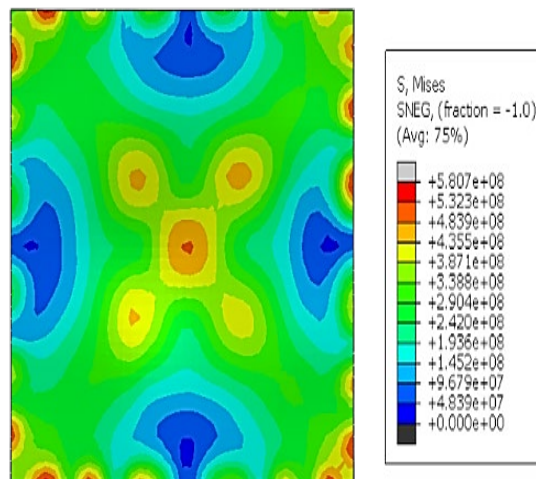
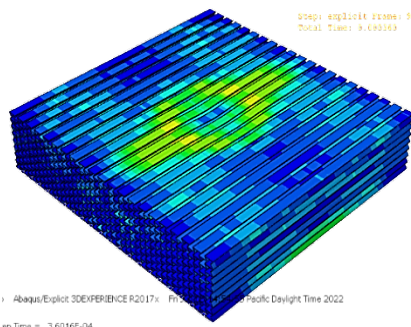
۳-۷- مقایسه گسترش تنش لایه پشتی در ساندویچ پنل با هسته آگستیک جدید و سنتی

برای به‌منظور تفهیم بهتر عملکرد مقاومت در برابر ضربه در

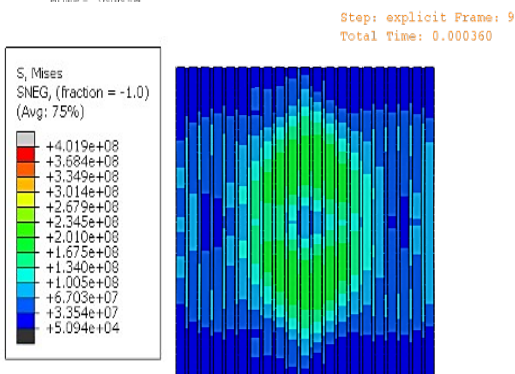


شکل (۱۵) ب: کانتور تنش در فنداسیون ساندویچ پنل با هسته آگستیک سنتی

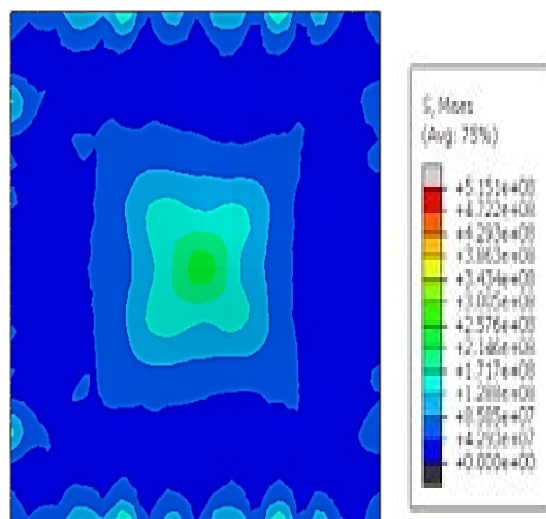
شکل (۱۵) ه: گسترش تنش در هسته آگستیک جدید



شکل (۱۵) ج: تنش در صفحه مقابل به موج انفجار در ساختار جدید آگستیک



شکل (۱۵) و: گسترش تنش در هسته آگستیک سنتی



شکل (۱۵) د: تنش در صفحه مقابل به موج انفجار در ساختار سنتی آگزیک

۴- نتیجه گیری

در این مقاله یک ساندویچ پنل متشکل دو صفحه فلزی و یک هسته فلزی مشبک سه بعدی با خاصیت نسبت پواسون منفی شبیه سازی شده است. به هدف کنترل مقاومت انفجاری ساندویچ پنل از بارگذاری با ۳۰۰ گرم ماده TNT در فاصله ۱۰۰ میلیمتری

- <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.10.034>
- [8] K. P. Dharmasena, et al., "Mechanical response of metallic honeycomb sandwich panel structures to high-intensity dynamic loading," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 35, no. 9, pp. 1063–1074, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2007.06.008>
- [9] P. Liu, Y. Liu, and X. Zhang, "Simulation of hyper-velocity impact on double honeycomb sandwich panel and its staggered improvement with internal-structure model," *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, vol. 12, pp. 241–254, 2016, doi: <https://doi.org/10.1007/s10999-015-9300-7>
- [10] J. Zhang, et al., "Dynamic response of double-layer rectangular sandwich plates with metal foam cores subjected to blast loading," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 122, pp. 265–275, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.08.016>
- [11] X. Cui, et al., "A lattice deformation based model of metallic lattice sandwich plates subjected to impulsive loading," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 49, no. 19–20, pp. 2854–2862, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2012.04.025>
- [12] R. Lakes, "Foam structures with a negative Poisson's ratio," *Science*, vol. 235, no. 4792, pp. 1038–1040, 1987, doi: <https://doi.org/10.1126/science.235.4792.1038>
- [13] W. Lv, D. Li, and L. Dong, "Study on blast resistance of a composite sandwich panel with isotropic foam core with negative Poisson's ratio," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 191, p. 106105, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.106105>
- [14] V. Sharma, et al., "Influence of porosity on the mechanical behavior during uniaxial compressive testing on Voronoi-based open-cell aluminium foam," *Materials*, vol. 12, no. 7, p. 1041, 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/ma12071041>
- [15] X. Zhang, et al., "Yield properties of closed-cell aluminum foam under triaxial loadings by a 3D Voronoi model," *Mechanics of Materials*, vol. 104, pp. 73–84, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2016.10.007>
- [16] G. R. Johnson, "A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures," in *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*, The Hague, Netherlands, 1983.
- [17] D. Hyde, CONWEP—Application of TM5-855-1, Structural Mechanics Division, Structures Laboratory, USAE Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 1992.
- [18] C. Qi, et al., "Impact and close-in blast response of auxetic honeycomb-cored sandwich panels: Experimental tests and numerical simulations," *Composite Structures*, vol. 180, pp. 161–178, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.020>

بالای مرکز ساندویچ پنل‌ها استفاده شده است.

با توجه به این که مقاومت ساندویچ پنل در برابر نیروهای خارج از صفحه، ناشی از کرنش و اتلاف انرژی به سبب تغییر شکل ریزساختارها در داخل صفحه ساندویچ پنل بوده است. از این رو تغییرات در زاویه داخلی هسته به علت مکانیزم تبدیل نیروهای وارد شده عمود بر صفحه به نیروهای درون صفحه‌ای به مراتب اثرات بیشتری در رفتار مکانیکی هسته جدید داشته است. بدین صورت که بیشترین نسبت پواسون منفی مربوط به نمونه‌ای با زاویه داخلی ۵۰ درجه و ضخامت ورق ۰/۶ میلی‌متر با ۰/۵۱۳۶ بوده است.

در نمونه‌های جدید آگستیک نسبت به نمونه سنتی با همان زاویه و ضخامت به مراتب مقاومت بیشتری در بار انفجار از خود نشان داده است؛ بدین صورت که بیشینه عکس‌العمل تکیه‌گاهی تا ۸ برابر کاهش و بیشینه نیروی تماسی ساندویچ پنل و فونداسیون برای زاویه ۶۰ درجه تا ۴/۵ برابر و برای زاویه داخلی ۵۰ درجه تا ۳/۵ برابر بوده است.

۵- مراجع

- [1] J. Ren, et al., "Enhancing energy absorption of star-shaped honeycombs by utilizing negative Poisson's ratio effect under high-velocity impact," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 202, p. 105297, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2025.105297>
- [2] Z. Yue, et al., "Elevated shock resistance of all-metallic sandwich beams with honeycomb-supported corrugated cores," *Composites Part B: Engineering*, vol. 242, p. 110102, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110102>
- [3] Z. Zhang, et al., "Energy absorption and crushing behavior of protective bionic sandwich tubes under axial compression," *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, pp. 1–27, 2025, doi: <https://doi.org/10.1080/15397734.2025.2476039>
- [4] Z. Zou, et al., "Blast resistance of sandwich panels with 3D sinusoidally curved negative Poisson's ratio honeycombs," *Structures*, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.109011>
- [5] Z. Zou, et al., "Blast resistance of sandwich structures consisting of re-entrant honeycombs reinforced by catenary," *Composite Structures*, vol. 359, p. 118995, 2025,
- [6] C. Qi, et al., "Blast resistance and multi-objective optimization of aluminum foam-cored sandwich panels," *Composite Structures*, vol. 105, pp. 45–57, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.04.043>
- [7] X. Li, et al., "Dynamic behavior of aluminum honeycomb sandwich panels under air blast: Experiment and numerical analysis," *Composite Structures*, vol. 108, pp. 1001–1008, 2014, doi: