Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

Numerical Analysis of a Sandwich Structure with a Metallic Square Core and Lightweight Concrete: A Novel Approach for Blast Resistance

Komeil Momeni[1]*, Azad Ghavipanjeh [2]

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran
2- M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, University of Science and Culture, Rasht, Iran

ABSTRACT

This study comprehensively investigates the performance of an innovative metallic sandwich structure featuring a square metallic lattice core alternately filled with lightweight concrete under blast loading conditions. Unlike previous research primarily focused on fully metallic hollow frameworks, this work integrates lightweight concrete and steel in the core to enhance energy absorption and reduce deformation caused by blast waves. Detailed numerical simulations were conducted using ABAQUS/Explicit 2024, evaluating the structural response to TNT explosive charges of 1, 2, and 3 kg. Critical parameters including upper and lower face plate displacements, equivalent plastic strain (PEEQ), and absorbed energies such as viscous, plastic, artificial, and total were systematically measured and compared with the reference results reported by Derseh et al. (2023). The results indicate that incorporating lightweight concrete in an alternating configuration significantly reduces plate displacements, lowers equivalent plastic strain, and achieves a more uniform energy distribution across the structure. Time-history displacement analysis demonstrates that the proposed hybrid model stabilizes faster after the blast and exhibits reduced oscillation amplitude, reflecting enhanced dynamic performance and higher damping capacity. Furthermore, the total dissipated energy in the hybrid configuration is lower than that of the fully metallic reference model, while the energy distribution is more effective throughout the structure. These findings demonstrate that an alternating lightweight concrete-metal core represents an effective and innovative approach to improving blast resistance in sandwich structures under extreme dynamic loading. In addition to enhancing safety, this design reduces structural weight, lowers construction costs, and facilitates implementation. Therefore, the proposed system serves as a lightweight, strong, efficient, and economical solution for blast-resistant structures, particularly in military, industrial, and sensitive urban applications. Its practical adaptability, optimized energy absorption, and improved structural resilience make it a highly suitable option for modern engineering designs requiring high performance under severe loading conditions.

ARTICLE INFO

Receive Date: 08 December 2025
Revise Date: 19 December 2025
Accept Date: 25 December 2025

Keywords:
Metallic sandwich structure
Blast loading
Numerical Modeling
Lightweight Concrete
TNT
Energy absorption
Plastic strain

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: https://doi.org/10.22065/jsce.2025.560905.3879

*Corresponding author: Komeil momeni
Email address: Kmomeni@tvu.ac.ir

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir

Journal of Structural and Construction Engineering
JSCE
نشریه علمی-پژوهشی مهندسی سازه و ساخت

تحلیل عددی سازه ساندویچی با هسته فلزی مربعی و بتن سبک: رویکردی نوین در مقابله با بارهای انفجاری

کمیل مومنی [۱*]، آزاد قوی پنجه دیگه سرا [۲]

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه، دانشگاه علم و فرهنگ واحد رشت، ایران

چکیده

در این پژوهش، عملکرد یک سازه ساندویچی فلزی نوآورانه با هسته شبکه مربعی فلزی که به‌صورت چینش تناوبی (چیدمان یکی در میان) با بتن سبک پر شده است، به‌طور جامع در برابر بارگذاری انفجاری مورد ارزیابی قرار گرفت. برخلاف تحقیقات پیشین که عمدتاً بر سازه‌های کاملاً فلزی متمرکز بودند، این مطالعه استفاده همزمان از فلز و بتن سبک در هسته سازه ساندویچی را مد نظر قرار داده است تا جذب انرژی بهبود یابد و تغییر شکل ناشی از موج انفجار به حداقل برسد. شبیه‌سازی عددی دقیق با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS/Explicit نسخه ۲۰۲۴ انجام شد و اثر انفجار TNT با سه جرم مختلف شامل ۱، ۲ و ۳ کیلوگرم به‌طور کامل تحلیل گردید. پارامترهای حیاتی شامل جابجایی صفحات فوقانی و تحتانی، کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) و انرژی‌های جذب‌شده شامل انرژی ویسکوز، پلاستیک، مصنوعی و کل استخراج و با نتایج مرجع Derseh و همکاران (۲۰۲۳) مقایسه شدند. نتایج نشان داد که افزودن بتن سبک به‌صورت چینش تناوبی (چیدمان یکی در میان) در هسته فلزی موجب کاهش محسوس جابجایی صفحات، کاهش کرنش پلاستیک و توزیع یکنواخت‌تر انرژی در سراسر سازه می‌شود. تحلیل تاریخچه زمانی جابجایی نشان داد که مدل نوآورانه پس از انفجار سریع‌تر به تعادل می‌رسد و دامنه نوسانات آن کاهش یافته است که بیانگر بهبود رفتار دینامیکی و افزایش ظرفیت میرایی سازه است. علاوه بر این، انرژی کل مستهلک‌شده در مدل نوآورانه کمتر از مدل مرجع است، در حالی که توزیع انرژی در کل سازه مؤثرتر انجام می‌شود. این یافته‌ها نشان می‌دهد که هسته متناوب بتن سبک و فلز طراحی مؤثر و نوآورانه‌ای برای افزایش مقاومت سازه‌های ساندویچی در برابر بارهای دینامیکی شدید فراهم می‌کند. همچنین، این سیستم موجب کاهش وزن، کاهش هزینه‌های ساخت و تسهیل اجرای سازه شده و به‌عنوان گزینه‌ای سبک، مقاوم، اقتصادی و کارآمد برای سازه‌های حساس نظامی، صنعتی و شهری مطرح است.

کلمات کلیدی: سازه ساندویچی فلزی، بارگذاری انفجاری، مدل‌سازی عددی، بتن سبک، TNT، جذب انرژی، کرنش پلاستیک

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	https://doi.org/10.22065/jsce.2025.560905.3879
۱۴۰۴/۰۹/۱۷	۱۴۰۴/۰۹/۲۸	۱۴۰۴/۱۰/۰۴	۱۴۰۴/۱۰/۰۴	۱۴۰۵/۰۵/۳۱	doi: 10.22065/jsce.2025.560905.3879

*نویسنده مسئول: کمیل مومنی

پست الکترونیکی: Kmomeni@tvu.ac.ir

۱- مقدمه

برای حالت های بارگذاری دینامیکی شدید مانند تصادفات، انفجارها یا ضربه‌ها، طراحی سازه‌های مهندسی حفاظتی به‌عنوان جذب‌کننده انرژی اهمیت زیادی دارد. در بارگذاری انفجاری، سازه‌ها معمولاً دچار تغییرشکل‌های پلاستیک گسترده یا شکست می‌شوند و مقدار قابل توجهی انرژی جذب می‌کنند. انواع مختلفی از جذب‌کننده‌های انرژی برای کاربردهای مختلف با نرخ کرنش بالا طراحی شده‌اند که یکی از آن‌ها سازه‌های ساندویچی است [۱]، سازه‌های ساندویچی متشکل از ورق‌های نازک فلزی و هسته‌ای سبک با قابلیت جذب انرژی برای مقاومت در برابر انفجار می‌باشند. به دلیل نسبت بالای سختی به وزن، این سازه‌ها برای کاربردهای سبک‌وزن همچون هواپیماها در طول دهه‌ها به‌کار رفته‌اند و به‌عنوان جایگزینی مناسب برای سازه‌های یکپارچه مورد توجه قرار گرفته‌اند[۱-۴]، مطالعات نشان داده‌اند که سازه های ساندویچی با ساختار لانه زنبوری نسبت به سازه های توپر با جرم برابر، عملکرد بهتری از نظر تغییرشکل پلاستیک، مقاومت و ظرفیت جذب انرژی دارند[۱۰-۵]، از سوی دیگر، سازه های فلزی ساندویچی با هسته‌های مختلف سلولی از جمله لانه زنبوری، شبکه‌های توری، ورقه‌های تا شده و ساختارهای هیبرید، پتانسیل قابل توجهی در کاهش آسیب ناشی از بارهای انفجاری از طریق تغییرشکل پلاستیک نشان داده‌اند. با این حال، ارزیابی دقیق قابلیت‌های جذب انرژی این ساختارهای هیبرید در برابر بارگذاری انفجاری هوایی نیازمند تحقیقات بیشتر است[۱-۱۱].

۲- پیشینه تحقیق

در همین راستا توتونچی و احمدی (۲۰۲۱) با استفاده از تحلیل اجزاء محدود در نرم‌افزار آباکوس[1]، رفتار سازه‌ای پانل‌های ساندویچی پیش‌ساخته بتنی با هسته بتن سبک را تحت بار خمشی بررسی کردند. این پانل‌ها شامل یک لایه بالایی از بتن مسلح پرمقاومت، هسته‌ای از بتن سبک و یک لایه پایینی فولادی یا بتنی بودند. نتایج نشان داد که مقاومت نهایی و عملکرد مرکب پانل‌ها به شدت به ویژگی‌های اتصالات برشی بستگی دارد و منحنی بار–تغییرمکان رفتار منطقی ارائه می‌دهد. [۱۲]. از سوی دیگر سبزواری و شهابیان مقدم (۲۰۱۸) به بررسی رفتار پانل‌های ساندویچی با هسته موجدار در برابر بارهای انفجاری پرداختند. در این مطالعه، چهار نوع شکل هسته موجدار (مستطیلی، ذوزنقه‌ای، مثلثی و بیضوی) برای پانل‌های آلومینیومی و فولادی تحلیل شد. نتایج نشان داد بیشترین تغییرمکان به پانل با هسته مثلثی و کمترین تغییرمکان به پانل با هسته ذوزنقه‌ای تعلق دارد. همچنین پانل‌های تمام آلومینیوم بیشترین انرژی را مستهلک کرده‌اند و ترکیب ورق‌های فولادی با هسته آلومینیومی مثلثی عملکرد بهینه‌ای در استهلاک انرژی نشان داده است. این مطالعه نشان‌دهنده اهمیت شکل هسته و جنس مصالح در بهبود رفتار پانل‌های ساندویچی تحت بار انفجاری است[۱۳]. مطالعات بین‌المللی نیز به طور گسترده به بررسی عملکرد سازه‌های ساندویچی فلزی تحت بارهای انفجاری پرداخته‌اند. به‌عنوان نمونه، پاتل و کومار[2] نشان دادند که استفاده از هسته‌های هشت‌ضلعی در مقایسه با هسته‌های مربعی، موجب بهبود عملکرد سازه در کاهش تغییرشکل‌های صفحات جلو و عقب می‌شود[۱۴]. همچنین تئوبالد[3] و همکاران با استفاده از شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار LS-DYNA دریافتند که افزودن سخت‌کننده به هسته فوم آلومینیومی در سازه‌های ساندویچی می‌تواند مقاومت آن‌ها را در برابر انفجار به طور چشم‌گیری افزایش دهد[۴]. برنشتاین[4] . و همکاران نیز با مقایسه عملکرد چهار نوع ماده جاذب انرژی مختلف از نظر تغییرشکل دائمی و انتقال تکانه، آلومینیوم فوم را مؤثرترین گزینه معرفی کردند. همچنین سایر مطالعات نیز به بررسی ترکیب‌های هیبریدی از ساختارهای سلولی فلزی از جمله لانه زنبوری، ورق‌های موجدار و شبکه‌های در هم‌تنیده پرداخته‌اند. با این حال، بررسی‌های دقیق عددی با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی هندسی و رفتار پیچیده مصالح و با استفاده از روش‌های پیشرفته‌ای مانند ABAQUS/Explicit، هنوز به طور کامل توسعه نیافته است[۱،۲،۱۶] .

[1] ABAQUS
[2] Patel and Komar
[3] Theobald
[4] Bornstein

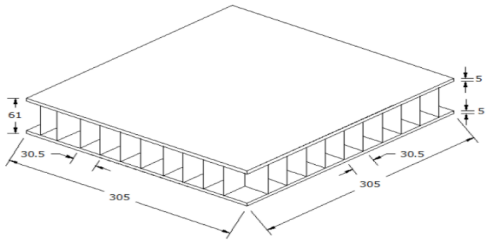
۳- نوآوری پژوهش

در این مطالعه، رویکردی نوین در طراحی سازه‌های ساندویچی فلزی با هسته مربعی ارائه شده است؛ به‌طوری‌که فضای داخلی شبکه مربعی به‌صورت چینش تناوبی (چیدمان یکی در میان) با بتن سبک پر می‌شود. این روش با هدف افزایش ظرفیت جذب انرژی و بهبود مقاومت سازه در برابر بارهای انفجاری طراحی شده است. برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً از مدل‌سازی ساده‌شده با روش CONWEP برای شبیه‌سازی انفجار استفاده کرده‌اند، در این پژوهش از مدل‌سازی دقیق عددی در نرم‌افزار ABAQUS/Explicit 2024 بهره گرفته شده و بارگذاری انفجاری به‌صورت واقعی با موج برخوردی[5] اعمال شده است. این نوآوری امکان ارزیابی دقیق‌تر پاسخ سازه و بررسی تغییرشکل‌ها و شکست موضعی در اثر بارهای شدید انفجاری را فراهم می‌سازد.

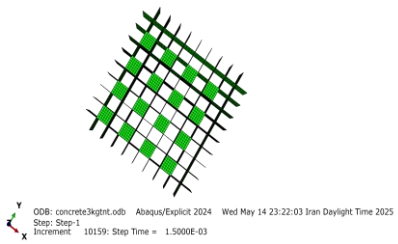
در این پژوهش، بتن سبک به‌عنوان ماده‌ی پرکننده‌ی هسته‌ی سازه ساندویچی انتخاب شده است. این ماده با چگالی حدود ۱۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب موجب کاهش قابل‌توجه وزن کلی سازه می‌شود و در کاربردهایی مانند حمل‌ونقل و قطعات پیش‌ساخته اهمیت ویژه‌ای دارد. و ضمن دارا بودن مقاومت فشاری مناسب، توان تحمل بارهای استاتیکی و دینامیکی را داشته و به‌دلیل جذب انرژی بالا و میرایی مؤثر، عملکرد مطلوبی در برابر بارهای ضربه‌ای و انفجاری ارائه می‌دهد.

۴- روش شناسی عددی: (شرح مدل عددی)

مدل سه‌بعدی سازه ساندویچی بر اساس تحقیق [۱۷]، در نرم‌افزار ABAQUS 2024 ساخته شد. ابعاد کل سازه ۳۰۵×۳۰۵ میلی‌متر و ارتفاع هسته ۵۱ میلی‌متر است. دو صفحه‌ی فولادی بالایی و پایینی با ضخامت ۰.۷۶ میلی‌متر طراحی شدند. در مدل نوآورانه، هسته‌ی فلزی مربعی با چیدمان تناوبی مکعب‌های بتن سبک (۳۵×۳۵×۳۵ میلی‌متر) پر شده که باعث توزیع بهینه مصالح و بهبود رفتار مکانیکی گردید.



شکل۱ : هندسه مدل سه بعدی سازه ساندویچی در تحقیق [۱۷]،



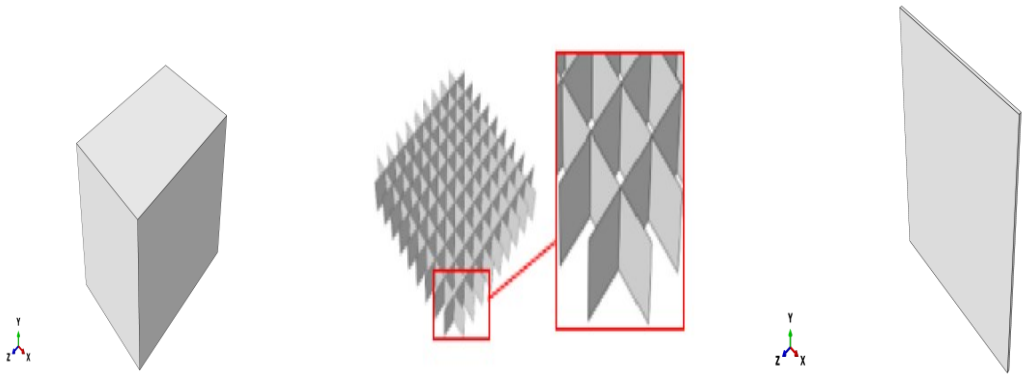
شکل۲ : نحوه قرار گیری مکعب های بتنی در شبکه داخلی به صورت چینش تناوبی (چیدمان یکی در میان) در مدل نوآوری

۴-۱- تعریف اجزا

در مدلسازی عددی، اجزای سازه به‌صورت جداگانه در نرم‌افزار ABAQUS 2024 تعریف شدند. صفحات فوقانی و تحتانی با ابعاد ۳۰۵×۳۰۵ میلی‌متر و ضخامت ۵ میلی‌متر به‌صورت حجم جامد[6] مدل شده‌اند و نقش توزیع بار و محافظت از هسته را دارند. هسته‌ی فلزی مربعی با ضخامت ۰/۶۷میلی‌متر به‌صورت پوسته‌ای مدل شد تا ضمن کاهش حجم محاسبات، دقت در رفتار خمشی و برشی افزایش یابد.

[5] Incident Wave
[6] Solid

درون شبکه، مکعب‌های بتن سبک با ابعاد ۳۵×۳۵×۵۱ میلی‌متر به‌صورت حجم جامد مدل گردیدند که فضای داخلی شبکه را به‌طور کامل پر می‌کنند.



(ج) (ب) (الف)

شکل ۳ : اجزای مختلف مدل هندسی سازه ساندویچی

۴-۱-۱- خواص مصالح

۴-۱-۱- ۱- فلز

مطابق با تحقیق توتونچی [۱۲] مصالح فلزی هسته و صفحات پوششی با استفاده از مدل ماده Johnson-Cook در ABAQUS 2024 مدل شده‌اند. پارامترهای دقیق این مدل بر اساس داده‌های معتبر ارائه شده و در جدول ۱ آورده شده است.

۴-۱-۱- ۲- بتن سبک

یکی از نوآوری‌های اصلی این پژوهش، استفاده از بتن سبک در بخش‌هایی از شبکه مربعی به‌صورت چینش تناوبی(چیدمان یکی در میان) می‌باشد. این ایده با هدف کاهش جرم سازه، بهینه‌سازی جذب انرژی و کنترل موضعی آسیب در برابر بارهای دینامیکی از جمله بارگذاری ناشی از انفجار، توسط نویسندگان این پژوهش ارائه شده است. برای مدلسازی دقیق رفتار غیرخطی بتن سبک در نرم‌افزار ABAQUS 2024، از مدل پلاستیسیته آسیب بتن[۷] استفاده گردیده است. در این مدل، تمامی پارامترهای فیزیکی و مکانیکی بتن شامل مدول یانگ، ضریب پواسون، چگالی، آسیب در کشش و فشار و رفتار تنش-کرنش به‌صورت دقیق و مطابق با نیاز تحلیل استفاده شده‌اند.

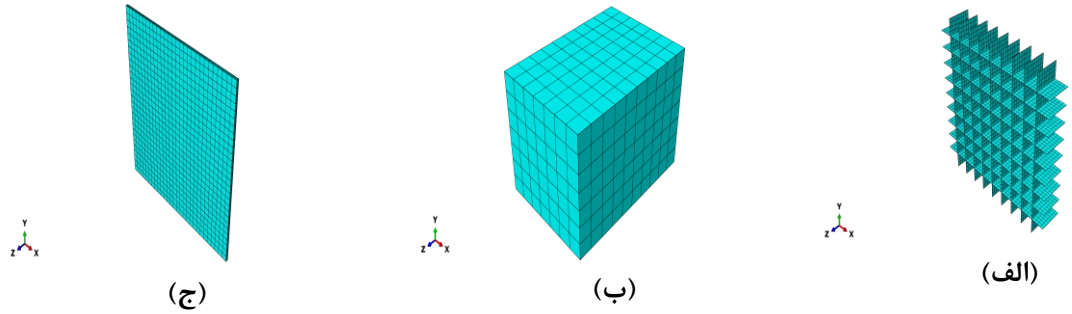
از آنجا که در پژوهش مرجع [۱۷] بتن سبک مورد بررسی قرار نگرفته است، پارامترهای مکانیکی و دینامیکی بتن سبک در این تحقیق بر اساس مقادیر متعارف گزارش‌شده در ادبیات مربوط به مدل CDP برای بتن‌های سبک انتخاب شده‌اند. این پارامترها شامل چگالی، مدول الاستیسیته، نسبت پواسون، زاویه اتساع، نسبت تنش دومحوره به تک‌محوره و منحنی‌های آسیب کششی و فشاری می‌باشند. به‌منظور اطمینان از پایداری عددی و سازگاری پاسخ دینامیکی مدل، پارامترهای آسیب کششی و فشاری از طریق کالیبراسیون عددی تنظیم شده‌اند؛ به‌گونه‌ای که پاسخ‌های کلیدی سازه شامل جابجایی بیشینه صفحات، کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) و انرژی کل، روندی منطقی و سازگار با مدل پایه و رفتار فیزیکی مورد انتظار نشان دهند. همچنین، یک تحلیل حساسیت محدود بر روی پارامترهای اصلی مدل

[7] Concrete Damaged Plasticity- CDP

CDP انجام شد که نتایج آن بیانگر تأثیر محدود این پارامترها بر پاسخ کلی سازه بوده و پایداری رفتار دینامیکی بتن سبک تعریف‌شده در مدل عددی را تأیید می‌کند.

جدول۱: مقادیر ورودی مل مواد سازنده و آسیب Johnson-Cook برای سازه ساندویچی تحقیق [۱۷]،

پارامتر		مقدار
مدول الاستیک	E	۱۶۱
نسبت پواسون	ν	۰/۳۵
چگالی	ρ	۷۸۵۰
ضریب نرخ کرنش	$\dot{\varepsilon}_0$	۰/۰۰۱
دمای انتقال	Tr	۲۰
دمای ذوب	Tm	۱۴۲۷
مقاومت تسلیم اولیه	A	۴۰۰
ضریب سخت شوندگی	B	۱۴۰۰
ضریب حساسیت به نرخ کرنش	C	۰/۰۴۵
توان سخت شوندگی	N	۰/۴
ضریب حساسیت به دما	M	۱/۲
کرنش شکست اولیه	D_1	-۰/۷۷
ضریب نمایی	D_2	۱/۴۵
ضریب سه محوری بودن تنش	D_3	-۰/۴۷
ضریب نرخ کرنش برای شکست	D_4	۰
ضریب دما برای شکست	D_5	۱/۶



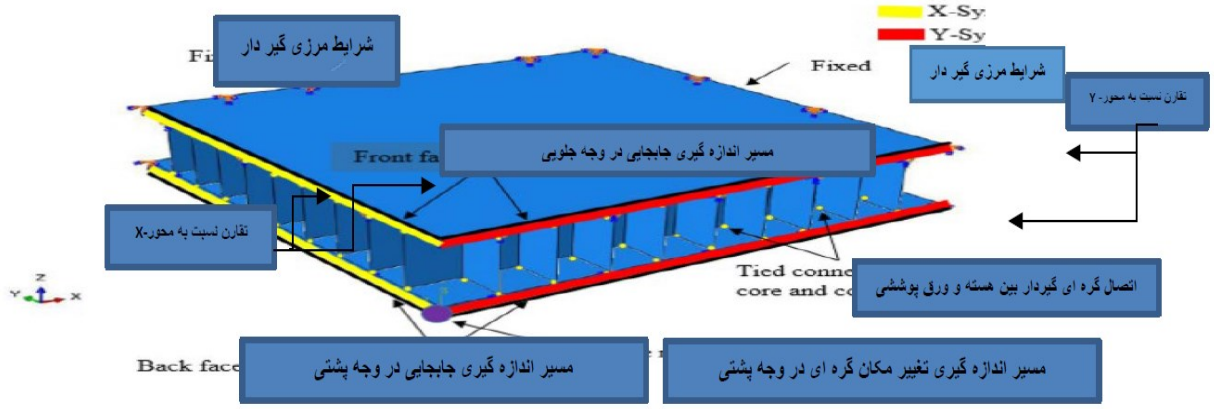
شکل۴ : مش بندی اجزای مختلف سازه ساندویچی

۴-۱-۱- ۳- مش بندی

مش‌بندی به صورت دقیق و با دو اندازه متفاوت برای بخش‌های مختلف مدل انجام شده است. سایز مش مناسب با انجام چندین تحلیل و سعی و خطا تعیین گردید تا نتایج نمودارها تطابق قابل قبولی با نتایج تحقیق [۱۷]، داشته باشند. مش‌بندی شبکه داخلی فلزی مطابق شکل (۴- الف) و مکعب‌های بتن سبک مطابق شکل (۴-ب) با اندازه ۱/۵ میلی‌متر، مش‌بندی صفحات پوششی بالا و پایین مطابق شکل (۴-ج) با اندازه ۱۱ میلی‌متر، علاوه بر این، ضخامت دیواره‌های صفحات بالا و پایین و شبکه فلزی به چهار قسمت تقسیم شده تا دقت تحلیل افزایش یابد.

۴-۲-شرایط مرزی و محل اندازه گیری جابجایی صفحات و کرنش پلاستیک وارد شده به یک نقطه

شرایط مرزی و محل اندازه‌گیری جابجایی و کرنش پلاستیک در مدل، بر اساس تحقیق [۱۷]، تعریف شده است. در شکل ۵ نحوه‌ی اعمال شرایط مرزی و نقاط ثبت داده‌ها نمایش داده شده است. برای کاهش حجم محاسبات، از تقارن ساختاری استفاده گردید؛ به‌گونه‌ای که دو ضلع مجاور محل انفجار با محدودیت کامل جابجایی و دوران مدل شدند و اضلاع مقابل، که عمود بر جهت بارگذاری قرار دارند، تنها در راستای عمود بر بارگذاری مقید گردیدند. این تنظیمات باعث شبیه‌سازی دقیق‌تر رفتار واقعی سازه در برابر انفجار گوشه‌ای و انتقال مؤثر بار به اجزای مجاور شد.



شکل۵ :شرایط مرزی سازه ساندویچی، مسیر اندازه گیری جابجایی صفحات و کرنش پلاستیک وارد شده در تحقیق [۱۷]

۴-۳-اعمال بار انفجار

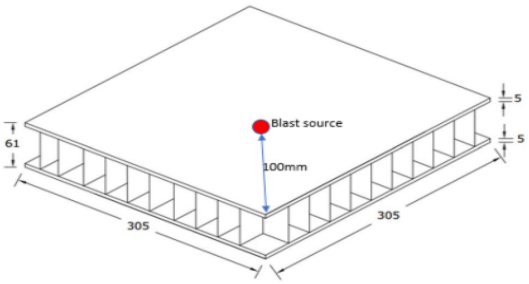
اعمال بار انفجاری در این پژوهش مطابق با تنظیمات ارائه‌شده در تحقیق مرجع [۱۷] انجام شده است تا امکان مقایسه و اعتبارسنجی نتایج فراهم گردد. همان‌گونه که در شکل (۶) نشان داده شده است، انفجار از نوع هوایی نزدیک در نظر گرفته شده و موقعیت، فاصله منبع انفجار تا سطح پانل، جرم ماده منفجره و مدت‌زمان اثر موج فشار برای سه حالت ۱، ۲ و ۳ کیلوگرم TNT در جدول (۳) ارائه شده‌اند. این تنظیمات به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که شرایط بارگذاری مرجع با دقت مناسبی بازتولید شود.

بار انفجاری با استفاده از قابلیت Incident Wave در نرم‌افزار ABAQUS/Explicit نسخه ۲۰۲۴ مدل‌سازی شده است. در این روش، موج انفجار به‌صورت یک موج فشار برخوردی منتشرشونده (Propagating Incident Pressure Wave) تعریف می‌شود که بدون نیاز به مدل‌سازی صریح محیط هوا، امکان شبیه‌سازی اثر انفجار هوایی نزدیک را فراهم می‌سازد. سطح اعمال موج در فاصله ۱۰۰ میلی‌متری از گوشه پانل تعریف شده و بارگذاری برای هر یک از جرم‌های ۱، ۲ و ۳ کیلوگرم TNT به‌صورت مستقل اعمال گردیده است. شکل زمانی موج فشار و مقدار فشار مؤثر به‌صورت داخلی توسط نرم‌افزار و بر اساس داده‌های ورودی انفجار محاسبه می‌شود. این رویکرد ضمن کاهش هزینه محاسباتی، از پایداری عددی مناسبی برخوردار بوده و امکان استخراج پاسخ‌های دینامیکی سازه، شامل جابجایی‌ها، کرنش‌های پلاستیک و مؤلفه‌های مختلف انرژی را با دقت قابل قبول فراهم می‌کند.لازم به ذکر است که در این پژوهش از مدل تجربی CONWEP یا داده‌های فشار–زمان آزمایشگاهی استفاده نشده است.

بلکه موج انفجار به‌صورت یک موج برخوردی ورودی منتشرشونده (Propagating Incident Pressure Wave) در فضای آزاد و در فاصله ۱۰۰ میلیمتری از سازه اعمال شده است. فشار اعمالی به‌صورت داخلی توسط الگوریتم صریح نرم‌افزار ABAQUS و بر اساس پارامترهای هندسی انفجار (جرم TNT و فاصله) محاسبه می‌شود و کاربر مستقیماً تاریخچه فشار–زمان را تعریف نمی‌کند.

جدول۲ : پارامترهای انفجار هوایی در تحقیق [۱۷]

مقدار	عنوان مشخصه انفجار
موج ورودی	نوع بارگذاری
TNT	ماده منفجره
۱، ۲و ۳ کیلوگرم	جرم های ماده منفجره
۱۰۰ میلی‌متر در راستای عمود بر صفحه رویی سازه	فاصله انفجار تا سازه
در گوشه سازه (در تحقیق [17].	محل انفجار



شکل۶ :محل و فاصله اثر TNT بر سازه ساندویچی در تحقیق [۱۷]

۴-۴- اعتبارسنجی مدل عددی

به‌منظور ارزیابی دقت و قابلیت اعتماد مدل عددی، ابتدا مدل پایه (سازه ساندویچی با هسته فلزی توخالی و بدون بتن سبک) با نتایج پژوهش مرجع [۱۷] که از نظر هندسه، شرایط مرزی و نوع بارگذاری انفجاری دارای بیشترین انطباق با مدل حاضر است، مقایسه گردید. معیارهای اعتبارسنجی شامل مقایسه جابجایی بیشینه صفحات فوقانی و تحتانی تحت سه سطح بارگذاری انفجاری

(۱، ۲ و ۳ کیلوگرم TNT) بوده است. نتایج مقایسه نشان می‌دهد که اختلاف جابجایی بیشینه بین مدل حاضر و نتایج مرجع در تمامی حالات کمتر از حدود ۵ تا ۷ درصد می‌باشد. این میزان اختلاف با توجه به تفاوت‌های اجتناب‌ناپذیر در نوع المان‌ها، اندازه مش، الگوریتم تماس و تنظیمات عددی تحلیل Explicit قابل قبول تلقی می‌شود. علاوه بر این، بررسی تاریخچه انرژی مصنوعی در تمامی تحلیل‌ها نشان داد که

مقدار آن در محدوده مجاز باقی مانده است که بیانگر پایداری عددی و صحت پاسخ دینامیکی مدل می‌باشد. بر این اساس، مدل عددی حاضر از دقت و قابلیت اعتماد کافی برای بررسی رفتار دینامیکی سازه ساندویچی تحت بارگذاری انفجاری برخوردار است.

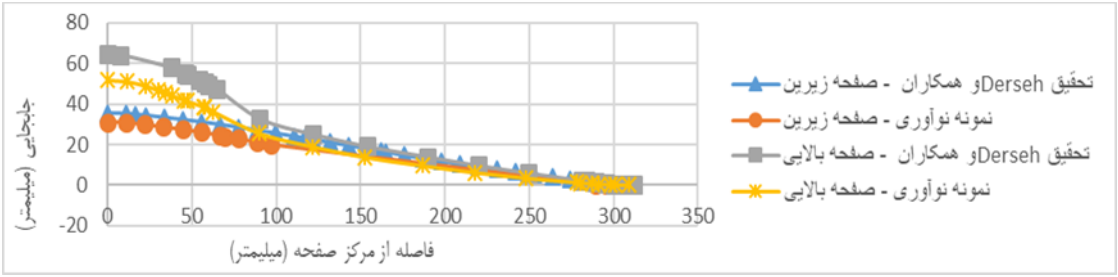
۵-۴- تنظیمات تحلیل[8]

تحلیل عددی به‌صورت دینامیکی و غیرخطی و با استفاده از استپ Explicit در نرم‌افزار ABAQUS 2024 انجام گرفت. مدت‌زمان کل تحلیل ۰/۰۰۱۵ ثانیه در نظر گرفته شد که متناسب با زمان وقوع پیک جابجایی تحت بارگذاری انفجاری است. تمامی غیرخطی‌های هندسی و مصالحی در مدل لحاظ گردید. خروجی‌های اصلی شامل کرنش پلاستیک مؤثر (PEEQ)، انرژی‌های جذب‌شده (ویسکوز، پلاستیک و کل) و جابجایی صفحه پشتی مطابق پژوهش [۱۷]، استخراج شدند. به‌دلیل عدم ارائه جزئیات مش‌بندی در تحقیق فوق الذکر، اندازه المان‌ها با انجام چندین تحلیل و روش سعی و خطا تعیین شد تا نتایج حاصل تطابق مناسبی با نتایج تحقیق[۱۷]، داشته باشند.

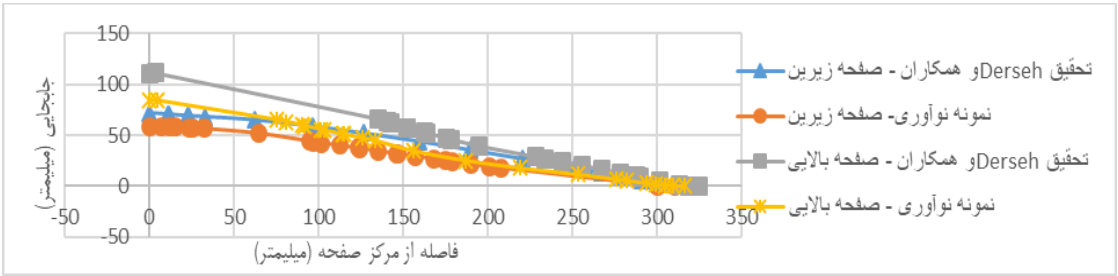
۵- تحلیل نتایج نمودارها

۵-۱- بررسی جابجایی بیشینه صفحات فوقانی و تحتانی تحت بارگذاری انفجاری (۱، ۲ و ۳ کیلوگرم TNT)

مطابق شکل‌های ۷ تا ۹، جابجایی بیشینه صفحات فوقانی و تحتانی تحت سه سطح بار TNT بررسی شد. در بار ۱ کیلوگرم TNT، جابجایی صفحه فوقانی در تحقیق[۱۷]، حدود ۶۵ میلی‌متر گزارش شده است، در حالی که در مدل نوآورانه با هسته شبکه‌ای پرشده با بتن سبک به حدود ۵۲ میلی‌متر کاهش یافته است. صفحه زیرین نیز از ۳۴ میلی‌متر در تحقیق] [۱۷]، به ۳۱ میلی‌متر کاهش یافته است. با افزایش بار ۲ کیلوگرم TNT، جابجایی صفحه بالایی در تحقیق [۱۷]، حدود ۱۱۰ میلی‌متر و صفحه زیرین ۷۰ میلی‌متر بود، در حالی که در مدل نوآورانه به ترتیب ۸۰ و ۶۰ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. در ۳ کیلوگرم TNT، جابجایی صفحه فوقانی در تحقیق[۱۷]، ۱۱۵ میلی‌متر و صفحه زیرین ۸۴ میلی‌متر ثبت شده است، در حالی که مدل نوآورانه مقادیر ۱۰۹ و ۷۲ میلی‌متر را نشان داد. نتایج نشان می‌دهد که مدل نوآورانه در تمامی سطوح بارگذاری جابجایی کمتری نسبت به مدل مرجع دارد و حضور بتن سبک در هسته موجب کاهش اختلاف جابجایی صفحات و بهبود توزیع تنش‌ها و مقاومت سازه در برابر انفجار می‌شود.

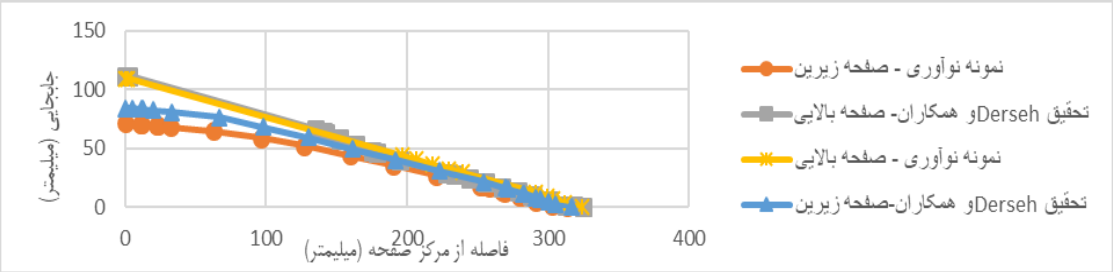


شکل۷: تغییرات جابجایی صفحه بالا و پایین نسبت به فاصله از مرکز صفحه تحت بار ۱ کیلوگرم TNT



شکل۸: تغییرات جابجایی صفحه بالا و پایین نسبت به فاصله از مرکز صفحه تحت بار ۲ کیلوگرم TNT

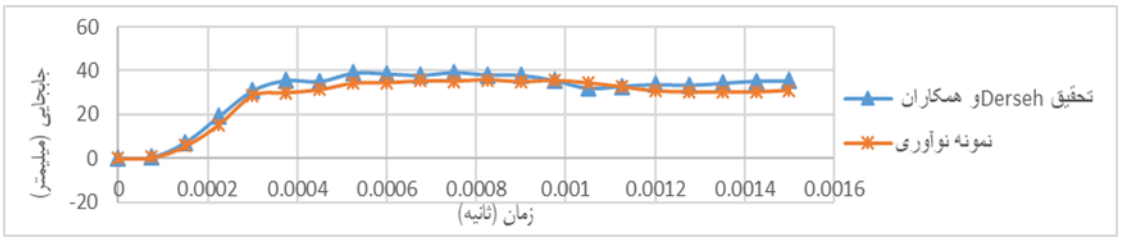
[8] **Step Definition**



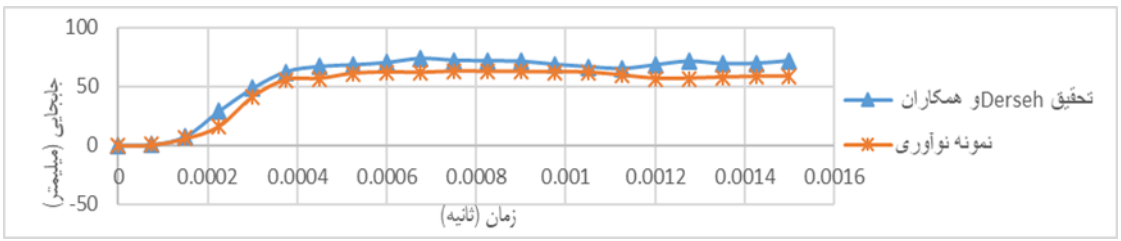
شکل ۹: تغییرات جابجایی صفحه بالا و پایین نسبت به فاصله از مرکز صفحه تحت بار ۳ کیلوگرم TNT

۵-۲- بررسی تاریخچه جابجایی–زمان صفحات تحت بارگذاری انفجاری (۱، ۲ و ۳ کیلوگرم TNT)

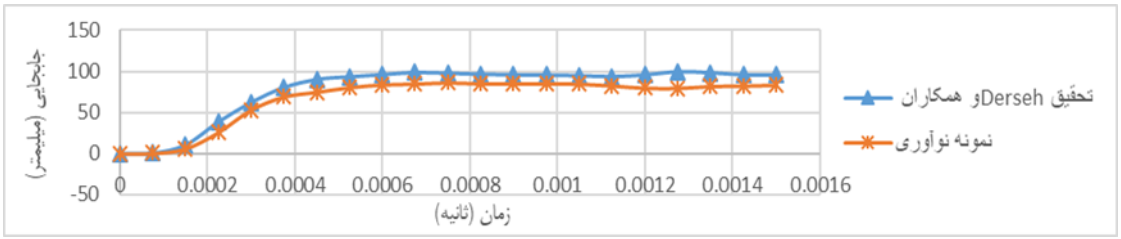
مطابق شکل‌های ۱۰ تا ۱۲، منحنی‌های جابجایی-زمان صفحات تحت سه سطح بار TNT بررسی شد. در بار ۱ کیلوگرمTNT، سازه در تحقیق [۱۷]، به سرعت به حداکثر جابجایی رسید و سپس با نوسانات میرا مواجه شد. مدل نوآورانه با هسته تقویت‌شده با بتن سبک، جابجایی اولیه ملایم‌تر، حداکثر جابجایی کمتر و دامنه نوسانات کاهش یافته را نشان داد. در ۲ و ۳ کیلوگرمTNT ، مدل نوآورانه نیز نسبت به تحقیق [۱۷]، جابجایی کمتر، دامنه نوسانات کوتاه‌تر و پاسخ دینامیکی پایدارتر داشت. نتایج نشان می‌دهد که حضور بتن سبک در هسته، موجب کاهش جابجایی، افزایش میرایی و پایداری دینامیکی بهتر سازه در برابر انفجار می‌شود.



شکل ۱۰: منحنی‌های تاریخچه جابجایی–زمان صفحات تحت اثر بار انفجاری ۱ کیلوگرم TNT



شکل ۱۱: منحنی‌های تاریخچه جابجایی–زمان صفحات تحت اثر بار انفجاری ۲ کیلوگرم TNT

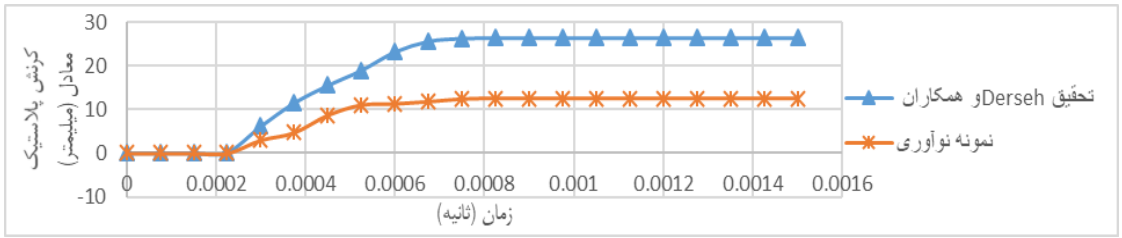


شکل ۱۲: منحنی‌های تاریخچه جابجایی–زمان صفحات تحت اثر بار انفجاری ۳ کیلوگرم TNT

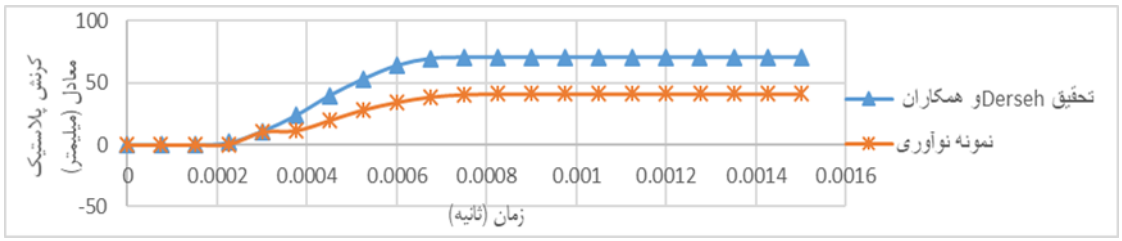
۵-۳- بررسی تاریخچه کرنش پلاستیک معادل–زمان صفحات تحت بارگذاری انفجاری (۱، ۲ و ۳ کیلوگرم TNT)

شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ تاریخچه کرنش پلاستیک معادل–زمان صفحات سازه‌های ساندویچی لانه‌زنبوری تحت بار انفجاری ۱، ۲ و ۳ کیلوگرم TNT را در تحقیق [۱۷]، و مدل نوآورانه با ترکیب بتن سبک نشان می‌دهند. در بار ۱ کیلوگرمTNT ، در مدل [۱۷]، افزایش سریع کرنش پلاستیک و تغییر شکل‌های دائمی قابل توجهی را نشان داد، در حالی که مدل نوآورانه افزایش ملایم‌تر و مقدار نهایی کمتر کرنش را ثبت کرد (شکل ۱۳). در ۲ و ۳ کیلوگرمTNT ، مدل نوآورانه نیز افزایش کرنش پلاستیک ملایم‌تر، مقدار نهایی کمتر و رسیدن سریع‌تر به حالت پایدار را نشان داد (شکل‌های ۱۴ و ۱۵). نتایج نشان می‌دهد که حضور بتن سبک در هسته، موجب کاهش شیب افزایش کرنش، کاهش مقدار نهایی و بهبود توزیع تنش‌ها شده و مقاومت سازه در برابر انفجارهای کم تا شدید را بهبود می‌دهد.

شکل ۱۳: منحنی های تاریخچه کرنش پلاستیک معادل-زمان صفحات تحت اثر بار انفجاری ۱ کیلوگرم TNT



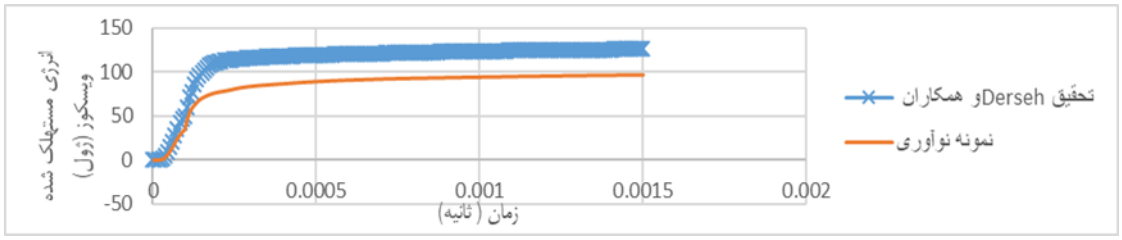
شکل ۱۴: منحنی های تاریخچه کرنش پلاستیک معادل-زمان صفحات تحت اثر بار انفجاری ۲ کیلوگرم TNT



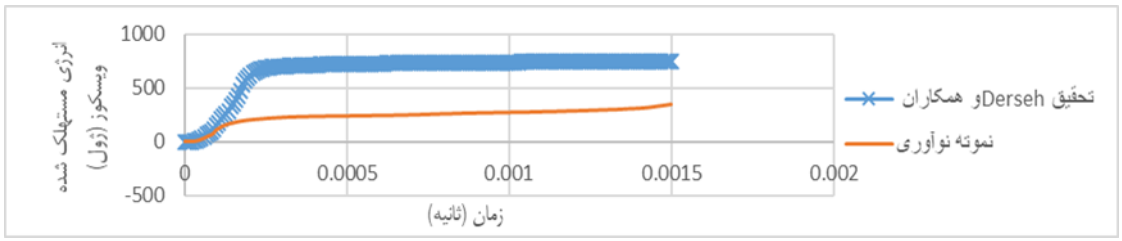
شکل ۱۵: منحنی های تاریخچه کرنش پلاستیک معادل-زمان صفحات تحت اثر بار انفجاری ۳ کیلوگرم TNT

۵-۴- بررسی تاریخچه انرژی اتلاف ویسکوز–زمان صفحات تحت بارگذاری انفجاری (۱، ۲ و ۳ کیلوگرمTNT)

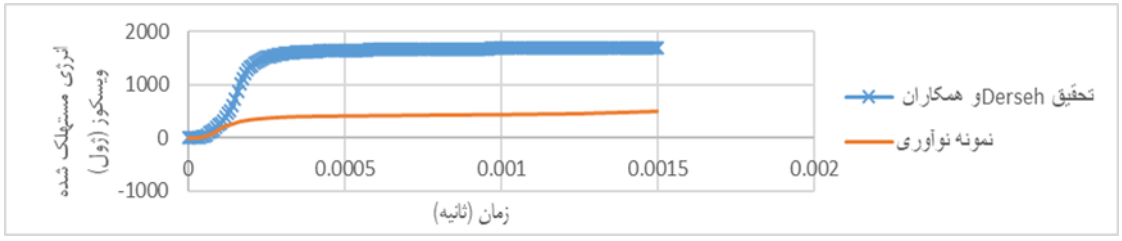
مطابق شکل‌های ۱۶ تا ۱۸، منحنی‌های انرژی اتلاف ویسکوز–زمان صفحات تحت سه سطح بار TNT بررسی شد. در بار ۱ کیلوگرم TNT، در مدل [۱۷]، افزایش سریع انرژی اتلاف ویسکوز و مقدار نسبتاً بالایی را نشان داد، در حالی که مدل نوآورانه افزایش ملایم‌تر و مقدار نهایی کمتر انرژی را ثبت کرد (شکل ۱۶). در ۲ و ۳ کیلوگرمTNT ، مدل نوآورانه نیز افزایش ملایم‌تر، مقدار نهایی کمتر و رسیدن سریع‌تر به حالت پایدار را نشان داد (شکل‌های ۱۷ و ۱۸). نتایج نشان می‌دهد که حضور بتن سبک در هسته، موجب کاهش شیب افزایش انرژی اتلاف ویسکوز، کاهش مقدار نهایی و رسیدن سریع‌تر به حالت پایدار شده و عملکرد کلی سازه در جذب انرژی انفجار و کاهش گرمای تولیدی را بهبود می‌بخشد.



شکل ۱۶: منحنی های تاریخچه انرژی اتلاف ویسکوز-زمان صفحات تحت اثر بار انفجاری ۱ کیلوگرم TNT



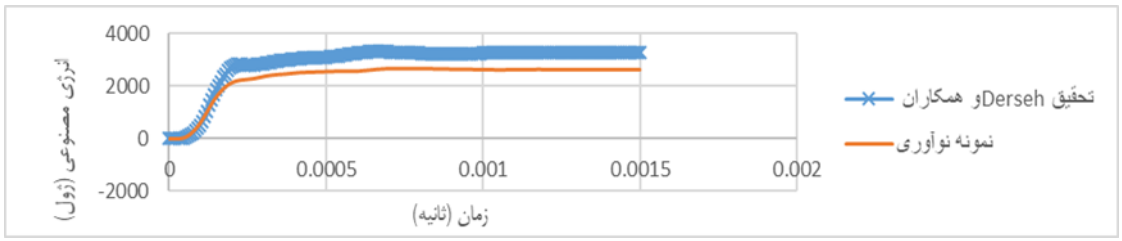
شکل ۱۷ : منحنی های تاریخچه انرژی اتلاف ویسکوز-زمان صفحات تحت اثر بار انفجاری ۲ کیلوگرم



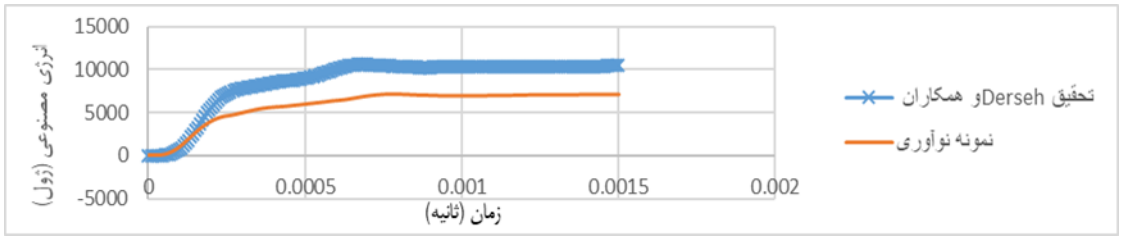
شکل ۱۸: منحنی های تاریخچه انرژی اتلاف ویسکوز-زمان صفحات تحت اثر بار انفجاری ۳ کیلوگرم TNT

۵-۵- بررسی تاریخچه انرژی مصنوعی–زمان صفحات تحت بارگذاری انفجاری (۱، ۲ و ۳ کیلوگرمTNT)

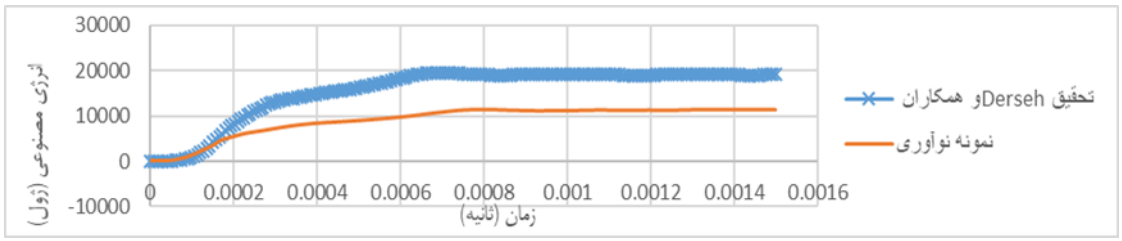
مطابق شکل‌های ۱۹ تا ۲۱، منحنی‌های انرژی مصنوعی-زمان صفحات تحت سه سطح بار TNT بررسی شد. در بار ۱ کیلوگرم TNT، در مدل [۱۷]، افزایش سریع انرژی مصنوعی و مقدار نسبتاً بالایی را نشان داد، در حالی که مدل نوآورانه افزایش ملایم‌تر و مقدار نهایی کمتر انرژی را ثبت کرد (شکل ۱۹). در ۲ و ۳ کیلوگرمTNT ، مدل نوآورانه نیز افزایش ملایم‌تر، مقدار نهایی کمتر و کاهش تغییر شکل‌های دائمی را نشان داد (شکل‌های ۲۰ و ۲۱). نتایج نشان می‌دهد که حضور بتن سبک در هسته، موجب کاهش شیب افزایش انرژی مصنوعی، کاهش مقدار نهایی و کاهش تغییر شکل‌های دائمی شده و عملکرد کلی سازه در جذب انرژی انفجار و جلوگیری از آسیب‌های ماندگار را بهبود می‌بخشد.



شکل ۱۹ : منحنی های تاریخچه انرژی مصنوعی-زمان صفحات تحت بار انفجاری ۱ کیلوگرم TNT



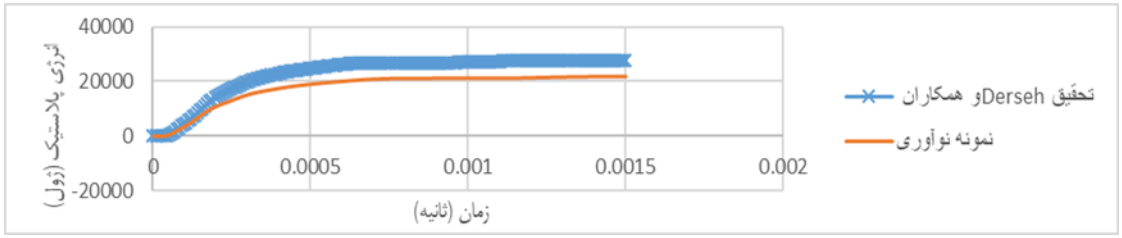
شکل ۲۰ : منحنی های تاریخچه انرژی مصنوعی-زمان صفحات تحت بار انفجاری ۲ کیلوگرم TNT



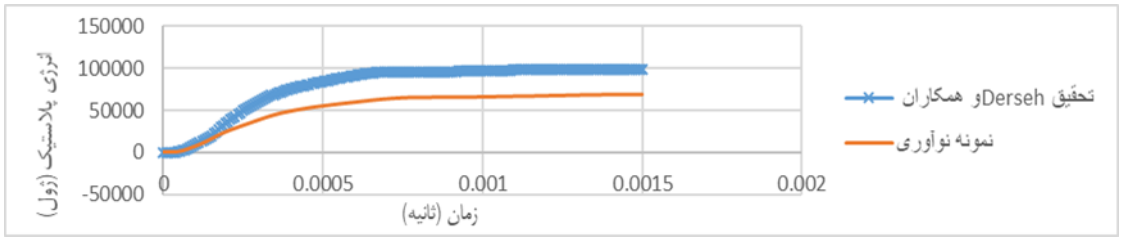
شکل ۲۱ : منحنی های تاریخچه انرژی مصنوعی-زمان صفحات تحت بار انفجاری ۳ کیلوگرم TNT

۵-۶- بررسی تاریخچه انرژی پلاستیک–زمان صفحات تحت بارگذاری انفجاری (۱، ۲ و ۳ کیلوگرمTNT)

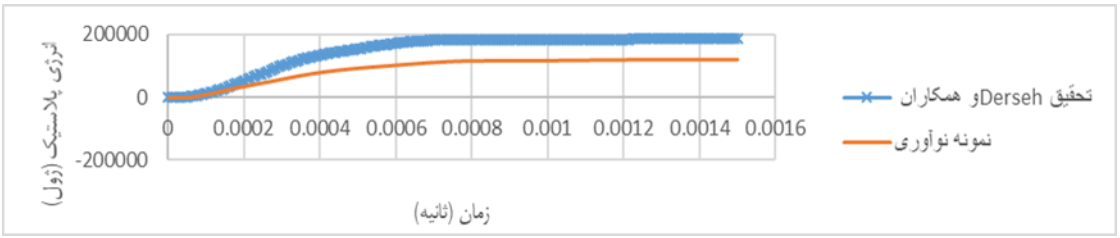
مطابق شکل‌های ۲۲ تا ۲۴، منحنی‌های انرژی پلاستیک-زمان صفحات تحت سه سطح بار TNT بررسی شد. در بار ۱ کیلوگرم TNT، در مدل [۱۷]، افزایش سریع انرژی پلاستیک و مقدار نسبتاً بالایی را نشان داد، در حالی که مدل نوآورانه افزایش ملایم‌تر و مقدار نهایی کمتر انرژی را ثبت کرد (شکل ۲۲). در ۲ و ۳ کیلوگرمTNT ، مدل نوآورانه نیز افزایش ملایم‌تر، مقدار نهایی کمتر و رسیدن سریع‌تر به حالت پایدار را نشان داد (شکل‌های ۲۳ و ۲۴). نتایج نشان می‌دهد که حضور بتن سبک در هسته، موجب کاهش شیب افزایش انرژی پلاستیک، کاهش مقدار نهایی و کاهش آسیب‌های دائمی شده و عملکرد کلی سازه در جذب انرژی انفجار و کاهش تخریب‌های ماندگار را بهبود می‌بخشد.



شکل ۲۲: منحنی های تاریخچه انرژی پلاستیک-زمان صفحات تحت بار انفجاری ۱ کیلوگرم TNT



شکل ۲۳: منحنی های تاریخچه انرژی پلاستیک-زمان صفحات تحت بار انفجاری ۲ کیلوگرم TNT

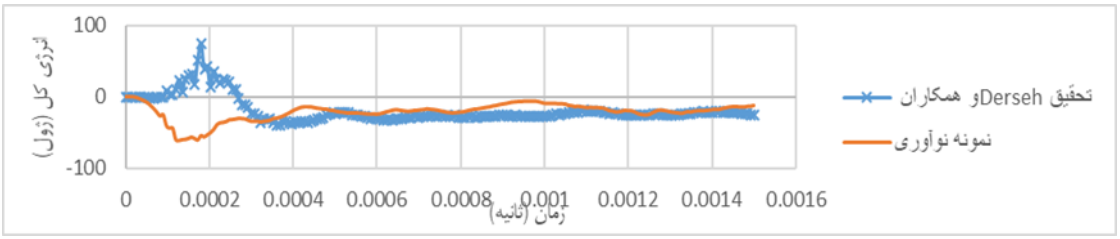


شکل ۲۴: منحنی های تاریخچه انرژی پلاستیک-زمان صفحات تحت بار انفجاری ۳ کیلوگرم TNT

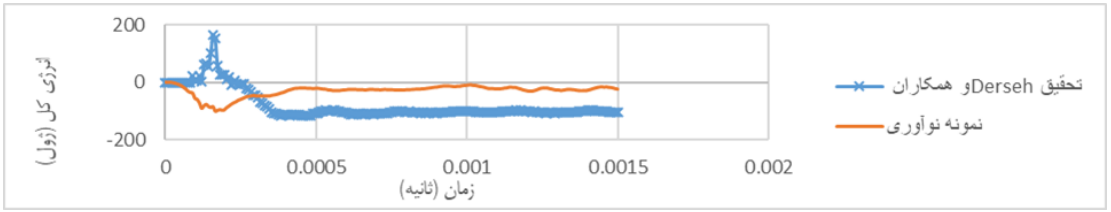
۵-۷- تحلیل تاریخچه انرژی کل صفحات تحت بارگذاری انفجاری (۱، ۲ و ۳ کیلوگرم TNT)

مطابق شکل‌های ۲۵ تا ۲۷، منحنی‌های انرژی کل صفحات تحت سه سطح بار TNT بررسی شد. در بار ۱ کیلوگرمTNT، در مدل[۱۷]، بیشینه انرژی اولیه حدود ۱۵ ژول و انرژی نهایی مثبت را نشان داد، در حالی که مدل نوآورانه کاهش شدیدتری در انرژی کل و مقدار نهایی منفی ۸ ژول داشت (شکل ۲۵). در بار ۲ کیلوگرمTNT ، مدل نوآورانه کاهش شدیدتر انرژی کل و رسیدن به مقدار نهایی منفی نزدیک را نشان داد (شکل ۲۶). در بار ۳ کیلوگرمTNT ، مدل مرجع انرژی کل تا ۱۷۰ ژول افزایش یافت و پس از افت شدید به حدود منفی ۱۱۰ ژول تثبیت شد، در حالی که مدل نوآورانه بیشینه انرژی اولیه پایین‌تر و انرژی نهایی حدود منفی ۵۰ ژول و تغییرات ملایم‌تر انرژی را ثبت کرد (شکل ۲۷). نتایج نشان می‌دهد که حضور بتن سبک در هسته موجب کاهش تمرکز انرژی، افزایش جذب داخلی و کنترل بهتر آسیب‌ها در سازه تحت بار انفجاری می‌شود.

شکل ۲۵: منحنی‌های انرژی کل صفحات تحت اثر بار انفجاری ۱ کیلوگرم TNT



شکل ۲۶ : منحنی‌های انرژی کل صفحات تحت اثر بار انفجاری ۲ کیلوگرمی TNT



شکل ۲۷: منحنی‌های انرژی کل صفحات تحت اثر بار انفجاری ۳ کیلوگرمی TNT

۵-۸- تحلیل مکانیزم جذب و توزیع انرژی در سازه

با توجه به نتایج ارائه‌شده در بخش‌های ۵-۴ تا ۵-۷، کاهش انرژی کل ثبت‌شده در مدل نوآورانه نباید به‌عنوان کاهش ظرفیت جذب انرژی سازه تفسیر شود، بلکه بیانگر تغییر مکانیزم جذب و توزیع انرژی در اجزای سازه است. در مدل مرجع [۱۷]، بخش قابل‌توجهی از انرژی ورودی ناشی از انفجار به‌صورت تغییرشکل‌های شدید، کرنش پلاستیک بالا و نوسانات طولانی‌مدت در صفحات فوقانی و تحتانی ذخیره یا مستهلک می‌شود که منجر به تمرکز انرژی در این اجزا می‌گردد. در مقابل، در مدل نوآورانه، حضور بتن سبک در هسته شبکه‌ای فلزی باعث انتقال بخشی از انرژی ورودی به داخل هسته شده و این انرژی از طریق ترکیبی از رفتار الاستیک–پلاستیک شبکه فلزی، آسیب تدریجی بتن سبک و میرایی داخلی مستهلک می‌شود. این فرآیند موجب کاهش انرژی پلاستیک و ویسکوز در صفحات و در عین حال توزیع یکنواخت‌تر انرژی در کل سازه می‌گردد. کاهش دامنه نوسانات پاسخ دینامیکی، رسیدن سریع‌تر به حالت پایدار و کاهش کرنش پلاستیک معادل صفحات، همگی مؤید این تغییر مکانیزم جذب انرژی هستند. بنابراین، کاهش مقدار انرژی کل در مدل نوآورانه نشان‌دهنده کنترل مؤثرتر پاسخ دینامیکی، کاهش تمرکز انرژی در صفحات و جلوگیری از توسعه آسیب‌های ماندگار است، نه کاهش توانایی سازه در مقابله با بار انفجاری. این موضوع به‌ویژه در بارهای انفجاری متوسط و شدید (۲ و ۳ کیلوگرم TNT) نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود عملکرد سازه ایفا می‌کند. منفی شدن مقطعی انرژی کل ناشی از نحوه تعریف آن در تحلیل Explicit به‌صورت اختلاف بین انرژی داخلی ذخیره‌شده و کار خارجی اعمال‌شده است. پس از عبور پیک فشار انفجار، بازتاب موج و آزادسازی انرژی ذخیره‌شده موجب کاهش لحظه‌ای انرژی داخلی سیستم می‌شود که به‌صورت مقادیر منفی انرژی کل ظاهر می‌گردد. بررسی انرژی مصنوعی نشان می‌دهد که سهم آن همواره کمتر از حد مجاز بوده و بنابراین این رفتار ناشی از پدیده‌های فیزیکی سیستم و نه ناپایداری عددی است.

۶- نتیجه‌گیری

۱) در این پژوهش، به بررسی عملکرد یک سازه ساندویچی فلزی با هسته نوآورانه متشکل از شبکه مربعی فلزی پرشده به‌صورت چینش تناوبی (چیدمان یکی در میان) با بتن سبک در برابر بارگذاری انفجاری پرداخته شد. مدلسازی در محیط ABAQUS 2024 انجام گرفت و رفتار سازه در برابر انفجار ناشی از سه جرم متفاوت (۱، ۲ و ۳ کیلوگرم) TNT تحلیل گردید.

۲) تمرکز اصلی مطالعه بر مقایسه‌ی رفتار دینامیکی تحقیق[9] و همکاران(۲۰۲۳)، (سازه با هسته فلزی توخالی) و مدل نوآورانه (سازه با هسته فلزی پرشده با بتن سبک) بود.

۳) نتایج حاصل از تحلیل‌ها نشان داد که استفاده از بتن سبک درون شبکه فلزی نه‌تنها موجب کاهش چشمگیر جابجایی صفحات فوقانی و تحتانی سازه تحت بار انفجاری گردید، بلکه به‌طور معناداری کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) را نیز کاهش داد. این کاهش کرنش‌ها به دلیل ایجاد سختی موضعی بیشتر و توزیع تنش یکنواخت‌تر در مدل نوآورانه نسبت به مدل تحقیق درسه و همکاران (۲۰۲۳) است. همچنین، نمودارهای تاریخچه زمانی جابجایی نشان دادند که مدل نوآورانه دارای دامنه نوسانات کمتری پس از انفجار بوده و سریع‌تر به تعادل می‌رسد، که این موضوع حاکی از بهبود رفتار دینامیکی و افزایش میرایی سازه است. از طرف دیگر، بررسی انرژی‌های مستهلک‌شده (ویسکوز، پلاستیک، مصنوعی و کل) در دو مدل نشان داد که انرژی کل جذب‌شده در مدل نوآورانه کمتر از مدل تحقیق درسه و همکاران(۲۰۲۳) بوده و در عین حال به‌صورت مؤثرتری در کل سازه توزیع شده است. این موضوع نشانگر ارتقای بازدهی انرژی‌گیر سازه پیشنهادی و کاهش تمرکز انرژی در نواحی خاص است.

۴) افزودن بتن سبک به‌صورت چینش تناوبی (چیدمان یکی در میان) در هسته فلزی سازه‌های ساندویچی، یک رویکرد نوآورانه و مؤثر در افزایش مقاومت سازه در برابر بارهای دینامیکی شدید به‌ویژه انفجار است.

۵) این سیستم می‌تواند علاوه بر افزایش ایمنی، به کاهش وزن سازه، کاهش هزینه‌های ساخت، و تسهیل اجرا نیز کمک کند و به‌عنوان یک گزینه کارآمد در طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجار، مخصوصاً در تأسیسات نظامی، صنعتی و سازه‌های حساس شهری مطرح گردد.

[9] Derseh

۷- محدودیت‌های پژوهش

علی‌رغم نتایج قابل قبول و روندهای مشخص به‌دست‌آمده در این پژوهش، برخی محدودیت‌ها در دامنه مطالعه وجود دارد که لازم است مورد توجه قرار گیرد. در این تحقیق، ابعاد هندسی هسته شبکه‌ای و ضخامت دیواره‌های فلزی ثابت در نظر گرفته شده و تأثیر تغییر این پارامترها بررسی نشده است. همچنین، تنها یک نوع بتن سبک با خواص مکانیکی مشخص مورد استفاده قرار گرفته و اثر انواع دیگر بتن‌های سبک یا مواد پرکننده بررسی نشده است. علاوه بر این، تحلیل‌ها محدود به سه سطح بار انفجاری هوایی نزدیک ناشی از جرم‌های ۱، ۲ و ۳ کیلوگرم TNT بوده و سایر سناریوهای بارگذاری انفجاری نظیر انفجارهای شدیدتر، انفجار تماسی یا زیرسطحی مورد بررسی قرار نگرفته است. اثرات حرارتی، تخریب پیشرونده، و آسیب تجمعی ناشی از بارگذاری‌های مکرر نیز در این مطالعه لحاظ نشده است. از نظر عددی، اگرچه مدل‌سازی دینامیکی با استفاده از روش Explicit و کنترل انرژی مصنوعی انجام شده است، اما اعتبارسنجی نتایج به داده‌های عددی مرجع محدود بوده و داده‌های آزمایشگاهی مستقیم برای این پیکربندی خاص در دسترس نبوده است. بنابراین، تعمیم نتایج به مقیاس‌های بزرگ‌تر یا شرایط بارگذاری متفاوت نیازمند بررسی و کالیبراسیون تکمیلی است.

۸- پیشنهادات برای تحقیقات آینده

۱) این پژوهش، اثربخشی استفاده از بتن سبک به صورت چینش تناوبی (چیدمان یکی در میان) در هسته سازه های ساندویچی فلزی برای بهبود عملکرد آنها در برابر بارگذاری انفجاری را نشان داد. با این حال، زمینه‌های متعددی برای تحقیقات آینده وجود دارد که می‌تواند به توسعه و بهینه‌سازی بیشتر این فناوری کمک کند. در زیر، برخی از مهم‌ترین این پیشنهادات ارائه شده است:

۲) بررسی پارامترهای هندسی هسته: در این پژوهش، از هسته مربعی با ابعاد ثابت استفاده شد. تحقیقات آینده می‌توانند به بررسی اثر تغییر ابعاد سلول‌های هسته (اندازه ضلع مربع، ارتفاع) و ضخامت دیواره‌ها بر پاسخ دینامیکی سازه بپردازند. علاوه بر این، مطالعه الگوهای مختلف قرارگیری بتن سبک (مانند آرایش قطری، زیگزاگی یا تصادفی) و استفاده از هندسه‌های دیگر برای هسته (مثلثی، شش ضلعی، دایره‌ای) می‌تواند منجر به طراحی بهینه‌تر سازه‌ها شود.

۳) بررسی انواع دیگر بارگذاری: در این پژوهش، تنها بارگذاری انفجاری مورد بررسی قرار گرفت. تحقیقات آینده می‌توانند عملکرد این سازه‌ها را تحت سایر انواع بارگذاری دینامیکی مانند ضربه[10]، بارگذاری چرخه‌ای[11] و خستگی[12] نیز بررسی کنند. این بررسی می‌تواند دامنه کاربرد این سازه‌ها را گسترده‌تر کند و امکان استفاده از آنها را در صنایع مختلف فراهم سازد.

۴) تحلیل اقتصادی و امکان‌سنجی: در این پژوهش، به طور خلاصه به مزایای اقتصادی استفاده از این نوع سازه‌ها اشاره شد. تحقیقات آینده می‌توانند یک تحلیل دقیق هزینه-فایده انجام دهند و امکان‌سنجی استفاده از این فناوری را در مقیاس واقعی بررسی کنند. این تحلیل می‌تواند به تصمیم‌گیران در ارزیابی پتانسیل تجاری این فناوری کمک کند.

۵) توسعه روش‌های طراحی بهینه: تحقیقات آینده می‌توانند به توسعه روش‌های طراحی بهینه برای سازه‌های ساندویچی با هسته بتن سبک متناوب بپردازند. این روش‌ها می‌توانند به مهندسان کمک کنند تا سازه‌هایی را طراحی کنند که هم عملکرد خوبی در برابر بارگذاری انفجاری داشته باشند و هم از نظر وزن و هزینه بهینه باشند. با انجام این تحقیقات، می‌توان به درک عمیق‌تری از رفتار این نوع سازه‌ها دست یافت و از آنها به طور موثرتری در کاربردهای مختلف مهندسی استفاده کرد.

[10] Impact
[11] Cyclic Loading
[12] Fatigue

سپاسگزاری

قدردانی ویژه‌ای از تلاش‌های بی‌وقفه تیم تحریریه مجله داریم که با دقت و مسئولیت‌پذیری، زمینه انتشار پژوهش‌ها را فراهم می‌کنند. همچنین از حمایت‌های مستمر مجله در ارتقای کیفیت علمی مقالات تقدیر و سپاس خود را اعلام می‌کنیم.

مراجع

[1] Tarlochan, F. (2021). Sandwich structures for energy absorption applications: A review. Materials, 14(16), 4731.

[2] Dharmasena, K.P., Wadley, H.N., Xue, Z. and Hutchinson, J.W. (2008). Mechanical response of metallic honeycomb sandwich panel structures to high-intensity dynamic loading. International Journal of Impact Engineering, 35(9), 1063–1074.

[3] Patel, M. and Patel, S. (2022). Novel design of honeycomb hybrid sandwich structures under air-blast. Journal of Sandwich Structures & Materials, 24(8), 2105–2123.

[4] Theobald, M.D., Langdon, G.S., Nurick, G.N., Pillay, S., Heyns, A. and Merrett, R.P. (2010). Large inelastic response of unbonded metallic foam and honeycomb core sandwich panels to blast loading. Composite Structures, 92(10), 2465–2475.

[5] Ebrahimi, H., Sadighi, M., Mohammadi, B. and Vaziri, A. (2018). Blast-resilience of honeycomb sandwich panels. International Journal of Mechanical Sciences, 144, 1–9.

[6] Patel, S., Ahmad, S. and Mahajan, P. (2018). Safety assessment of composite beam under ballistic impact. Thin-Walled Structures, 126, 162–170.

[7] Patel, S. and Soares, C.G. (2018). Reliability assessment of glass epoxy composite plates due to low velocity impact. Composite Structures, 200, 659–668.

[8] Rathbun, H., Deshpande, V.S., Fleck, N.A., Hayhurst, D.R. and Wadley, H.N.G. (2006). Performance of metallic honeycomb-core sandwich beams under shock loading. International Journal of Solids and Structures, 43(6), 1746–1763.

[9] Xue, Z. and Hutchinson, J.W. (2003). Preliminary assessment of sandwich plates subject to blast loads. International Journal of Mechanical Sciences, 45(4), 687–705.

[10] Yuen, S.C.K., Lu, G., Ong, L.S. and Nguyen, V.H. (2009). Sandwich panels subjected to blast loading. In: *Dynamic Failure of Materials and Structures*. Springer, pp. 297–325.

[11] Zhang, L., Li, H., Wang, Z. and Wang, X. (2014). Dynamic response of corrugated sandwich steel plates with graded cores. International Journal of Impact Engineering, 65, 185–194.

[12] Toutounchi, A. and Ahmadi, E. (2021). Structural behavior of prefabricated single- and double-sided concrete sandwich panels with different bottom layers and lightweight concrete core under flexural load. *Structure & Construction Engineering*, (in persian)

[13] Sabzevari, S. and Shahabian-Moghadam, F. (2018). Optimal shape and material selection of corrugated-core sandwich panels under blast loads. Structure & Construction Engineering

[14] Kumar, R. and S. Patel, Failure analysis on octagonal honeycomb sandwich panel under air blast loading. Materials Today: Proceedings, 2021. 46: p. 9667–9672.

[15] Bornstein, H. and Ackland, K. (2013). Evaluation of energy absorbing materials under blast loading. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 77, 125–136.

[16] Ahmed, S. and Galal, K. (2019). Response of metallic sandwich panels to blast loads. *Journal of Structural Engineering*, 145(12), 04019145.

[17] Derseh, S.A., Mohammed, T.A. and Urgessa, G. (2023). Numerical study on hybrid metallic sandwich structures subjected to air burst. *SN Applied Sciences*, 5(9), 248.