

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

Komeil Momeni^{1*}, Azad Ghavipankeh²

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, National University of Skills, 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

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 فنی 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 به صورت چینش تناوبی (چیدمان یکی در میان) با بتن سبک پر شده است، به طور 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 به طور 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 به صورت 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 به عنوان 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	doi:	
۱۴۰۴/۰۹/۱۷	۱۴۰۴/۰۹/۲۸	۱۴۰۴/۱۰/۰۴	۱۴۰۴/۱۰/۰۴	۱۴۰۵/۰۵/۳۱		
*نویسنده مسئول:					کمیل مومنی	
پست الکترونیکی:					Kmmomeni@tvu.ac.ir	

۱- مقدمه

برای حالت های بارگذاری دینامیکی شدید مانند تصادفات، انفجارها یا ضربه ها، طراحی سازه های مهندسی حفاظتی به عنوان جذب کننده انرژی اهمیت زیادی دارد. در بارگذاری انفجاری، سازه ها معمولاً دچار تغییر شکل های پلاستیک گسترده یا شکست می شوند و مقدار قابل توجهی انرژی جذب می کنند. انواع مختلفی از جذب کننده های انرژی برای کاربردهای مختلف با نرخ کرنش بالا طراحی شده اند که یکی از آن ها سازه های ساندویچی است [۱]، سازه های ساندویچی متشکل از ورق های نازک فلزی و هسته ای سبک با قابلیت جذب انرژی برای مقاومت در برابر انفجار می باشند. به دلیل نسبت بالای سختی به وزن، این سازه ها برای کاربردهای سبک وزن همچون هواپیماها در طول دهه ها به کار رفته اند و به عنوان جایگزینی مناسب برای سازه های یکپارچه مورد توجه قرار گرفته اند [۱-۴]، مطالعات نشان داده اند که سازه های ساندویچی با ساختار لانه زنبوری نسبت به سازه های توپر با جرم برابر، عملکرد بهتری از نظر تغییر شکل پلاستیک، مقاومت و ظرفیت جذب انرژی دارند [۵-۱۰]، از سوی دیگر، سازه های فلزی ساندویچی با هسته های مختلف سلولی از جمله لانه زنبوری، شبکه های توری، ورقه های تا شده و ساختارهای هیبرید، پتانسیل قابل توجهی در کاهش آسیب ناشی از بارهای انفجاری از طریق تغییر شکل پلاستیک نشان داده اند. با این حال، ارزیابی دقیق قابلیت های 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 نرم افزار آباکوس^۱، رفتار سازه های پانل های ساندویچی پیش ساخته بتنی با هسته بتن سبک را تحت بار خمشی بررسی کردند. این پانل ها شامل یک لایه بالایی از بتن مسلح پرمقاومت، هسته ای از بتن سبک و یک لایه پایینی فولادی یا بتنی بودند. نتایج نشان داد که مقاومت نهایی و عملکرد مرکب پانل ها به شدت به ویژگی های اتصالات برشی بستگی دارد و منحنی بار-تغییر مکان رفتار منطقی ارائه می دهد. [۱۲]. از سوی دیگر سبزواری و شهابیان مقدم (۲۰۱۸) به بررسی رفتار پانل های ساندویچی با هسته موجدار در برابر بارهای انفجاری پرداختند. در این مطالعه، چهار نوع شکل هسته موجدار (مستطیلی، دوزنقه ای، مثلثی و بیضی) برای پانل های آلومینیومی و فولادی تحلیل شد. نتایج نشان داد بیشترین تغییر مکان به پانل با هسته مثلثی و کمترین تغییر مکان به پانل با هسته دوزنقه ای تعلق دارد. همچنین پانل های تمام آلومینیوم بیشترین انرژی را مستهلک کرده اند و ترکیب ورق های فولادی با هسته آلومینیومی مثلثی عملکرد بهینه ای در استهلاک انرژی نشان داده است. این مطالعه نشان دهنده اهمیت شکل هسته و جنس مصالح در بهبود رفتار پانل های ساندویچی تحت بار انفجاری است [۱۳]. مطالعات بین المللی نیز به طور گسترده به بررسی عملکرد سازه های ساندویچی فلزی تحت بارهای انفجاری پرداخته اند. به عنوان نمونه، پاتل و کومار^۲ نشان دادند که استفاده از هسته های هشت ضلعی در مقایسه با هسته های مربعی، موجب بهبود عملکرد سازه در کاهش تغییر شکل های صفحات جلو و عقب می شود [۱۴]. همچنین تئوبالد^۳ و همکاران با استفاده از شبیه سازی عددی در نرم افزار LS-DYNA دریافتند که افزودن سخت کننده به هسته فوم آلومینیومی در سازه های ساندویچی می تواند مقاومت آن ها را در برابر انفجار به طور چشم گیری افزایش دهد [۴]. برنشتاین^۴ و همکاران نیز با مقایسه عملکرد چهار نوع ماده جاذب انرژی مختلف از نظر تغییر شکل دائمی و انتقال تکانه، آلومینیوم فوم را مؤثرترین گزینه معرفی کردند. همچنین سایر مطالعات نیز به بررسی ترکیب های هیبریدی از ساختارهای سلولی فلزی از جمله لانه زنبوری، ورق های موجدار و شبکه های در هم تنیده پرداخته اند. با این حال، بررسی های دقیق عددی با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی هندسی و رفتار پیچیده مصالح و با استفاده از روش های پیشرفته ای مانند ABAQUS/Explicit، هنوز به طور کامل توسعه نیافته است [۱، ۲، ۱۶].

¹ ABAQUS² Patel and Komar³ Theobald⁴ Bornstein

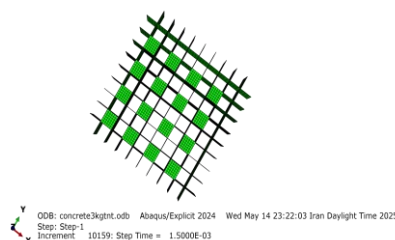
۳- نوآوری پژوهش

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^۵ اعمال شده است. این نوآوری امکان ارزیابی دقیق‌تر پاسخ سازه و بررسی تغییرشکل‌ها و شکست موضعی در اثر بارهای شدید انفجاری را فراهم می‌سازد.

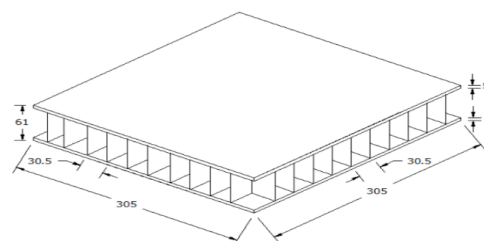
در این پژوهش، بتن سبک به‌عنوان ماده‌ی پرکننده‌ی هسته‌ی سازه ساندویچی انتخاب شده است. این ماده با چگالی حدود ۱۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب موجب کاهش قابل‌توجه وزن کلی سازه می‌شود و در کاربردهایی مانند حمل‌ونقل و قطعات پیش‌ساخته اهمیت ویژه‌ای دارد. و ضمن دارا بودن مقاومت فشاری مناسب، توان تحمل بارهای استاتیکی 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.



شکل ۲: نحوه قرار گیری مکعب های بتنی در شبکه داخلی به صورت چینش تناوبی (چیدمان یکی در میان) در مدل نوآوری



شکل ۱: هندسه مدل سه بعدی سازه ساندویچی در تحقیق [۱۷]

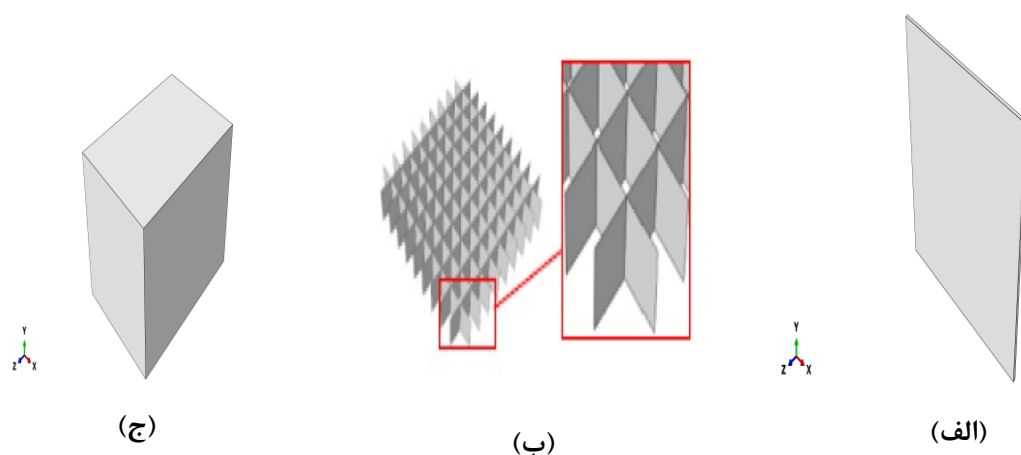
۴-۱- تعریف اجزا

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^۶ مدل شده‌اند و نقش توزیع بار و محافظت از هسته را دارند. هسته‌ی فلزی مربعی با ضخامت ۰/۶۷ میلی‌متر به‌صورت پوسته‌ای مدل شد تا ضمن کاهش حجم محاسبات، دقت در رفتار خمشی و برشی افزایش یابد.

^۵ Incident Wave

^۶ Solid

درون شبکه، مکعب‌های بتن سبک با ابعاد $51 \times 35 \times 35$ میلی‌متر به صورت حجم جامد مدل گردیدند که فضای داخلی شبکه را به طور کامل پر می‌کنند.



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

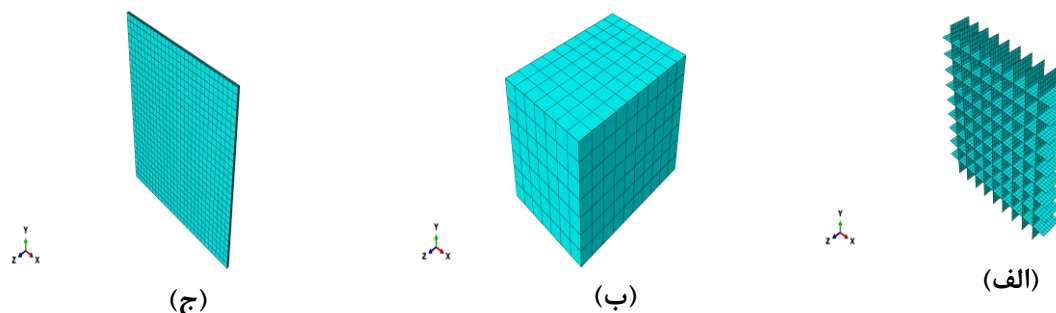
یکی از نوآوری‌های اصلی این پژوهش، استفاده از بتن سبک در بخش‌هایی از شبکه مربعی به صورت چینش تناوبی (چیدمان یکی در میان) می‌باشد. این ایده با هدف کاهش جرم سازه، بهینه‌سازی جذب انرژی و کنترل موضعی آسیب در برابر بارهای دینامیکی از جمله بارگذاری ناشی از انفجار، توسط نویسندگان این پژوهش ارائه شده است. برای 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 به صورت 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 گزارش شده 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. به منظور اطمینان از پایداری عددی و سازگاری پاسخ دینامیکی مدل، پارامترهای آسیب کششی و فشاری از طریق کالیبراسیون عددی تنظیم شده‌اند؛ به گونه‌ای 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 تعریف شده در مدل عددی را تأیید می کند.

جدول ۱: مقادیر ورودی مل مواد سازنده و آسیب Johnson-Cook برای سازه ساندویچی تحقیق [۱۷].		
پارامتر	مقدار	
E	مدول الاستیک	۱۶۱
ν	نسبت پواسون	۰/۳۵
ρ	چگالی	۷۸۵۰
$\dot{\epsilon}_0$	ضریب نرخ کرنش	۰/۰۰۱
Tr	دمای انتقال	۲۰
Tm	دمای ذوب	۱۴۲۷
A	مقاومت تسلیم اولیه	۴۰۰
B	ضریب سخت شوندگی	۱۴۰۰
C	ضریب حساسیت به نرخ کرنش	۰/۰۴۵
N	توان سخت شوندگی	۰/۴
M	ضریب حساسیت به دما	۱/۲
D ₁	کرنش شکست اولیه	-۰/۷۷
D ₂	ضریب نمایی	۱/۴۵
D ₃	ضریب سه محوری بودن تنش	-۰/۴۷
D ₄	ضریب نرخ کرنش برای شکست	۰
D ₅	ضریب دما برای شکست	۱/۶



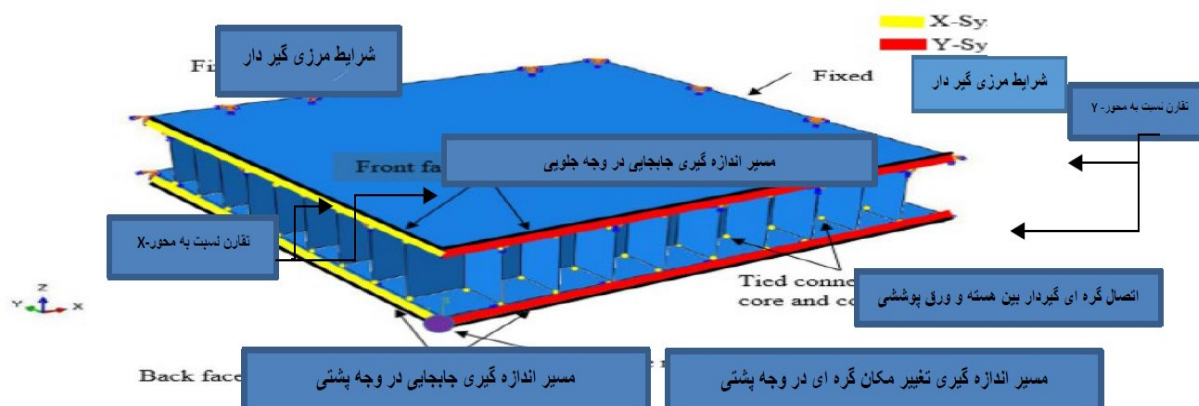
شکل ۴: مش بندی اجزای مختلف سازه ساندویچی

۴-۱-۳- مش بندی

مش بندی به صورت دقیق و با دو اندازه متفاوت برای بخش های مختلف مدل انجام شده است. سائز مش مناسب با انجام چندین تحلیل و سعی و خطا تعیین گردید تا نتایج نمودارها تطابق قابل قبولی با نتایج تحقیق [۱۷] داشته باشند. مش بندی شبکه داخلی فلزی مطابق شکل (۴-الف) و مکعب های بتن سبک مطابق شکل (۴-ب) با اندازه ۱/۵ میلی متر، مش بندی صفحات پوششی بالا و پایین مطابق شکل (۴-ج) با اندازه ۱۱ میلی متر، علاوه بر این، ضخامت دیواره های 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 اندازه گیری جابجایی و کرنش پلاستیک در مدل، بر اساس تحقیق [۱۷]، تعریف شده است. در شکل ۵ نحوه اعمال شرایط مرزی و نقاط ثبت داده ها نمایش داده شده است. برای کاهش حجم محاسبات، از تقارن ساختاری استفاده گردید؛ به گونه ای 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 شبیه سازی دقیق تر رفتار واقعی سازه در برابر انفجار گوشه ای و انتقال مؤثر بار به اجزای مجاور شد.



شکل ۵: شرایط مرزی سازه ساندویچی، مسیر اندازه گیری جابجایی صفحات و کرنش پلاستیک وارد شده در تحقیق [۱۷]

۴-۳- اعمال بار انفجار

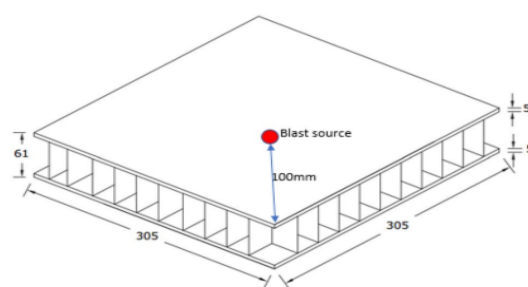
اعمال بار انفجاری در این پژوهش مطابق با تنظیمات ارائه شده در تحقیق مرجع [۱۷] انجام شده است تا امکان مقایسه و اعتبارسنجی نتایج فراهم گردد. همان گونه که در شکل (۶) نشان داده شده است، انفجار از نوع هوایی نزدیک در نظر گرفته شده و موقعیت، فاصله منبع انفجار تا سطح پانل، جرم ماده منفجره و مدت زمان اثر موج فشار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

بار انفجاری با استفاده از قابلیت Incident Wave در نرم افزار ABAQUS/Explicit نسخه ۲۰۲۴ مدل سازی شده است. در این روش، موج انفجار به صورت یک موج فشار برخوردی منتشرشونده (Propagating Incident Pressure Wave) تعریف می شود که بدون نیاز به مدل سازی صریح محیط هوا، امکان شبیه سازی اثر انفجار هوایی نزدیک را فراهم می سازد. سطح اعمال موج در فاصله ۱۰۰ میلی متری از گوشه پانل تعریف شده و بارگذاری برای هر یک از جرم های ۱، ۲ و ۳ کیلوگرم TNT به صورت مستقل اعمال گردیده است. شکل زمانی موج فشار و مقدار فشار مؤثر به صورت داخلی توسط نرم افزار و بر اساس داده های ورودی انفجار محاسبه می شود. این رویکرد ضمن کاهش هزینه محاسباتی، از پایداری عددی مناسبی برخوردار بوده و امکان استخراج پاسخ های دینامیکی سازه، شامل جابجایی ها، کرنش های پلاستیک و مؤلفه های مختلف انرژی را با دقت قابل قبول فراهم می کند. لازم به ذکر است که در این پژوهش از مدل تجربی CONWEP یا داده های فشار-زمان آزمایشگاهی استفاده نشده است.

بلکه موج انفجار به صورت یک موج برخوردی ورودی منتشرشونده (Propagating Incident Pressure Wave) در فضای آزاد و در فاصله ۱۰۰ میلی متری از سازه اعمال شده است. فشار اعمالی به صورت داخلی توسط الگوریتم صریح نرم افزار ABAQUS و بر اساس پارامترهای هندسی انفجار (جرم TNT و فاصله) محاسبه می شود و کاربر مستقیماً تاریخچه فشار-زمان را تعریف نمی کند.

جدول ۲: پارامترهای انفجار هوایی در تحقیق [۱۷]

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



شکل ۶: محل و فاصله اثر TNT بر سازه ساندویچی در تحقیق [۱۷]

۴-۴- اعتبارسنجی مدل عددی

به منظور 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 می دهد که اختلاف جابجایی بیشینه بین مدل حاضر و نتایج مرجع در تمامی حالات کمتر از حدود ۵ تا ۷ درصد می باشد. این میزان اختلاف با توجه به تفاوت های اجتناب ناپذیر در نوع المان ها، اندازه مش، الگوریتم تماس و تنظیمات عددی تحلیل Explicit قابل قبول تلقی می شود. علاوه بر این، بررسی تاریخچه انرژی مصنوعی در تمامی تحلیل ها 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.

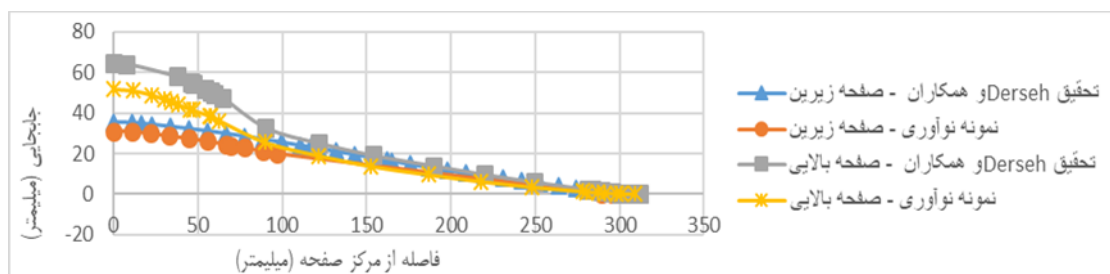
۵-۴- تنظیمات تحلیل^۸

تحلیل عددی به صورت دینامیکی و غیرخطی و با استفاده از استپ Explicit در نرم افزار ABAQUS 2024 انجام گرفت. مدت زمان کل تحلیل ۰/۰۱۵ 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 جذب شده (ویسکوز، پلاستیک و کل) و جابجایی صفحه پشتی مطابق پژوهش [۱۷]، استخراج شدند. به دلیل عدم ارائه جزئیات مش بندی 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.

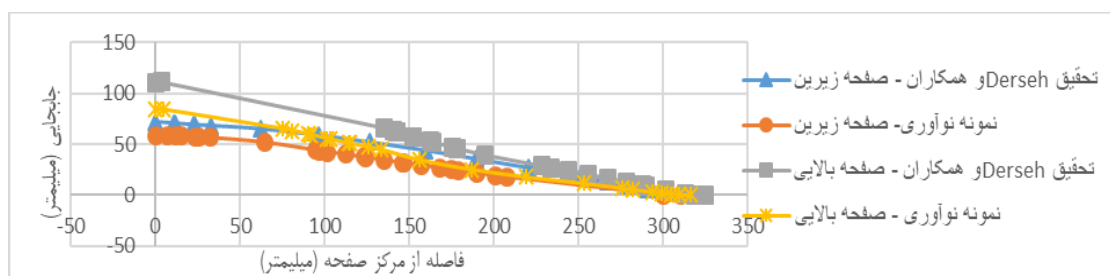
۵-۵- تحلیل نتایج نمودارها

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 پر شده 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.

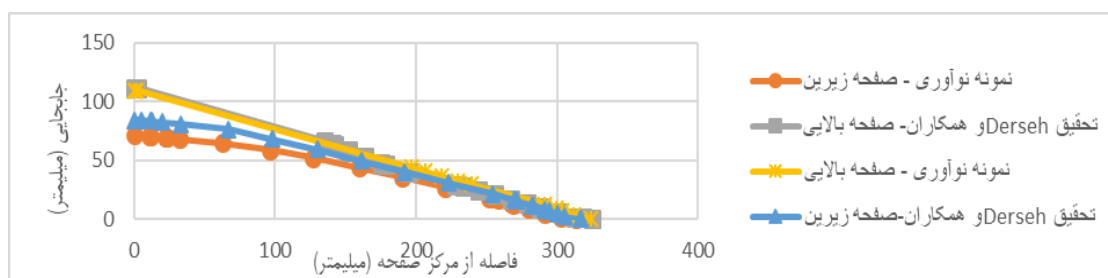


شکل ۷: تغییرات جابجایی صفحه بالا و پایین نسبت به فاصله از مرکز صفحه تحت بار ۱ کیلوگرم TNT



شکل ۸: تغییرات جابجایی صفحه بالا و پایین نسبت به فاصله از مرکز صفحه تحت بار ۲ کیلوگرم TNT

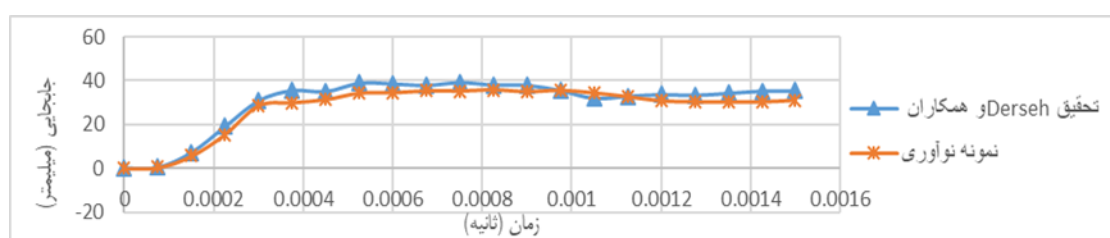
⁸ Step Definition



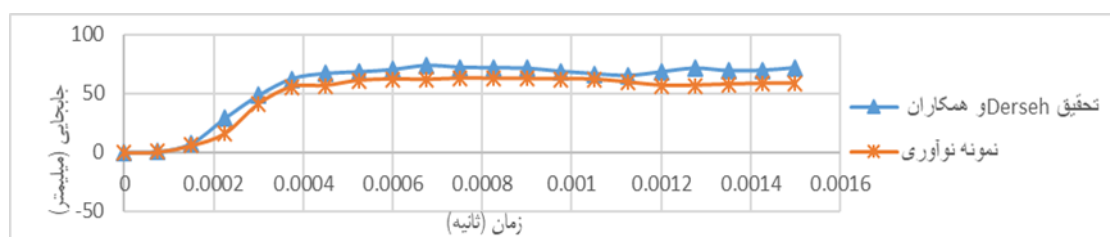
شکل ۹: تغییرات جابجایی صفحه بالا و پایین نسبت به فاصله از مرکز صفحه تحت بار ۳ کیلوگرم TNT

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

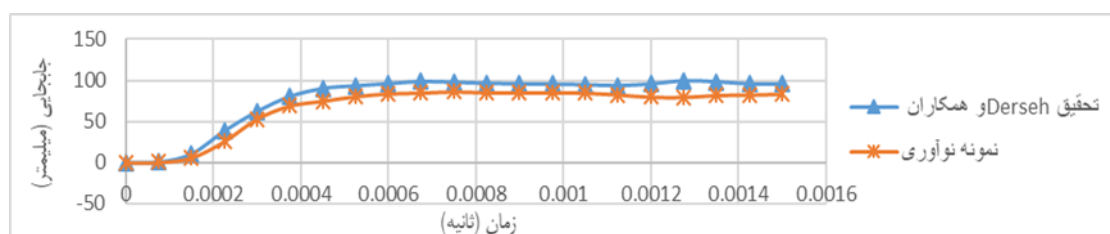
مطابق شکل‌های ۱۰ تا ۱۲، منحنی‌های جابجایی-زمان صفحات تحت سه سطح بار TNT بررسی شد. در بار ۱ کیلوگرم TNT، سازه در تحقیق [۱۷]، به سرعت به حداکثر جابجایی رسید و سپس با نوسانات میرا مواجه شد. مدل نوآورانه با هسته تقویت‌شده با بتن سبک، جابجایی اولیه ملایم‌تر، حداکثر جابجایی کمتر و دامنه نوسانات کاهش یافته را نشان داد. در ۲ و ۳ کیلوگرم TNT، 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



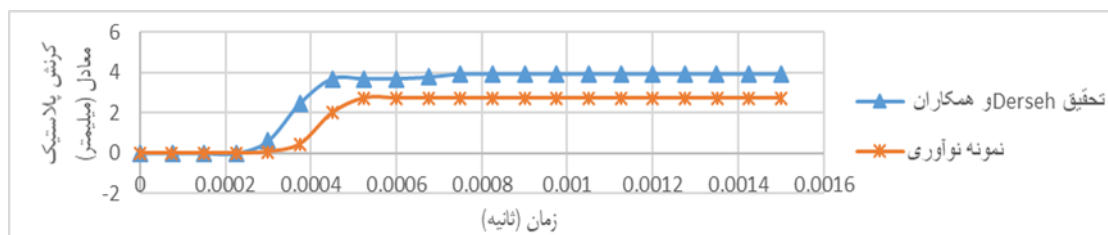
شکل ۱۱: منحنی‌های تاریخچه جابجایی-زمان صفحات تحت اثر بار انفجاری ۲ کیلوگرم TNT



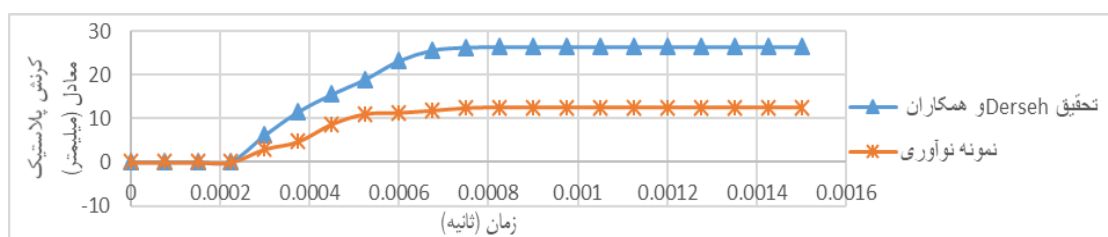
شکل ۱۲: منحنی‌های تاریخچه جابجایی-زمان صفحات تحت اثر بار انفجاری ۳ کیلوگرم TNT

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

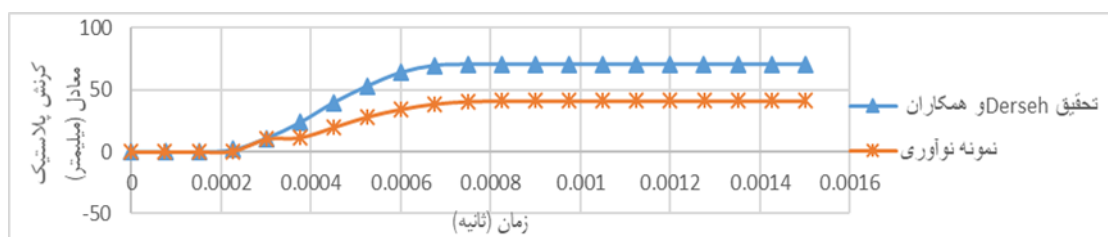
شکل های ۱۳ تا ۱۵ تاریخیچه کرنش پلاستیک معادل-زمان صفحات سازه های ساندویچی لانه زنبوری تحت بار انفجاری ۱، ۲ و ۳ کیلوگرم TNT را در تحقیق [۱۷]، و مدل نوآورانه با ترکیب بتن سبک نشان می دهند. در بار ۱ کیلوگرم TNT، در مدل [۱۷]، افزایش سریع کرنش پلاستیک و تغییر شکل های دائمی قابل توجهی را نشان داد، در حالی که مدل نوآورانه افزایش ملایم تر و مقدار نهایی کمتر کرنش را ثبت کرد (شکل ۱۳). در ۲ و ۳ کیلوگرم TNT، مدل نوآورانه نیز افزایش کرنش پلاستیک ملایم تر، مقدار نهایی کمتر و رسیدن سریع تر به حالت پایدار را نشان داد (شکل های ۱۴ و ۱۵). نتایج نشان می دهد که حضور بتن سبک در هسته، موجب کاهش شیب افزایش کرنش، کاهش مقدار نهایی و بهبود توزیع تنش ها شده و مقاومت سازه در برابر انفجارهای کم تا شدید را بهبود می دهد.



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



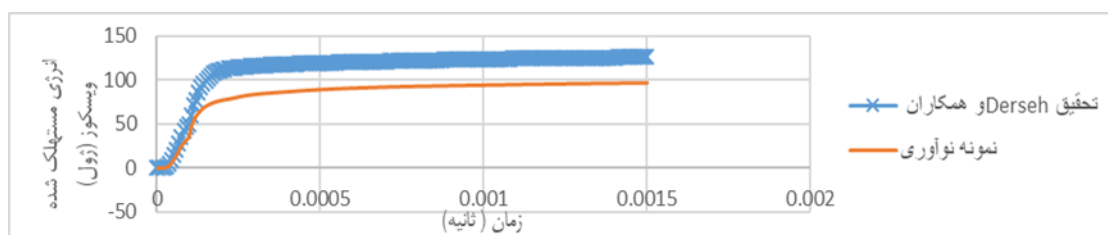
شکل ۱۴: منحنی های تاریخیچه کرنش پلاستیک معادل-زمان صفحات تحت اثر بار انفجاری ۲ کیلوگرم TNT



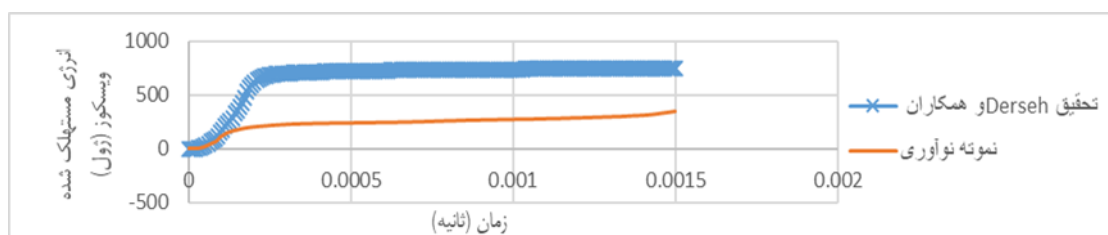
شکل ۱۵: منحنی های تاریخیچه کرنش پلاستیک معادل-زمان صفحات تحت اثر بار انفجاری ۳ کیلوگرم TNT

۵-۴- بررسی تاریخیچه انرژی اتلاف ویسکوز-زمان صفحات تحت بارگذاری انفجاری (۱، ۲ و ۳ کیلوگرم TNT)

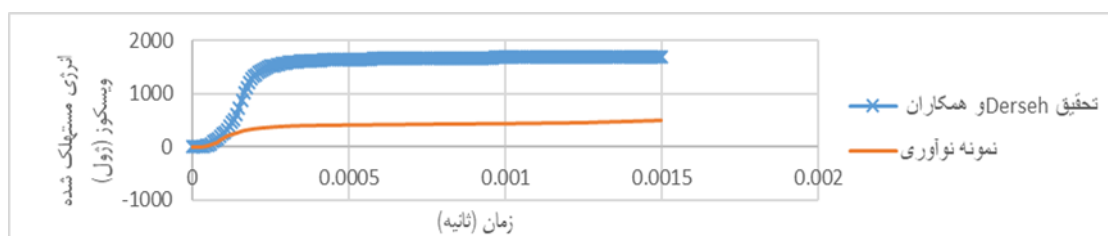
مطابق شکل های ۱۶ تا ۱۸، منحنی های انرژی اتلاف ویسکوز-زمان صفحات تحت سه سطح بار TNT بررسی شد. در بار ۱ کیلوگرم TNT، در مدل [۱۷]، افزایش سریع انرژی اتلاف ویسکوز و مقدار نسبتاً بالایی را نشان داد، در حالی که مدل نوآورانه افزایش ملایم تر و مقدار نهایی کمتر انرژی را ثبت کرد (شکل ۱۶). در ۲ و ۳ کیلوگرم TNT،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



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



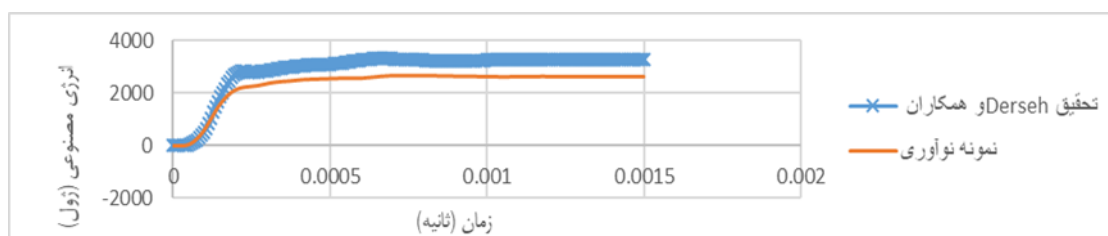
شکل ۱۷: منحنی های تاریخچه انرژی اتلاف ویسکوز-زمان صفحات تحت اثر بار انفجاری ۲ کیلوگرم TNT



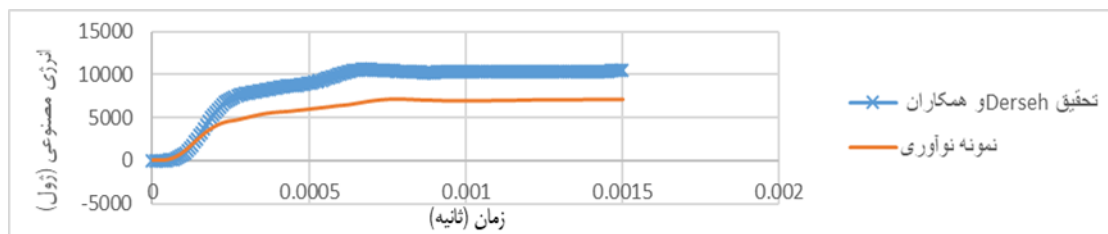
شکل ۱۸: منحنی های تاریخچه انرژی اتلاف ویسکوز-زمان صفحات تحت اثر بار انفجاری ۳ کیلوگرم TNT

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

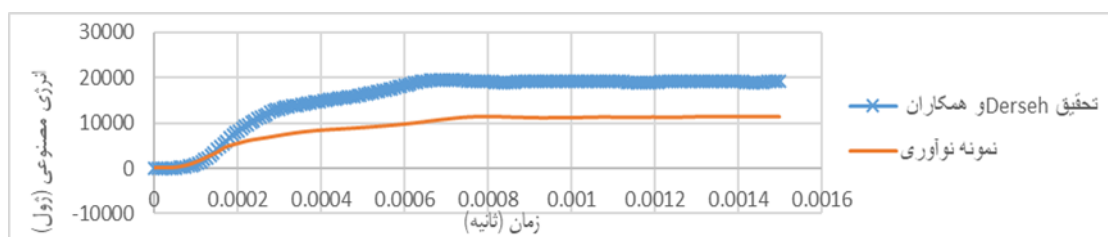
مطابق شکل های ۱۹ تا ۲۱، منحنی های انرژی مصنوعی-زمان صفحات تحت سه سطح بار TNT بررسی شد. در بار ۱ کیلوگرم TNT، در مدل [۱۷]، افزایش سریع انرژی مصنوعی و مقدار نسبتاً بالایی را نشان داد، در حالی که مدل نوآورانه افزایش ملایم تر و مقدار نهایی کمتر انرژی را ثبت کرد (شکل ۱۹). در ۲ و ۳ کیلوگرم TNT، مدل نوآورانه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



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



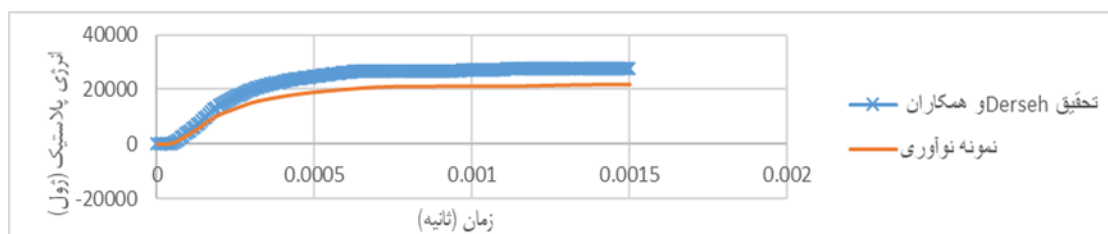
شکل ۲۰: منحنی های تاریخچه انرژی مصنوعی-زمان صفحات تحت بار انفجاری ۲ کیلوگرم TNT



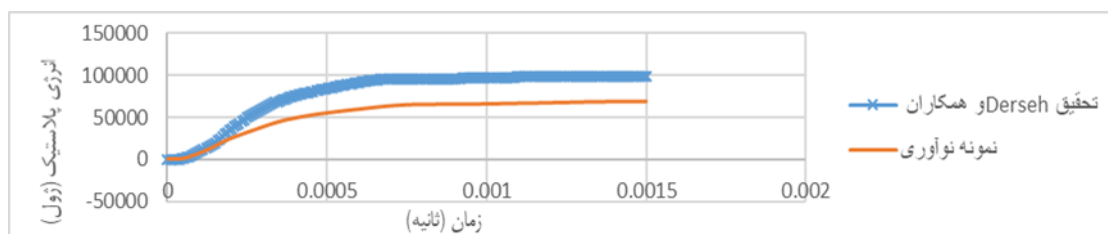
شکل ۲۱: منحنی های تاریخچه انرژی مصنوعی-زمان صفحات تحت بار انفجاری ۳ کیلوگرم TNT

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

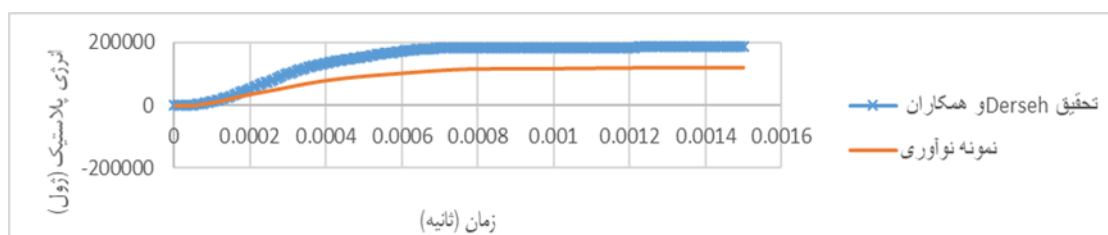
مطابق شکل های ۲۲ تا ۲۴، منحنی های انرژی پلاستیک-زمان صفحات تحت سه سطح بار TNT بررسی شد. در بار ۱ کیلوگرم TNT، در مدل [۱۷]، افزایش سریع انرژی پلاستیک و مقدار نسبتاً بالایی را نشان داد، در حالی که مدل نوآورانه افزایش ملایم تر و مقدار نهایی کمتر انرژی را ثبت کرد (شکل ۲۲). در ۲ و ۳ کیلوگرم TNT، مدل نوآورانه نیز افزایش ملایم تر، مقدار نهایی کمتر و رسیدن سریع تر به حالت پایدار را نشان داد (شکل های ۲۳ و ۲۴). نتایج نشان می دهد که حضور بتن سبک در هسته، موجب کاهش شیب افزایش انرژی پلاستیک، کاهش مقدار نهایی و کاهش آسیب های دائمی شده و عملکرد کلی سازه در جذب انرژی انفجار و کاهش تخریب های ماندگار را بهبود می بخشد.



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



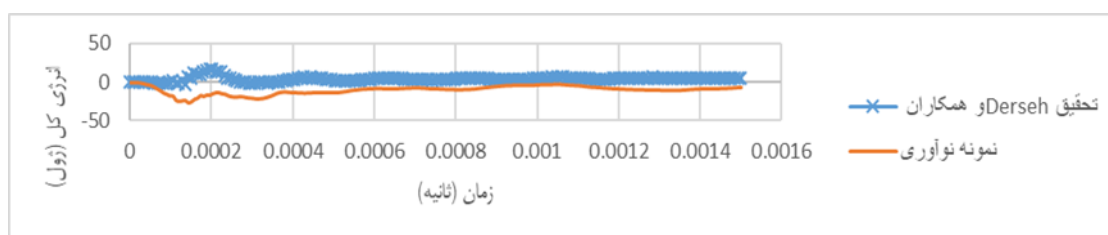
شکل ۲۳: منحنی های تاریخچه انرژی پلاستیک-زمان صفحات تحت بار انفجاری ۲ کیلوگرم TNT



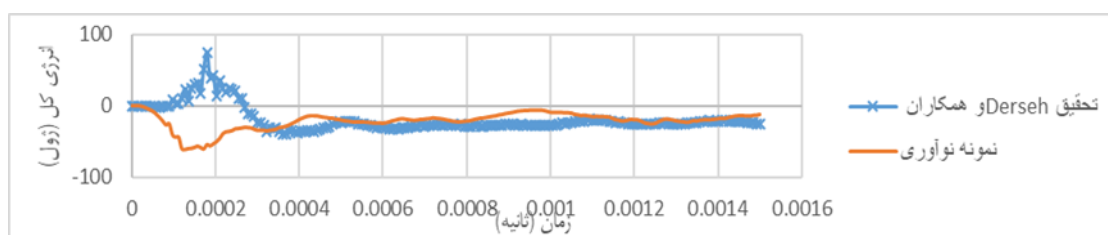
شکل ۲۴: منحنی های تاریخچه انرژی پلاستیک-زمان صفحات تحت بار انفجاری ۳ کیلوگرم TNT

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

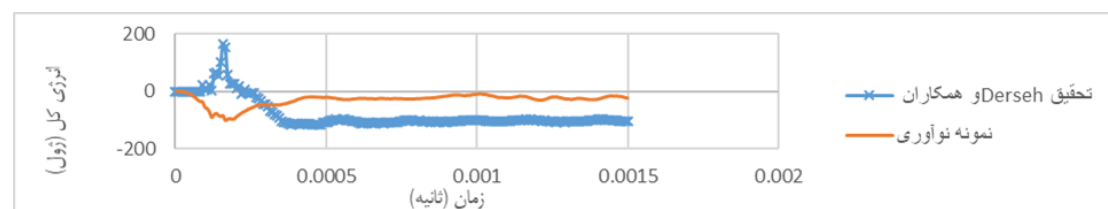
مطابق شکل های ۲۵ تا ۲۷، منحنی های انرژی کل صفحات تحت سه سطح بار TNT بررسی شد. در بار ۱ کیلوگرم TNT، در مدل [۱۷]، بیشینه انرژی اولیه حدود ۱۵ ژول و انرژی نهایی مثبت را نشان داد، در حالی که مدل نوآورانه کاهش شدیدتری در انرژی کل و مقدار نهایی منفی ۸ ژول داشت (شکل ۲۵). در بار ۲ کیلوگرم TNT، مدل نوآورانه کاهش شدیدتر انرژی کل و رسیدن به مقدار نهایی منفی نزدیک را نشان داد (شکل ۲۶). در بار ۳ کیلوگرم TNT، 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 پایین تر و انرژی نهایی حدود منفی ۵۰ ژول و تغییرات ملایم تر انرژی را ثبت کرد (شکل ۲۷). نتایج نشان می دهد که حضور بتن سبک در هسته موجب کاهش تمرکز انرژی، افزایش جذب داخلی و کنترل بهتر آسیب ها در سازه تحت بار انفجاری می شود.



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



شکل ۲۶: منحنی های انرژی کل صفحات تحت اثر بار انفجاری ۲ کیلوگرم TNT



شکل ۲۷: منحنی های انرژی کل صفحات تحت اثر بار انفجاری ۳ کیلوگرم TNT

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

با توجه به نتایج ارائه شده در بخش های ۵-۴ تا ۵-۷، کاهش انرژی کل ثبت شده در مدل نوآورانه نباید به عنوان کاهش ظرفیت جذب انرژی سازه تفسیر شود، بلکه بیانگر تغییر مکانیزم جذب و توزیع انرژی در اجزای سازه است. در مدل مرجع [۱۷]، بخش قابل توجهی از انرژی ورودی ناشی از انفجار به صورت تغییر شکل های شدید، کرنش پلاستیک بالا و نوسانات طولانی مدت در صفحات فوقانی و تحتانی ذخیره یا مستهلک می شود که منجر به تمرکز انرژی در این اجزا می گردد. در مقابل، در مدل نوآورانه، حضور بتن سبک در هسته شبکه ای 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 می شود. این فرآیند موجب کاهش انرژی پلاستیک و ویسکوز در صفحات و در عین حال توزیع یکنواخت تر انرژی در کل سازه می گردد. کاهش دامنه نوسانات پاسخ دینامیکی، رسیدن سریع تر 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 نشان دهنده کنترل مؤثرتر پاسخ دینامیکی، کاهش تمرکز انرژی در صفحات و جلوگیری از توسعه آسیب های ماندگار است، نه کاهش توانایی سازه در مقابله با بار انفجاری. این موضوع به ویژه در بارهای انفجاری متوسط و شدید (۲ و ۳ کیلوگرم TNT) نقش تعیین کننده ای در بهبود عملکرد سازه ایفا می کند. منفی شدن مقطعی انرژی کل ناشی از نحوه تعریف آن در تحلیل Explicit به صورت اختلاف بین انرژی داخلی ذخیره شده و کار خارجی اعمال شده است. پس از عبور پیک فشار انفجار، بازتاب موج و آزادسازی انرژی ذخیره شده موجب کاهش لحظه ای انرژی داخلی سیستم می شود که به صورت مقادیر منفی انرژی کل ظاهر می گردد. بررسی انرژی مصنوعی نشان می دهد که سهم آن همواره کمتر از حد مجاز بوده و بنابراین این رفتار ناشی از پدیده های فیزیکی سیستم و نه ناپایداری عددی است.

۶- نتیجه گیری

(۱) در این پژوهش، به بررسی عملکرد یک سازه ساندویچی فلزی با هسته نوآورانه متشکل از شبکه مربعی فلزی پر شده به صورت 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 مقایسه ی رفتار دینامیکی تحقیق^۹ و همکاران (۲۰۲۳)، (سازه با هسته فلزی توخالی) و مدل نوآورانه (سازه با هسته فلزی پر شده با بتن سبک) بود.

(۳) نتایج حاصل از تحلیل ها نشان داد که استفاده از بتن سبک درون شبکه فلزی نه تنها موجب کاهش چشمگیر جابجایی صفحات فوقانی و تحتانی سازه تحت بار انفجاری گردید، بلکه به طور معناداری کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) را نیز کاهش داد. این کاهش کرنش ها به دلیل ایجاد سختی موضعی بیشتر و توزیع تنش یکنواخت تر 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 سریع تر به تعادل می رسد، که این موضوع حاکی از بهبود رفتار دینامیکی و افزایش میرایی سازه است. از طرف دیگر، بررسی انرژی های مستهلک شده (ویسکوز، پلاستیک، مصنوعی و کل) در دو مدل نشان داد که انرژی کل جذب شده در مدل نوآورانه کمتر از مدل تحقیق درسه و همکاران (۲۰۲۳) بوده و در عین حال به صورت مؤثرتری در کل سازه توزیع شده است. این موضوع نشانگر ارتقای بازدهی انرژی گیر سازه پیشنهادی و کاهش تمرکز انرژی در نواحی خاص است.

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

(۵) این سیستم می تواند علاوه بر افزایش ایمنی، به کاهش وزن سازه، کاهش هزینه های ساخت، و تسهیل اجرا نیز کمک کند و به عنوان یک گزینه کارآمد در طراحی سازه های مقاوم در برابر انفجار، مخصوصاً در تأسیسات نظامی، صنعتی و سازه های 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 سازه‌های 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 (مثلی، 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^{۱۰}، بارگذاری چرخه‌ای^{۱۱} و خستگی^{۱۲} 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 Impact¹¹ Cyclic Loading¹² Fatigue

سیاسگزاری

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] Dersseh, 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.