ISSN: 2476-6909; Modares. Mech. Eng. *2026;26(08):621-633.*

Modares Mechanical Engineering

DOI: 10.48311/mme.2026.118880.82955
journal homepage: mme.modares.ac.ir

Experimental Investigation of Projectile Nose Shape Effects on the Low-Velocity Impact Response of Sandwich Panels with 3D-Printed Lattice and Corrugated Cores

Ali Akbar Mobasseri, mahmood Zabihpoor*, Majid Jamal-Omidi

Department of Aerospace Engineering, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Article History
Received: January 20, 2026
Revised: April 15, 2026
Accepted: May 10, 2026
ePublished: June 17, 2026

ABSTRACT

This study experimentally investigates the effect of projectile nose shape on the low-velocity impact response of sandwich panels with 3D-printed lattice and corrugated cores. The face sheets were manufactured from glass-fiber-reinforced polymer composites, and the cores were fabricated from polylactic acid (PLA) using the fused deposition modeling (FDM) process. Drop-weight impact tests were conducted at different energy levels using blunt, hemispherical, and conical projectiles. Force–time and displacement–time histories were recorded, the absorbed energy was obtained from the corresponding force–displacement curves, and post-impact inspections were performed to identify damage mechanisms. The results show that projectile nose geometry significantly influences contact conditions, stress concentration, and failure modes: blunt projectiles generally produce higher peak forces, whereas conical projectiles promote localized penetration and more severe localized damage. Regarding core architecture, corrugated cores exhibited higher initial stiffness under a considerable portion of the tested conditions, while lattice cores provided superior specific energy absorption at certain impact energy levels. Overall, the findings indicate that the relative advantages of each core type depend on impact energy and nose geometry, emphasizing that core selection should be guided by the intended performance criteria (initial stiffness versus energy absorption) and loading conditions.

Keywords: Sandwich panel, lattice core, corrugated core, low-velocity impact, projectile nose shape, 3D printing

How to cite this article
Mobasseri A.A, Zabihpoor M, Jamal-Omidi M, Experimental Investigation of Projectile Nose Shape Effects on the Low-Velocity Impact Response of Sandwich Panels with 3D-Printed Lattice and Corrugated Cores. Modares Mechanical Engineering; *2026;26(08):621-633.*

*Corresponding author's email: zabihpoor@yahoo.com
*Corresponding ORCID ID: 0000-0002-2648-8070

Copyright© 2026, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

شاپا: ۶۹۰۹-۲۴۷۶؛ مهندسی مکانیک مدرس. ۶۳۳-۶۲۱: ۱۴۰۵;۲۶(۰۸)

مهندسی مکانیک مدرس

DOI: 10.48311/mme.2026.118880.82955

صفحه اصلی مجله: mme.modares.ac.ir

بررسی تجربی اثر شکل نوک پرتابه بر پاسخ ضربه کم‌سرعت پانل‌های ساندویچی با هسته‌های مشبک و موج‌دار چاپ سه‌بعدی

علی‌اکبر مبصری، محمود ذبیح‌پور*، مجید جمال امیدی

دانشکده هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۳۰

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۲۶

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۰

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۳/۲۷

چکیده

در این پژوهش، تأثیر شکل نوک پرتابه بر پاسخ ضربه کم‌سرعت پنل‌های ساندویچی دارای هسته‌های موج‌دار و مشبک چاپ‌شده به روش **FDM** به‌صورت تجربی بررسی شده است. رویه‌ها از کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف شیشه و هسته‌ها از پلی‌لاکتیک‌اسید **(PLA)** ساخته شدند. آزمون‌های ضربه با دستگاه سقوط وزنه در سطوح مختلف انرژی و با سه نوع پرتابه نوک تخت، نیم‌کروی و مخروطی انجام گرفت. در هر آزمون، تاریخچه‌های نیرو–زمان و جابه‌جایی–زمان ثبت و انرژی جذب‌شده از منحنی‌های نیرو–جابه‌جایی محاسبه شد و الگوهای آسیب نیز از طریق مشاهده‌های پس از آزمون ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که شکل نوک پرتابه نقش تعیین‌کننده‌ای در شرایط تماس، تمرکز تنش و مکانیزم‌های خرابی دارد؛ به‌گونه‌ای که پرتابه نوک تخت عموماً نیروی اوج بیشتری ایجاد می‌کند، در حالی که پرتابه مخروطی به‌علت تمرکز شدید تنش، تمایل به نفوذ موضعی و آسیب عمیق‌تری دارد. از نظر معماری هسته، هسته‌های موج‌دار در بخش قابل توجهی از شرایط آزمایش سفتی اولیه بالاتری از خود نشان دادند و هسته‌های مشبک در برخی سطوح انرژی، ظرفیت جذب انرژی ویژه بیشتری ارائه کردند. به‌طور کلی، نتایج بیانگر آن است که برتری هر یک از هسته‌ها وابسته به انرژی ضربه و شکل پرتابه است و انتخاب معماری مناسب باید بر اساس نیاز عملکردی سازه (سفتی اولیه یا جذب انرژی) و شرایط بارگذاری صورت گیرد.

کلیدواژه‌ها: سازه‌های ساندویچی، هسته مشبک، هسته موج‌دار، ضربه کم‌سرعت، شکل پرتابه، چاپ سه‌بعدی

نحوه ارجاع به این مقاله

مبصری علی‌اکبر، ذبیح‌پور محمود، جمال امیدی مجید، بررسی تجربی اثر شکل نوک پرتابه بر پاسخ ضربه کم‌سرعت پانل‌های ساندویچی با هسته‌های مشبک و موج‌دار چاپ سه‌بعدی، مهندسی مکانیک مدرس. ۶۳۳-۶۲۱: ۱۴۰۵;۲۶(۰۸)

*پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: zabihpoor@yahoo.com

*شناسه ارکید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: 0000-0002-2648-8070

Copyright© 2026, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

۱- مقدمه

سازه‌های ساندویچی طی دهه‌های اخیر به عنوان یکی از کارآمدترین گروه‌های مواد مرکب در صنایع هوافضا، خودروسازی، دریایی و حوزه‌های دفاعی مورد توجه ویژه قرار گرفته‌اند [۱] . این سازه‌ها که از دو رویه مستحکم و یک هسته سبک تشکیل می‌شوند، به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا، سفتی خمشی مطلوب و توانایی قابل توجه در جذب انرژی، رفتار مکانیکی بسیار مناسبی تحت بارگذاری‌های مختلف ارائه می‌دهند. اساس عملکرد این سازه‌ها افزایش ممان اینرسی مقطع بدون افزایش محسوس وزن است که موجب ارتقای مقاومت خمشی می‌شود [۲]. هندسه هسته نقش بسیار مهمی در تعیین رفتار این سازه‌ها در شرایط بارگذاری دینامیکی دارد و در این میان، هسته‌های موجدار و مشبک سه‌بعدی طی سال‌های اخیر توجه فراوانی را به خود جلب کرده‌اند [۳].

بسته به معماری و شرایط بارگذاری، هسته‌های موجدار تمایل دارند سفتی اولیه بیشتری ایجاد کنند و در بسیاری از موارد در برابر بارگذاری‌های متمرکز عملکرد مناسبی نشان می‌دهند. ژیا و همکاران در سال ۲۰۲۱ نشان دادند که تغییر ارتفاع موج و زاویه آن نقش تعیین‌کننده‌ای در ظرفیت جذب انرژی ویژه دارد و افزایش ارتفاع موج موجب بهبود محسوس این ظرفیت می‌شود [٤]. همچنین، تارلوچان در سال ۲۰۲۱ گزارش کرده است که سازه‌های موجدار، به‌دلیل رفتار کمانشِ کنترل‌شده، در برخی شرایط رفتاری پایدارتر از هسته‌های فومی و لانه‌زنبوری از خود نشان می‌دهند [۲].

هسته‌های مشبک سه‌بعدی با معماری‌هایی نظیر BCC، Kagome، FCC و Octet-Truss به‌دلیل ایجاد مسیرهای باربر متعدد، در بسیاری از شرایط مقاومت مناسبی در برابر بارهای ضربه‌ای ارائه می‌کنند. بای و همکاران در سال ۲۰۲۳ نشان دادند که افزایش قطر اعضا در هسته‌های مشبک BCC مدول مؤثر را تا ۲٫۳ برابر افزایش داده و جذب انرژی ویژه را نیز ۱٫۶ تا ۱٫۷ برابر می‌کند [۵]. تحقیقات یه و همکاران در سال ۲۰۱۹ نشان داد که چگالی نسبی، نسبت ظرافت اعضا و شکل سلول واحد تأثیر مستقیمی بر نحوه کمانش و مکانیزم شکست شبکه دارد [۶]. همچنین کوچویچ و همکاران در سال ۲۰۱۸ گزارش کردند که در هسته‌های مشبک با نسبت ظرافت بالا، کمانش الاستیک اعضا پیش از گسیختگی پلاستیک رخ می‌دهد [۷].

پیشرفت فناوری ساخت افزایشی طی سال‌های اخیر و به‌ویژه چاپ سه‌بعدی FDM موجب شده است که تولید هسته‌های پیچیده با دقت بالا و هندسه کاملاً کنترل‌شده امکان‌پذیر گردد. راماکریشنا و بالا مورالی در سال ۲۰۲۳ تأکید کردند که چاپ سه‌بعدی نه‌تنها طراحی معماری‌های نوین را ممکن ساخته، بلکه داده‌های آزمایشگاهی بسیار دقیق و قابل تکراری فراهم کرده است [۸]. در اغلب پژوهش‌های جدید، از PLA به دلیل وزن کم، فرآیندپذیری مناسب و رفتار مکانیکی قابل پیش‌بینی استفاده شده است [۹].

بارگذاری ضربه کم‌سرعت یکی از حالت‌های مهم بارگذاری در سازه‌های ساندویچی است. تحت این شرایط، بسته به سفتی رویه، مقاومت هسته و کیفیت اتصال، پدیده‌هایی مانند کانال‌زایی، لهیدگی موضعی، جدایش لایه‌ها و کمانش اعضای هسته ممکن است رخ دهد [۱۰].

در حوزه پاسخ ضربه، پژوهش‌های متعددی بر هسته‌های لانه‌زنبوری، فومی و فلزی انجام شده است. ژو و استرانگ در سال ۲۰۰۸ رفتار بالستیک سازه‌های ساندویچی تحت ضربه مایل را مدل‌سازی کردند و اثر زاویه برخورد بر شکست لایه‌ها را گزارش نمودند [۱۰]. هو و همکاران در سال ۲۰۱۰ نشان دادند که افزایش چگالی هسته فوم آلومینیومی موجب افزایش سرعت حد بالستیک می‌شود [۱۱]. تائو و همکاران در سال ۲۰۲۲ اثر ضخامت رویه و چگالی هسته را بر پاسخ ضربه‌ای سازه‌های ساندویچی بررسی کردند [۱۲]. ژانگ و همکاران در سال ۲۰۲۲ به بررسی رفتار دینامیکی سازه‌های لایه‌ای تقویت‌شده با الیاف شیشه–آلومینیوم با هسته لانه‌زنبوری پرداختند. و نشان دادند که افزایش ضخامت رویه موجب کاهش انحراف حداکثر می‌شود [۱۳]. اوستا و همکاران در سال ۲۰۲۲ نیز گزارش کردند که هسته‌های لانه‌زنبوری نسبت به فوم جذب انرژی ویژه بیشتری دارند [۱٤]. لیو و همکاران در سال ۲۰۲۴ رفتار پنل‌های فوم–کربن را تحت برخورد پرتابه یخ بررسی کردند و اثر سرعت و زاویه برخورد را بر الگوی شکست تحلیل نمودند [۱۵] . تحقیقات تانگ در سال ۲۰۲۴، رن و کاستا در همان سال نیز نشان داد که هندسه سلول، چگالی نسبی و تعداد لایه‌ها تأثیر مستقیم بر مقاومت نفوذ دارد [۱٦–۱۹].

با وجود حجم بالای پژوهش‌ها، بررسی‌های مقایسه‌ای نظام‌مند میان هسته‌های موجدار و مشبک چاپ‌شده تحت ضربه کم‌سرعت در شرایط کنترل‌شده محدود است. همچنین، اثر شکل نوک پرتابه که پارامتری کلیدی در رفتار تماس، تمرکز تنش و میزان آسیب است، در بسیاری از مطالعات نادیده گرفته شده است. مطالعات نشان می‌دهند پرتابه تخت نیروی تماس اولیه بالایی ایجاد می‌کند، پرتابه نیم‌کروی تنش را یکنواخت‌تر توزیع می‌کند و پرتابه مخروطی به دلیل تنش موضعی شدید، گرایش به نفوذ عمیق و شکست گلبرگی دارد. [۱۰ و ۱۱].

پژوهش حاضر با هدف پر کردن این خلأ طراحی شده است. در این تحقیق، هسته‌های موجدار سینوسی و هسته‌های مشبک BCC از جنس PLA با چاپ سه‌بعدی تولید شده و با رویه‌های GFRP یکپارچه شدند. رفتار نفوذی این پنل‌ها تحت ضربه کم‌سرعت سه نوع پرتابه با نوک تخت، نیم‌کروی و مخروطی با زاویه رأس ۶۷ درجه بررسی گردید. داده‌های نیرو-زمان، جابه‌جایی-زمان، انرژی جذب‌شده و الگوی آسیب ثبت شده و برای استخراج مکانیزم‌های شکست تحلیل شدند. هدف اصلی مطالعه ارائه یک ارزیابی جامع

از نقش شکل پرتابه و معماری هسته در رفتار نفوذی سازه‌های ساندویچی و تدوین قواعد طراحی برای نسل آینده سازه‌های سبک و مقاوم است.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، به‌منظور مقایسه رفتار مکانیکی سازه‌های ساندویچی با هسته‌های موج‌دار و مشبک تحت بارگذاری شبه‌استاتیک و نفوذ کم‌سرعت، مراحل طراحی، ساخت و آزمون‌های تجربی انجام گردید. کلیه نمونه‌ها با ابعاد و شرایط یکسان ساخته شدند.

رویه‌ها از صفحات کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف شیشه با وزن سطحی ۲۰۰ گرم بر متر مربع و رزین اپوکسی ساخته شدند. آرایش لایه‌ها به صورت $[0/90/+45]_s$ انتخاب گردید تا خواص مکانیکی متعادل حاصل شود. پس از لایه‌چینی و پخت اولیه، نمونه‌ها در دستگاه پرس گرم به مدت ۹۰ دقیقه در دمای ۱۴۵ درجه سلسیوس و فشار ۰/۶ مگاپاسکال قرار گرفتند که منجر به تولید ورق‌هایی با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر شد. در نهایت، پنل‌ها به ابعاد ۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر برش داده شدند که در شکل ۱ نمایش داده شده است.

شکل ۱ نمونه‌های پنل ساندویچی GFRP پس از برش به ابعاد 150 × 150 میلی‌متر

Fig 1. GFRP sandwich panel specimens after cutting to dimensions of 150 × 150 mm.

برای استخراج داده‌های معتبر تحلیل سازه‌های ساندویچی، مشخصات مکانیکی رویه‌های کامپوزیتی GFRP از طریق آزمون‌های استاندارد کشش(ASTM D3039) ، فشار (ASTM D695) و خمش سه‌نقطه‌ای (ASTM D790) در شرایط محیطی کنترل‌شده و نرخ بارگذاری ثابت به‌دست آمد. نتایج شامل استحکام و مدول کششی، فشاری و پارامترهای خمشی در جدول ۱ گزارش شده است. این داده‌ها با دقت بالا، به‌عنوان ورودی اصلی تحلیل حاضر و مرجعی برای کالیبراسیون مدل‌های المان محدود و شبیه‌سازی‌های عددی آینده مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول ۱ خواص مکانیکی GFRP مورد استفاده

Table 1. Mechanical properties of GFRP in use

Mechanical property	Value	Unit
Tensile Strength	420	MPa
Young's Modulus	22	GPa
Compressive Strength	320	MPa
Compressive Modulus	20	GPa
Flexural Strength	450	MPa
Flexural Modulus	21	GPa

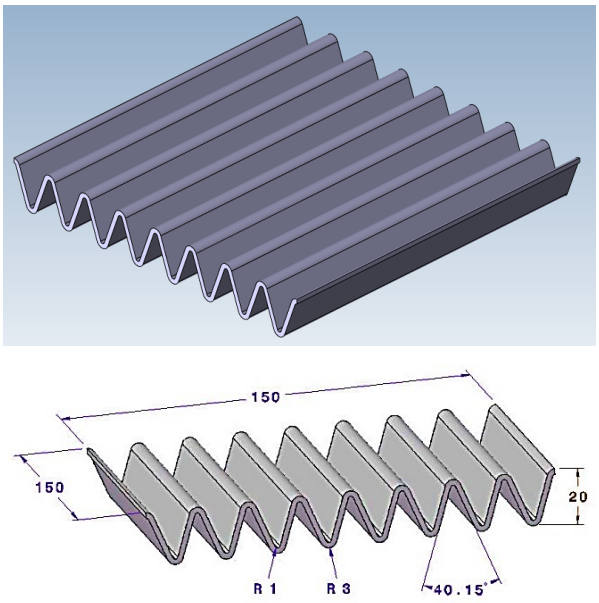
برای ساخت بخش هسته، از پلی‌لاکتیک‌اسید (PLA) به دلیل چگالی پایین، استحکام مناسب، رفتار ترد و سازگاری عالی با چاپ سه‌بعدی استفاده شد. هندسه هسته‌های موج‌دار و مشبک در نرم‌افزار CATIA طراحی و با روش مدل‌سازی رسوبی فیلامنت (FDM) تولید گردید. در این فرآیند، ضخامت لایه ۰/۲ میلی‌متر و ضخامت دیواره ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد تا ضمن تضمین دقت ابعادی، سفتی لازم در برابر ضربه فراهم شود. خواص مکانیکی PLA بر اساس آزمون‌های این مطالعه و داده‌های مرجع [۹] استخراج و به‌عنوان پایه ارزیابی رفتار دینامیکی و تحلیل‌های مقایسه‌ای مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول ۲ خواص مکانیکی PLA مورد استفاده

Table 2. Mechanical properties of PLA used

Mechanical property	Value	Unit
Ultimate Tensile Strength	73	MPa
Yield Strength	70	MPa
Elastic Modulus	3500	MPa
Elongation at Break	11.3	%
Shear Modulus	1287	MPa
Poisson's Ratio	0.36	-
Flexural Strength	106	MPa
Izod Impact Strength (Notched)	195	J/m

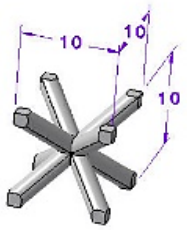
برای مقایسه، دو نوع هسته مورد انتخاب قرار گرفت. هسته‌ی موج‌دار بر اساس پروفیل سینوسی با زاویه‌ی ۴۰/۱۵ درجه طراحی گردید. در این هندسه، ارتفاع موج ۱۰ میلی‌متر معادل دامنه‌ی کامل ۲۰ میلی‌متر، طول گام ۲۰ میلی‌متر و ضخامت دیواره ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد. ابعاد کلی نمونه‌ها برابر با ۱۵۰ × ۱۵۰ میلی‌متر تعیین گردید تا نسبت ارتفاع به طول سازه در محدوده‌ی استاندارد باقی بماند. شکل ۲ هندسه‌ی هسته‌ی موج‌دار سینوسی را نشان می‌دهد.



شکل ۲ هندسه هسته موج‌دار سینوسی

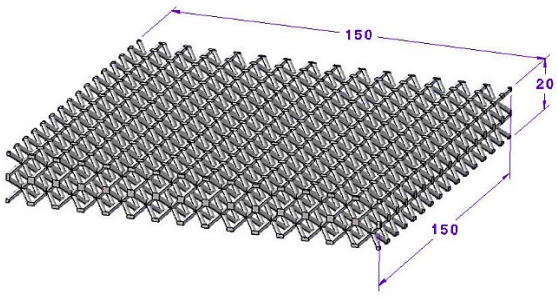
Fig 2. Geometry of the sinusoidal corrugated core

برای هسته مشبک، ساختار BCC به‌عنوان هندسه پایه انتخاب شد. در این طراحی، سلول‌های مکعبی با ضلع ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شدند و برای دستیابی به ارتفاع مطلوب، دو ردیف سلولی روی هم قرار گرفتند. ضخامت المان‌های شبکه‌ای ۲ میلی‌متر و ابعاد کلی نمونه مشابه هسته موج‌دار ۱۵۰ × ۱۵۰ میلی‌متر تعیین گردید. شکل ۳ نمایی از سلول واحد BCC و شکل ٤ هندسه‌ی کامل هسته‌ی مشبک را نشان می‌دهند.



شکل ۳ نمایی از سلول واحدBCC

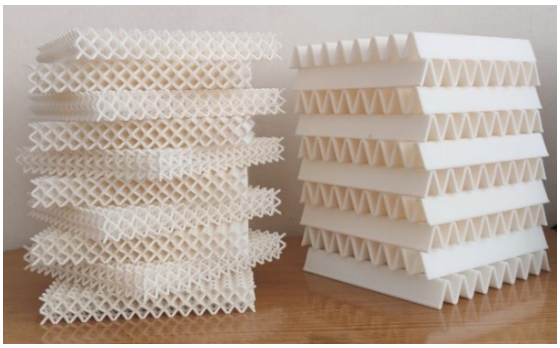
Fig 3. View of the BCC unit cell



شکل ۴ هندسه هسته مشبک با ساختار BCC

Fig 4. Geometry of the BCC lattice core

پس از طراحی هندسه‌ها، ساخت نمونه‌ها با فناوری چاپ سه‌بعدی (FDM) و فیلامنت PLA به دلیل پایداری ابعادی و سازگاری با رزین اپوکسی انجام شد. پارامترهای فرآیند شامل دمای نازل ۲۱۰–۲۰۰ درجه سلسیوس، دمای بستر ۵۰ درجه، سرعت چاپ ۵۰–۴۰ میلی‌متر بر ثانیه و ضخامت لایه ۰/۲ میلی‌متر تنظیم گردید. برای افزایش استحکام، درصد پرشدگی ٪۱۰۰ در نظر گرفته شد و پس از تولید، کنترل کیفیت ابعادی با کولیس دیجیتال انجام پذیرفت. شکل ۵ نمونه‌هایی از هسته‌های چاپ شده را نشان می‌دهد.

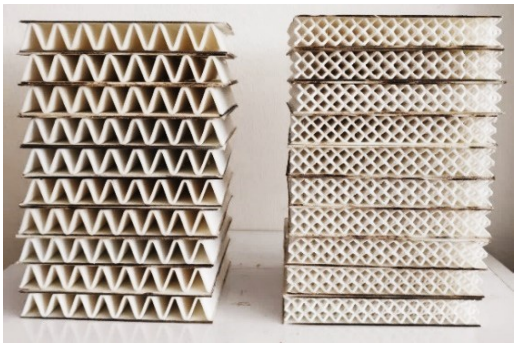


شکل ۵ نمونه‌هایی از هسته‌های چاپ شده

Fig 5. Samples of the printed cores

برای اتصال هسته‌های PLA به رویه‌های کامپوزیتی از چسب اپوکسی دوقلو UHU Plus Endfest 300 استفاده گردید. این چسب به دلیل استحکام و چسبندگی بالا، گزینه مناسبی برای مونتاژ سازه‌های ساندویچی است. نمونه‌ها پس از مونتاژ به مدت ۱۲ ساعت در شرایط محیطی پایدار نگه‌داری شدند تا فرآیند پخت تکمیل و حداکثر استحکام پیوند حاصل گردد. در این فرآیند، از پرس سرد برای اعمال فشار یکنواخت و جلوگیری از تشکیل حباب و جدایش موضعی استفاده که منجر به ایجاد اتصالی پایدار و یکنواخت شد. شکل ٦ نمونه‌هایی از ساندویچ پنل آماده شده برای تست را نشان می‌دهد.

آزمون ضربه کم‌سرعت با استفاده از دستگاه سقوط وزنه انجام شد. در این آزمون، از سه نفوذگر صلب با قطر ١٦ میلی‌متر با هندسه نوک تخت، نیم‌کروی و مخروطی استوانه‌ای مطابق شکل ۷ استفاده گردید. سطوح انرژی ضربه برای نفوذگر کروی ۳۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ ژول، برای نفوذگر نوک تخت ۴۰، ۶۰ و ۸۰ ژول و برای نفوذگر مخروطی ۳۰ و ۶۰ ژول تنظیم شد که با تغییر ارتفاع سقوط کنترل گردید. نمونه‌ها در قاب نگهدارنده صلب مهار شدند تا شرایط مرزی یکسان فراهم شود. پارامترهای کلیدی شامل نیروی نفوذ، عمق نفوذ و انرژی جذب‌شده با استفاده از حسگر نیرو–جابه‌جایی و نرم‌افزار ثبت داده‌ها استخراج شدند.



شکل ۶ نمونه‌هایی از ساندویچ پنل آماده شده برای تست

Fig 6. Samples of the sandwich panels prepared for testing

انرژی اولیه پرتابه از رابطه‌ی ۱ محاسبه گردید.

$$E_{impact} = \frac{1}{2}mv^2 \qquad (1)$$

انرژی جذب‌شده از سطح زیر منحنی نیرو- جابه‌جایی به‌دست آمد.

$$E_{absorbed} = \int_0^{\delta} F(\delta)d\delta \qquad (2)$$

که در آن m جرم پرتابه، v سرعت اولیه، F(δ) نیروی نفوذ و δ عمق نفوذ است.

همچنین، انرژی ویژه جذب‌شده با توجه به جرم پنل محاسبه شد.

$$SEA = \frac{E_{absorbed}}{m_{panel}} \qquad (3)$$

شکل ۸ دستگاه آزمون نفوذ کم‌سرعت و نحوه‌ی قرارگیری نمونه‌ها را نشان می‌دهد. برای بررسی دقیق‌تر مکانیزم‌های شکست، مقاطع آسیب‌دیده با میکروسکوپ نوری مورد مشاهده قرار گرفتند. این بررسی‌ها امکان تحلیل ریزساختاری جدایش لایه‌ها، کمانش موضعی، لهیدگی دیواره‌ها و گسترش ترک‌ها را فراهم نمودند.

شکل ۷ نفوذگرها با هندسه نوک تخت، نیم‌کروی و مخروطی

Fig 7. Impactors with flat, hemispherical, and conical nose geometries

شکل ۸ دستگاه آزمون نفوذ (Drop-weight impact)

Fig 8. Drop-weight impact testing machine

نتایج آزمون نفوذ کم‌سرعت

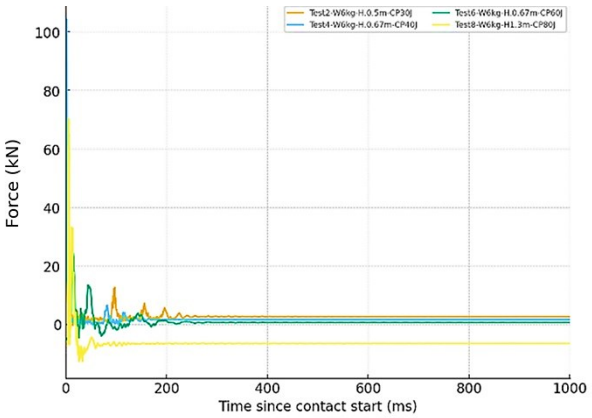
سطوح انرژی ضربه برای نفوذگر نیم‌کروی (۳۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ ژول)، نوک تخت (۴۰، ۶۰ و ۸۰ ژول) و مخروطی (۳۰ و ۶۰ ژول) با تغییر ارتفاع سقوط تنظیم گردید. به دلیل تفاوت در نیروی اوج ناشی از هندسه تماس، سطوح انرژی متفاوت انتخاب شدند؛ نفوذگر نوک تخت به دلیل سطح تماس بزرگ و نیروی اوج بالا نیازمند انرژی‌های بالاتر بود، نفوذگر نیم‌کروی رفتار متعادل‌تری در طیف وسیع‌تری از انرژی داشت و نفوذگر مخروطی به دلیل کمترین نیروی اوج و احتمال نفوذ سریع، تنها در انرژی‌های پایین‌تر مورد آزمایش قرار گرفت.

الف) نفوذگر با هندسه نوک کروی

در آزمون نفوذ کم‌سرعت، پاسخ‌های نیرو-زمان و انرژی-زمان برای سطوح انرژی ۳۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ ژول ثبت شد. نتایج نشان می‌دهد که هسته‌های موج‌دار به‌طور میانگین نیروی بیشینه بالاتری در برابر نفوذگر ایجاد می‌کنند؛ با این حال، پس از رسیدن به اوج، افت سریع نیرو و بروز شکست موضعی مشاهده می‌شود. در مقابل، هسته‌های مشبک با ایجاد مسیرهای متعدد انتقال بار، اگرچه نیروی اوج کمتری را تحمل می‌کنند، اما به‌دلیل پهن‌تر بودن پالس نیرو و تداوم تغییرمکان، انرژی کل جذب‌شده‌ی بیشتری ارائه می‌دهند.

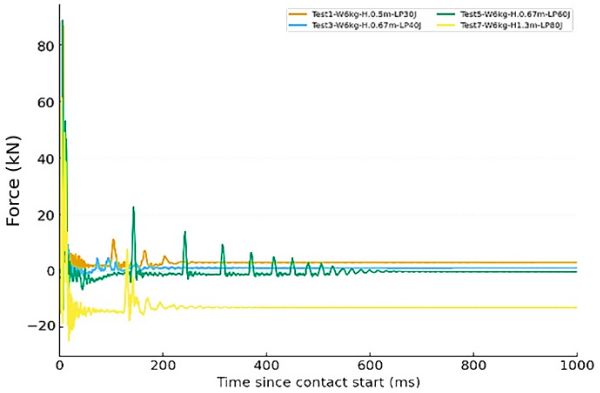
منحنی‌های نیرو-زمان و انرژی-زمان برای هسته‌های موج‌دار و مشبک در سطوح مختلف انرژی نفوذ به‌ترتیب در شکل‌های ۹ و

۱۰ نشان داده شده‌اند و نمودار میله‌ای انرژی جذب‌شده در سطوح مختلف ضربه در شکل ۱۱ ارائه شده است. آزمون‌ها با پرتابه‌ی فولادی استوانه‌ای با سرِ نیم‌کروی به قطر ۱۶ میلی‌متر انجام شده‌اند. برای بررسی دقت و تکرارپذیری نتایج، هر آزمون سه بار تکرار گردید و داده‌های حاصل به‌صورت میانگین ± انحراف معیار (SD) گزارش شدند. در نمودارهای ارائه‌شده، میله‌های خطا بیانگر انحراف معیار داده‌ها از میانگین هستند.



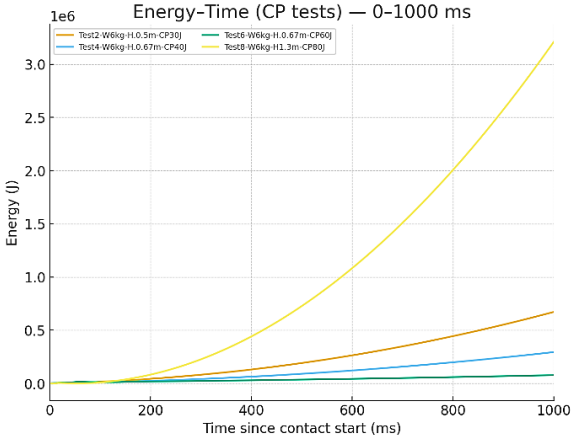
شکل ۹ الف-منحنی نیرو–زمان برای هسته‌های موجدار در انرژی‌های مختلف نفوذ

Fig 9.a. Force-time curves for corrugated cores at different impact energies



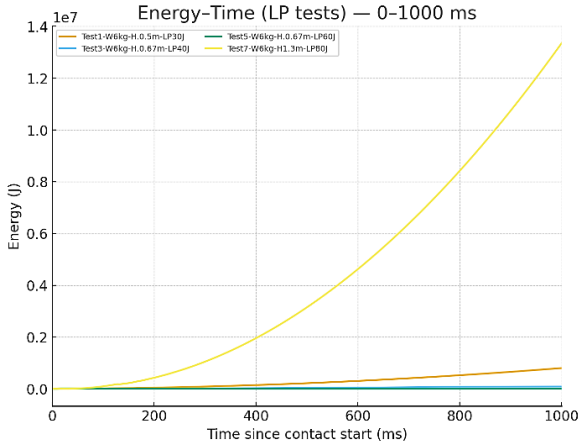
شکل ۹ ب- منحنی نیرو–زمان برای هسته‌های مشبک در انرژی‌های مختلف نفوذ

Fig 9.b. Force-time curves for lattice cores at different impact energies



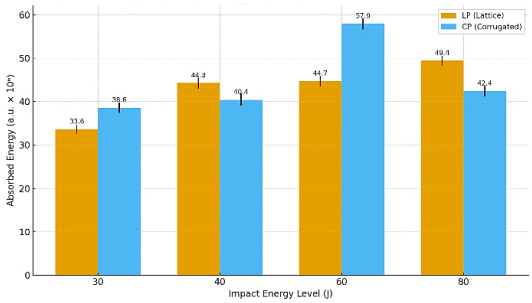
شکل ۱۰ الف- منحنی انرژی–زمان برای هسته‌های موجدار در انرژی‌های مختلف نفوذ

Fig 10.a. Energy-time curves for corrugated cores at different impact energies



شکل ۱۰ ب- منحنی انرژی–زمان برای هسته‌های موجدار و مشبک در انرژی‌های مختلف نفوذ

Fig 10.b. Energy-time curves for lattice cores at different impact energies



شکل ۱۱ انرژی جذب‌شده نمونه‌های مشبک و موجدار در سطوح مختلف انرژی ضربه. میله‌های خطا بیانگر انحراف معیار داده‌ها از سه تکرار آزمایش هستند.

Fig 11. Absorbed energy of lattice and corrugated samples at different impact energy levels. Error bars represent the standard deviation of data from three test repetitions.

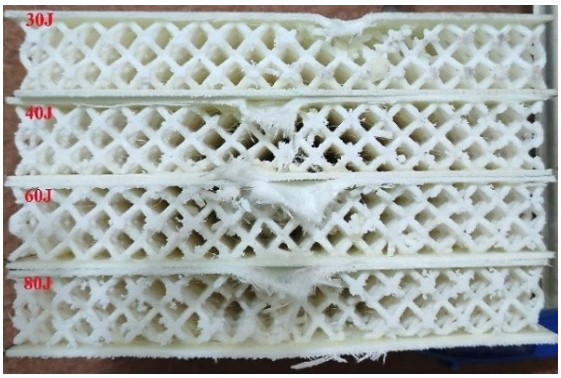
در جدول ۳، نتایج آزمون نفوذ هسته‌های موجدار و مشبک در سطوح انرژی ۳۰ تا ۸۰ ژول با پرتابه نیم‌کروی مقایسه شده است. با افزایش انرژی ضربه، عمق نفوذ و انرژی جذب‌شده افزایش می‌یابد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در سطوح ۳۰ و ۶۰ ژول، هسته‌های موجدار نیروی بیشینه و عمق نفوذ بیشتری دارند، در حالی که در سطوح ۴۰ و ۸۰ ژول، هسته‌های مشبک عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند. از آنجا که هیچ‌یک از دو هندسه برتری مطلق در همه شرایط ندارند، انتخاب هسته مناسب باید بر اساس شرایط بارگذاری و هدف طراحی مانند جذب انرژی یا تحمل نیرو انجام گیرد.

جدول ۳ مقایسه نتایج آزمون نفوذ-هر مقدار حاصل میانگین سه تکرار آزمایش است و میله‌های خطا در شکل ۱۱ بیانگر SD داده‌ها هستند

Table 3. Comparison of impact test results—each value is the average of three test repetitions, and the error bars in Figure 11 represent the data SD.

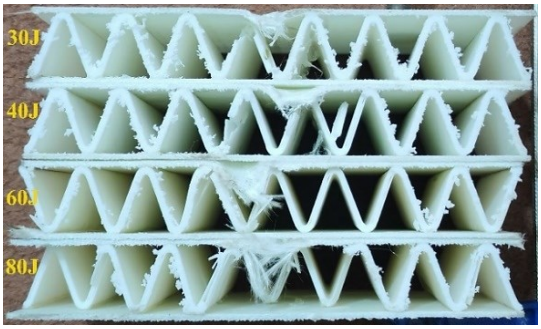
Core type	Impact energy (j)	Maximum force (kn)	Penetration depth (mm)	Absorbed energy (j)
Corrugated	30	5.62 ± 0.25	11.18 ± 0.30	24.45 ± 1.2
Lattice	30	4.23 ± 0.22	8.47 ± 0.27	28.71 ± 1.1
Corrugated	40	6.95 ± 0.28	14.23 ± 0.35	35.88 ± 1.3
Lattice	40	7.83 ± 0.29	13.64 ± 0.32	39.25 ± 1.3
Corrugated	60	7.83 ± 0.29	18.39 ± 0.40	41.34 ± 1.2
Lattice	60	6.11 ± 0.26	15.72 ± 0.33	47.92 ± 1.4
Corrugated	80	8.56 ± 0.30	21.85 ± 0.42	52.17 ± 1.3
Lattice	80	9.02 ± 0.32	20.44 ± 0.39	50.83 ± 1.2

تصاویر ثبت‌شده با دوربین پرسرعت و مشاهدات میکروسکوپی نشان دادند که در هسته‌های موجدار، شکست به‌صورت لهیدگی موضعی در محل تماس نفوذگر و جدایش بین‌لایه‌ای در مرز هسته و رویه رخ داد (شکل ۱۲). در ضربات ۶۰ و ۸۰ ژول، رویه پایینی هسته موجدار دچار جدایش گسترده از هسته شد و ترک‌های سرتاسری در رویه‌ها و بخش‌هایی از هسته مشاهده گردید که در شکل ۱۳ نشان داده شده است. هم چنین خرد شدن کامل و موضعی هسته موجدار در ۶۰ و ۸۰ ژول و ایجاد ترک‌های سرتاسری در هسته نیز نشان دهنده کاهش تحمل سازه در ضربات بالاتر از ۸۰ ژول است. در هسته‌های مشبک، تغییرشکل گسترده‌تری در کل شبکه اتفاق افتاد و مسیرهای باربری متعدد باعث گسترش تدریجی شکست شدند. در ضربات ۶۰ و ۸۰ ژول هسته‌های مشبک در محل برخورد ضربه زننده باعث آسیب شدند و بقیه قسمت‌های هسته و رویه پایینی کمترین آسیب را متحمل شدند که در شکل ۱۴ قابل مشاهده است. جهت مقایسه هر چه بیشتر آسیب در سازه های ساندویچی با هسته‌های مشبک و موجدار، پس از آزمون ضربه با انرژی‌های برخورد متفاوت این سازه‌ها در کنار یکدیگر قرار داده شده که در شکل ۱۵ نشان داده شده است.



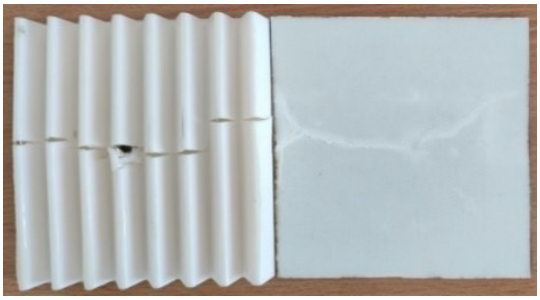
شکل ۱۲ الف-تصاویر شکست در آزمون نفوذ برای هسته‌های مشبک

Fig 12. a - Failure images in the impact test for lattice cores



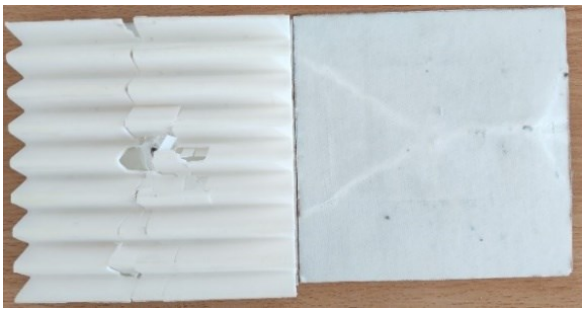
شکل ۱۲ ب- تصاویر شکست در آزمون نفوذ برای هسته‌های موجدار

Fig 12. b - Failure images in the impact test for corrugated cores



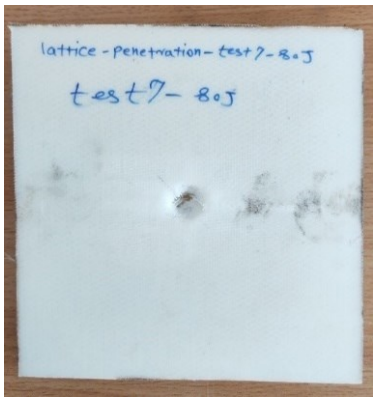
شکل ۱۳ الف-جدا شدن کامل رویه پایین و ایجاد ترک در هسته و رویه در آزمون ضربه ۶۰ ژول

Fig 13. a - Complete detachment of the bottom face sheet and cracking in the core and face sheet during the 60 J impact test



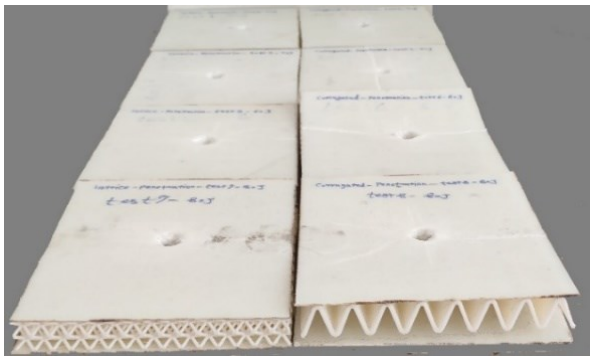
شکل ۱۳ ب-جدا شدن کامل رویه پایین و ایجاد ترک در هسته و رویه در آزمون ضربه ۸۰ ژول

Fig 13. b - Complete detachment of the bottom face sheet and cracking in the core and face sheet during the 80 J impact test



شکل ۱۴ عدم ایجاد ترک سرتاسری در سازه ساندویچی با هسته مشبک در آزمون ضربه ۸۰ ژول

Fig 14. No through-thickness crack formation in the sandwich panel with lattice core during the 80 J impact test



شکل ۱۵ اشکال هسته‌های مشبک و موج‌دار پس از آزمون ضربه با انرژی‌های متفاوت

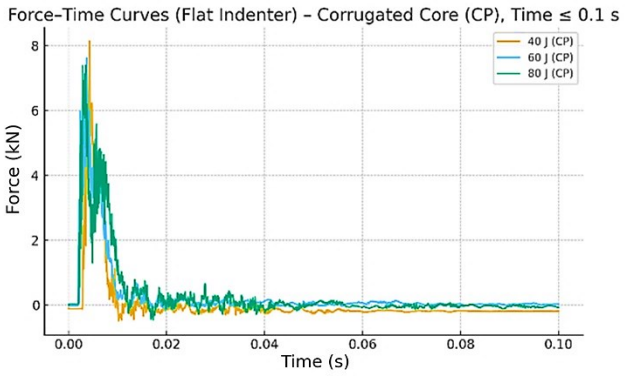
Fig 15. Deformation shapes of lattice and corrugated cores after impact tests with different energies

ب) نفوذگر با هندسه نوک تخت

در آزمون نفوذ کم‌سرعت، پاسخ‌های نیرو-زمان و انرژی-زمان برای سطوح انرژی اسمی ۴۰، ۶۰ و ۸۰ ژول استخراج شدند. منحنی‌های نیرو-زمان و انرژی-زمان نمونه‌های دارای هسته‌های موج‌دار و مشبک تحت برخورد نفوذگر با هندسه نوک تخت و قطر ۱۶ میلی‌متر در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده‌اند. همچنین نمودار میله‌ای انرژی جذب‌شده در سطوح مختلف انرژی ضربه برای هر دو نوع هسته در شکل ۱۸ ارائه شده است.

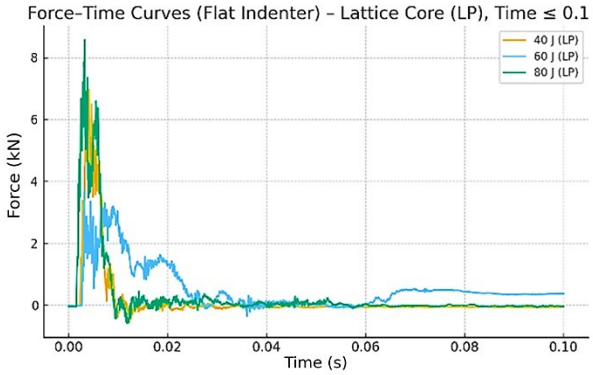
همان‌طور که در منحنی‌های نیرو-زمان مشاهده می‌شود، نفوذگر نوک تخت به دلیل سطح تماس بزرگ‌تر و سفتی اولیه بالاتر، بیشترین نیروی اوج را نسبت به نفوذگرهای نیم‌کروی و مخروطی ایجاد می‌کند. با افزایش انرژی ضربه، نیروی اوج به‌صورت یکنواخت افزایش می‌یابد؛ به‌طوری‌که نمونه‌های دارای هسته مشبک در انرژی ۸۰ ژول بیشترین مقدار نیرو را تجربه می‌کنند.

علاوه بر این، با افزایش انرژی ضربه، انرژی جذب‌شده توسط سازه نیز افزایش می‌یابد. اگرچه تفاوت کلی بین دو هسته کم است، اما در سطح ۸۰ ژول هسته مشبک جذب انرژی بیشتری نشان می‌دهد، در حالی‌که در ۶۰ ژول اختلاف ناچیز است. در مقابل،



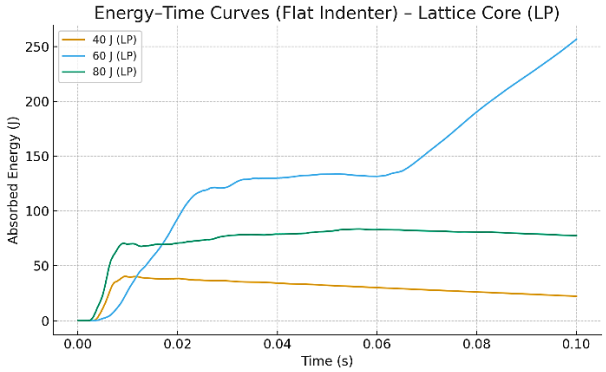
شکل ۱۶ الف- منحنی نیرو-زمان برای هسته‌های موج‌دار در انرژی‌های مختلف نفوذ

Fig 16.a. Force-time curves for corrugated cores at different impact energies



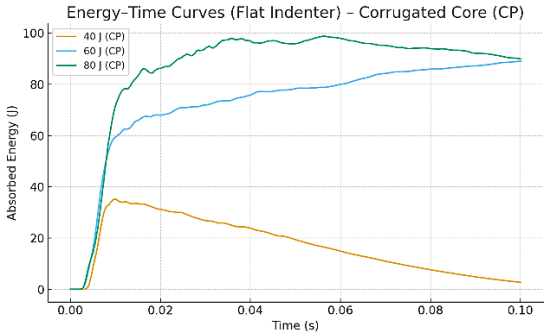
شکل ۱۶ ب- منحنی نیرو-زمان برای هسته‌های مشبک در انرژی‌های مختلف نفوذ

Fig 16.b. Force-time curves for lattice cores at different impact energies



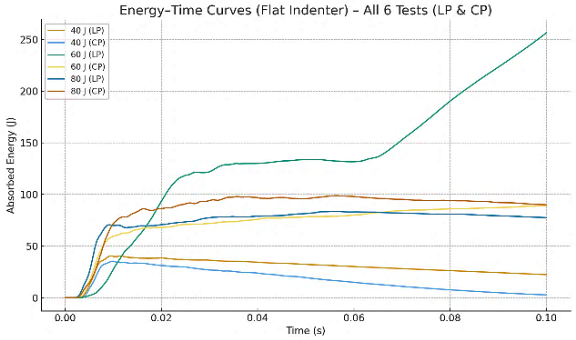
شکل ۱۷ الف-منحنی انرژی-زمان برای هسته‌های مشبک در انرژی‌های مختلف نفوذ

Fig 17.a. Energy-time curves for lattice cores at different impact energies



شکل ۱۷ ب-منحنی انرژی-زمان برای هسته‌های موجدار در انرژی‌های مختلف نفوذ

Fig 17.b. Energy-time curves for corrugated cores at different impact energies



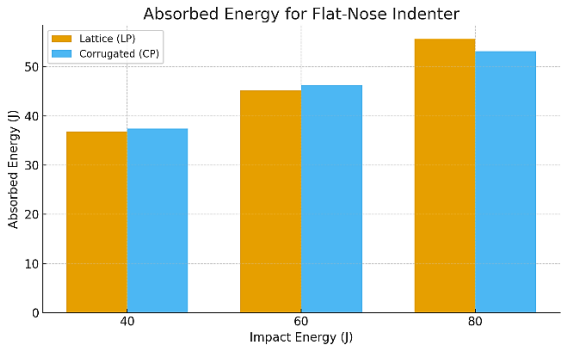
شکل ۱۷ ج-منحنی انرژی-زمان برای هسته‌های موجدار و مشبک در انرژی‌های مختلف نفوذ

Fig 17.c. Energy-time curves for corrugated and lattice cores at different impact energies

جدول ۴ مقایسه نتایج آزمون نفوذ برای پرتابه با نوک تخت

Table 4. Comparison of impact test results for the flat-nosed projectile

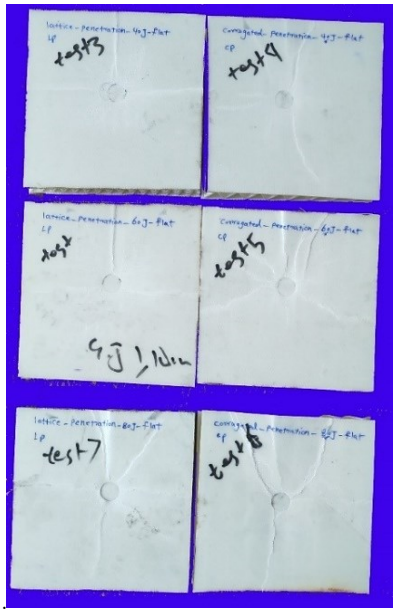
Core type	Impact energy (j)	Maximum force (kn)	Penetration depth (mm)	Absorbed energy (j)
Corrugated	40	7.54	15.37	37.41
Lattice	40	6.64	12.50	36.82
Corrugated	60	6.80	19.46	46.27
Lattice	60	3.24	18.73	45.19
Corrugated	80	6.89	23.58	53.14
Lattice	80	8.33	25.40	55.62



شکل ۱۸ نمودار میله‌ای انرژی جذب‌شده با پرتابه سرتخت

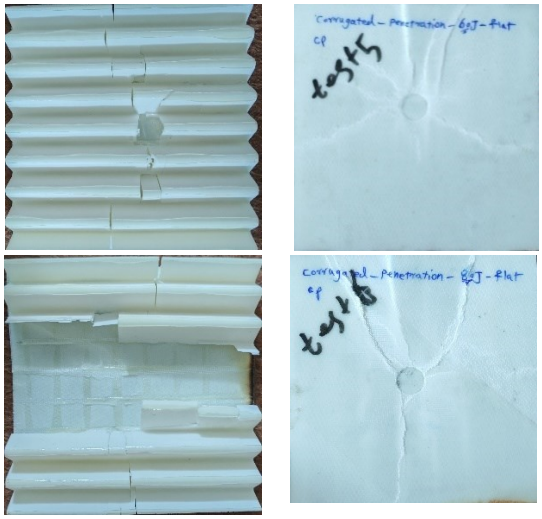
Fig 18. Bar chart of absorbed energy with the flat-nosed projectile

همان‌طور که در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود، در برخورد پرتابه نوک تخت در سطوح انرژی ۴۰ تا ۸۰ ژول، نفوذ به داخل هسته رخ نداده و انرژی عمدتاً صرف تغییرشکل موضعی و لهیدگی هسته شده است. با افزایش انرژی، شدت تخریب در ساختار هسته بیشتر می‌شود. طبق شکل ۲۰، هسته موجدار در انرژی‌های ۶۰ و ۸۰ ژول آسیب بیشتری متحمل شده و در ۸۰ ژول خردشدگی وسیع و ازهم‌گسیختگی موضعی نشان می‌دهد. در مقابل، هسته‌های مشبک کمترین میزان تخریب را داشته‌اند که بیانگر توزیع مؤثرتر بار و مقاومت بالاتر آن‌ها در برابر تغییرشکل‌های گسترده ناشی از تماس تخت است.



شکل ۱۹ اشکال هسته‌های مشبک و موجدار پس از آزمون ضربه با انرژی‌های متفاوت (پرتابه سرتخت)

Fig 19. Deformation shapes of lattice and corrugated cores after impact tests with different energies (flat-nosed projectile)



شکل ۲۰ اشکال هسته‌های موجدار پس از آزمون ضربه با سطح انرژی‌های ۶۰ و ۸۰ ژول

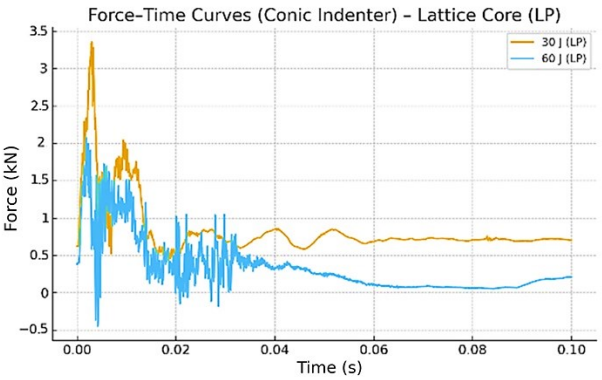
Fig 20. Deformation shapes of corrugated cores after impact tests with energy levels of 60 and 80 J

ج) نفوذگر با هندسه نوک مخروطی

در آزمون نفوذ کم‌سرعت با نفوذگر دارای هندسه نوک مخروطی، پاسخ‌های نیرو-زمان و انرژی-زمان نمونه‌های دارای هسته‌های موجدار و مشبک تحت سطوح انرژی اسمی ۳۰ و ۶۰ ژول ثبت و تحلیل شدند. منحنی‌های نیرو-زمان این نمونه‌ها در شکل ۲۱ ارائه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نفوذگر مخروطی کمترین نیروی اوج را در مقایسه با دو نفوذگر نیم‌کروی و تخت ایجاد می‌کند. این موضوع به دلیل تمرکز تنش بالا در ناحیه تماس و آغاز سریع فرآیند نفوذ موضعی است که موجب کاهش سفتی اولیه سازه در لحظه نخست برخورد می‌شود.

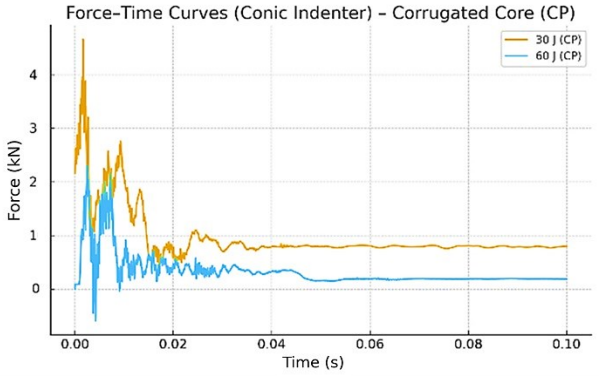
منحنی‌های انرژی-زمان در شکل ۲۲ نشان داده شده‌اند. با افزایش انرژی ضربه از ۳۰ به ۶۰ ژول، مقدار انرژی جذب‌شده توسط سازه افزایش می‌یابد. هسته‌های موجدار در هر دو سطح انرژی، انرژی بیشتری را نسبت به هسته‌های مشبک جذب می‌کنند که نشان‌دهنده قابلیت تغییرشکل تدریجی مشابه مکانیزم پوست‌پوسته‌شدن در ساختار موجدار است. در مقابل، هسته مشبک به دلیل ساختار متراکم‌تر و سخت‌تر، در سطوح بالاتر انرژی، تغییرشکل کمتری را تجربه کرده و انرژی جذب‌شده کمتری دارد.

نمودار میله‌ای انرژی جذب‌شده در شکل ۲۳ نشان می‌دهد که با افزایش انرژی ضربه، جذب انرژی در هر دو نمونه افزایش می‌یابد. با این حال، اختلاف میان دو هسته در نفوذگر مخروطی کمتر از نفوذگر تخت است که به ماهیت نفوذ موضعی و تمرکز تنش بالا در نوک مخروطی مربوط می‌شود؛ این امر با نتایج مطالعات پیشین درباره نفوذگرهای تیز هم‌خوانی دارد.



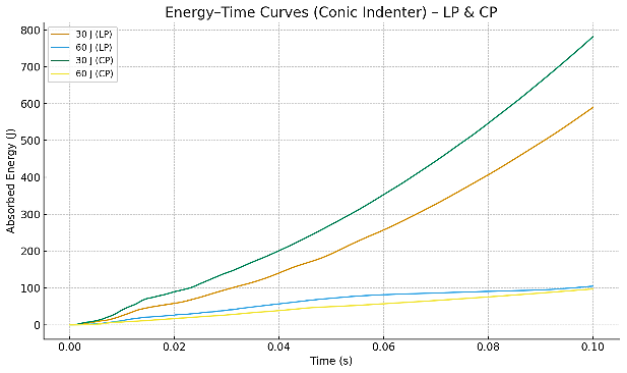
شکل ۲۱ الف-منحنی نیرو-زمان برای هسته‌های مشبک تحت نفوذگر نوک مخروطی در انرژی‌های ۳۰ و ۶۰ ژول

Fig 21.a. Force-time curves for lattice cores under conical-nosed impactor at 30 and 60 J energies



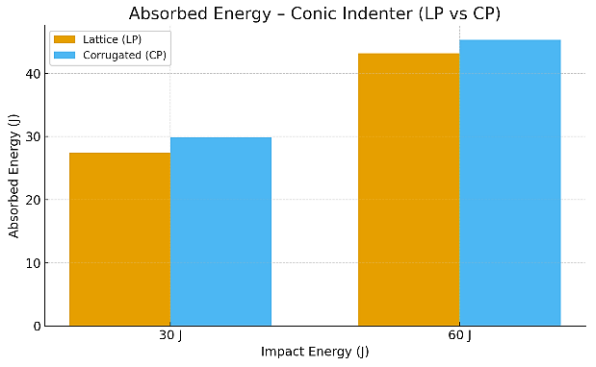
شکل ۲۱ ب- منحنی نیرو-زمان برای هسته‌های موجدار تحت نفوذگر نوک مخروطی در انرژی‌های ۳۰ و ۶۰ ژول

Fig 21.b. Force-time curves for corrugated cores under conical-nosed impactor at 30 and 60 J energies



شکل ۲۲ منحنی انرژی-زمان برای هسته‌های موجدار و مشبک تحت نفوذگر نوک مخروطی در انرژی‌های ۳۰ و ۶۰ ژول

Fig 22. Energy-time curves for corrugated and lattice cores under conical-nosed impactor at 30 and 60 J energies

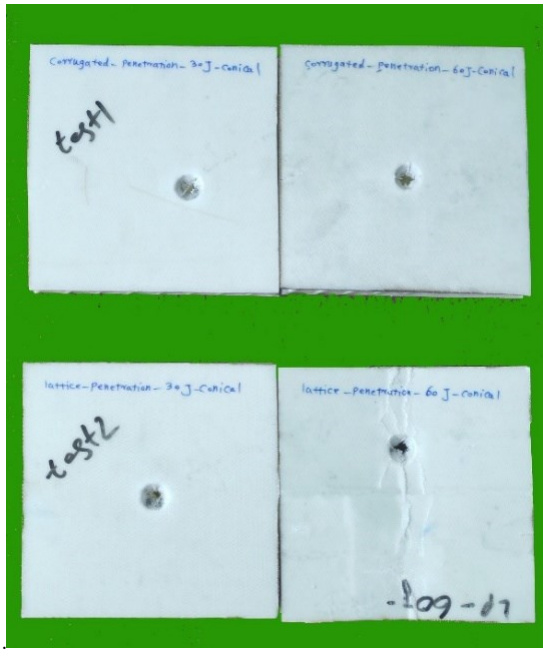


شکل ۲۳ نمودار میله‌ای انرژی جذب‌شده سازه‌های دارای هسته موجدار و مشبک تحت نفوذگر نوک مخروطی در انرژی‌های ۳۰ و ۶۰ ژول

Fig 23. Bar chart of absorbed energy for sandwich panels with corrugated and lattice cores under conical-nosed impactor at 30 and 60 J energies

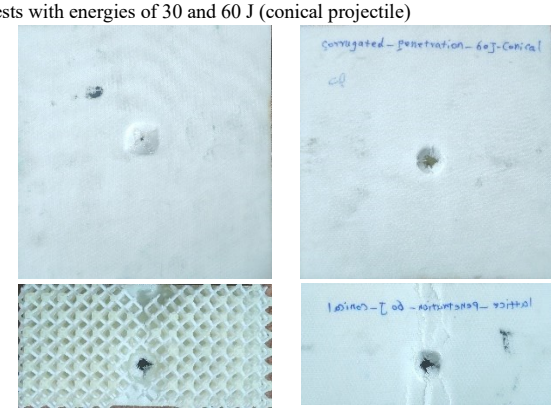
در شکل‌های ۲۴ و ۲۵، الگوهای خرابی هسته‌های موجدار و مشبک تحت ضربه پرتابه مخروطی در انرژی‌های ۳۰ و ۶۰ ژول نشان داده شده است. در انرژی ۳۰ ژول، نفوذ موضعی نوک پرتابه از رویه پایینی در هر دو نمونه رخ داد که این شدت در هسته مشبک

بیشتر بود. با افزایش انرژی به ۶۰ ژول، مکانیزم خرابی به نفوذ کامل، خردشدگی موضعی و جدایش بین‌لایه‌ای گسترده تبدیل شد که ناشی از تمرکز تنش در نوک مخروطی است. همان‌طور که در شکل ۲۵ مشاهده می‌شود، در ۶۰ ژول میزان آسیب در هسته مشبک با جدایش کامل رویه پایینی بسیار بیشتر از نمونه موج‌دار است. این رفتار معکوس نسبت به پرتابه نوک تخت، نشان‌دهنده نقش غالب تمرکز تنش و نفوذ موضعی در نفوذگر مخروطی نسبت به توزیع یکنواخت بار است.



شکل ۲۴ اشکال هسته‌های مشبک و موج‌دار پس از آزمون ضربه با انرژی‌های ۳۰ و ۶۰ ژول (پرتابه مخروطی)

Fig 24. Deformation shapes of lattice and corrugated cores after impact tests with energies of 30 and 60 J (conical projectile)



شکل ۲۵ اشکال رویه‌های هسته‌های موج‌دار ومشبک پس از آزمون ضربه با انرژی ۶۰ ژول

Fig 25. Deformation shapes of the face sheets of lattice and corrugated cores after the 60 J impact test

جدول ۵ مقایسه نتایج آزمون نفوذ برای پرتابه مخروطی

Table 5. Comparison of impact test results for the conical projectile

Core type	Impact energy (j)	Maximum force (kn)	Penetration depth (mm)	Absorbed energy (j)
Corrugated	30	4.66	15.97	29.84
Lattice	30	3.36	14.82	27.41
Corrugated	60	2.30	22.45	45.32
Lattice	60	2.07	20.86	43.15

بحث و تحلیل

نتایج آزمون‌های نفوذ کم‌سرعت نشان می‌دهد که هندسه نفوذگر تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر رفتار ضربه‌ای سازه‌های ساندویچی دارد. در نفوذگر نیم‌کروی، سفتی اولیه بالا و تماس یکنواخت منجر به نیروی اوج بزرگ می‌شود؛ به‌طوری‌که هسته مشبک به دلیل ساختار متراکم، نیروی اوج بیشتری را تحمل می‌کند، اما هسته موج‌دار با تغییرشکل گسترده‌تر، جذب انرژی بهتری دارد. در نفوذگر نوک‌تخت، سطح تماس زیاد باعث افزایش نیروی اوج و توزیع یکنواخت تنش می‌شود که اختلاف عملکرد دو نوع هسته را کاهش می‌دهد. در مقابل، نفوذگر مخروطی با تماس نقطه‌ای کمترین نیروی اوج را ایجاد کرده و هسته موج‌دار در این حالت با تغییرشکل نرم‌تر، جذب انرژی بالاتری نسبت به هسته مشبک نشان می‌دهد. به‌طور کلی، تمرکز تنش و الگوی انتقال نیرو نقش کلیدی در پاسخ ضربه‌ای دارند.

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه تجربی، می‌توان نکات زیر را بیان کرد:

۱. هندسه نفوذگر مستقیماً پاسخ ضربه‌ای را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ به‌گونه‌ای‌که نفوذگر نوک‌تخت بالاترین نیروی اوج، نیم‌کروی بیشترین سفتی اولیه و مخروطی کمترین نیروی اوج را ایجاد می‌کند.

۲. هسته‌های موج‌دار در اکثر شرایط، به دلیل تغییرشکل تدریجی و توزیع بهتر کرنش، ظرفیت جذب انرژی بالاتری نسبت به هسته‌های مشبک دارند.

۳. هسته‌های مشبک با ساختار متراکم، سفتی اولیه و تحمل نیروی اوج بیشتری نشان می‌دهند، اما در جذب انرژی کلی ضعیف‌تر عمل می‌کنند.

٤. افزایش انرژی ضربه باعث جذب انرژی بیشتر در همه هندسه‌ها می‌شود؛ این حساسیت در نفوذگر مخروطی بیشتر است.

۵. در نفوذگر نوک‌تخت، توزیع یکنواخت تنش باعث کاهش تفاوت رفتار مکانیکی بین هسته‌های موج‌دار و مشبک می‌شود.

۶. در نفوذگر مخروطی، غلبه مکانیزم نفوذ موضعی و کاهش سفتی اولیه باعث می‌شود اختلاف عملکرد دو نوع هسته کمتر شود.
۷. انتخاب معماری هسته باید بر اساس نیاز عملکردی باشد: هسته موج‌دار برای جذب انرژی و کنترل تغییرشکل و هسته مشبک برای سفتی اولیه بالا و تحمل بار لحظه‌ای مناسب‌تر است.

-**تاییدیه‌های اخلاقی**: این مقاله پیش از این در نشریه دیگری چاپ نشده و محتوای آن حاصل فعالیت علمی نویسندگان است؛ صحت و اعتبار نتایج بر عهده آنان می‌باشد.
-**تعارض منافع:** در این مقاله از برخی نتایج حاصل از رساله دکتری استفاده شده‌است. هیچ تعارض منافع دیگری برای اظهار وجود ندارد.

مراجع

[1] Buitrago, B. L., Santiuste, C., Sánchez-Sáez, S., Barbero, E., & Navarro, C. (2010). Modelling of composite sandwich structures with honeycomb core subjected to high-velocity impact. Composite Structures, 92(9), 2090-2096. Doi:10.1016/j.compstruct.2009.10.013
[2] Tarlochan, F. (2021). Sandwich structures for energy absorption applications: A review. Materials, 14(16), 4731. doi:10.3390/ma14164731
[3] Ren, C. X., Hu, Z. F., Yao, C., & Mo, F. (2019). Experimental study on the quasi-static compression behavior of multilayer aluminum foam sandwich structure. Journal of Alloys and Compounds, 810, 151860. doi:10.1016/j.jallcom.2019.151860
[4] Xia, F., Durandet, Y., Yu, T. X., & Ruan, D. (2021). Large deformation of corrugated sandwich panels under three-point bending. J. Sandwich Structures & Materials, 23(7), 3336–3367. doi:10.1177/1099636220927650
[5] Bai, Y., Gao, J., Huang, C., Li, Y. (2023). Mechanical properties of AlSi10Mg shell–BCC lattice structures. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 36(1), 143. Doi:10.1186/s10033-023-00973-8
[6] Ye, G., Bi, H., Chen, L., & Hu, Y. (2019). Compression and energy absorption of PLA lattice structures. 3D Printing and Additive Manufacturing, 6(6), 333–343. doi:10.1089/3dp.2019.0068
[7] Kucewicz, M., Baranowski, P., Malachowski, J., Poplawski, A., & Platek, P. (2018). Characterization of 3D-printed cellular structures. Materials and Design. Doi:10.1016/j.matdes.2018.01.028
[8] Ramakrishna, D., & Bala Murali, G. (2023). Bio-inspired 3D-printed lattice structures for energy absorption applications: A review. Journal of Materials: Design and Applications. doi:10.1177/14644207221121948
[9] Farah, S., et al. (2016). Mechanical properties of PLA. Advanced Drug Delivery Reviews. doi:10.1016/j.addr.2016.06.012
[10] Zhou, D. W., & Stronge, W. J. (2008). Ballistic limit of sandwich panels. International Journal of Impact Engineering. doi:10.1016/j.ijimpeng.2007.08.004
[11] Hou, W., Zhu, F., Lu, G., & Fang, D. (2010). Ballistic impact on metallic sandwich panels. IJIE, 37(10), 1045–1055. doi:10.1016/j.ijimpeng.2010.03.006
[12] Tao, Q., et al. (2022). Energy absorption of composite sandwich panels. IJIE, 162, 104143. doi:10.1016/j.ijimpeng.2021.104143
[13] Zhang, J., et al. (2022). Dynamic response of GLARE–honeycomb panels. IJIE, 164, 104201. doi:10.1016/j.ijimpeng.2022.104201
[14] Usta, F., et al. (2022). High-velocity impact on re-entrant honeycomb cores. IJIE, 165, 104230. doi:10.1016/j.ijimpeng.2022.104230
[15] Liu, X., et al. (2024). Impact of ice projectile on foam sandwich panels. IJIE, 104994. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2024.104994
[16] Costa, E. A., & Driemeier, L. (2024). Optimization of auxetic sandwich panels. Composite Structures. DOI: 10.1016/j.compstruct.2024.118436
[17] Li, L., et al. (2023). Shock–impact response of honeycomb panels. Thin-Walled Structures, 193. DOI: 10.1016/j.tws.2023.111256
[18] Tang, Q., et al. (2024). Metallic foam panels under hypervelocity impact. Thin-Walled Structures, 195. DOI: 10.1016/j.tws.2023.111440
[19] Ren, S., et al. (2024). Damage in double-layer honeycomb panels. Thin-Walled Structures, 202. DOI: 10.1016/j.tws.2024.112076
[20] Chang, B., et al. (2024). Energy absorption of composite honeycomb structures. Applied Sciences. DOI: https://doi.org/10.3390/app14072832