نشریه علمی- پژوهشی مهندسی هوانوردی
سال بیست و هشتم، شماره اول، بهار وتابستان 1405

بررسی تجربی رفتار ضربه سرعت پایین در پانل ساندویچی با هسته چوب درخت خرما

وحید عطابخشیان[1]، عباس قره‌قاشی[2]، حسین تقی‌پور[3*]

1- . استادیار گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه ولایت، ایرانشهر ، ایران

2. استادیار گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولایت، ایرانشهر، ایران

3. استادیار گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه ولایت، ایرانشهر ، ایران

(دریافت مقاله: 1404/08/24 تاریخ پذیرش: 1404/09/26)

چکیده

در این پژوهش، رفتار ضربه‌ای پانل‌های ساندویچی با هسته‌ی چوب درخت خرما تحت بارگذاری نفوذی سرعت پایین به‌صورت تجربی مورد ارزیابی قرار گرفت. شش نوع پنل با دو ضخامت هسته (20 و 40 میلی‌متر) و سه سطح انرژی ضربه (50، 100 و 150 ژول) ساخته شد و آزمون نفوذ با ضربه‌زن سقوطی 10 کیلوگرمی انجام گرفت. نمودارهای نیرو–جابجایی و انرژی جذب‌شده استخراج و مکانیزم‌های شکست با مقایسه‌ی الگوهای تخریب جلو و پشت نمونه تحلیل شد. نتایج نشان داد که چوب خرما با ساختار سلولی ناهمگن خود رفتار چندمرحله‌ای در جذب انرژی ایجاد کرده و در تمام سطوح انرژی مورد بررسی، منجر به نفوذ کامل همراه با فشردگی تدریجی هسته گردید. افزایش ضخامت هسته موجب افزایش چشمگیر ظرفیت جذب انرژی شد؛ به‌طوری‌که انرژی جذب‌شده در نمونه‌های 40 میلی‌متری تحت ضربه 100 ژول بیش از سه برابر مقدار نمونه‌های 50 ژول افزایش یافت. همچنین نیروی اوج نمونه‌ها از حدود 2,3 کیلونیوتون در انرژی 50 ژول به بیش از 6,3 کیلونیوتون در انرژی 150 ژول رسید. تحلیل نتایج نشان داد که رفتار شکست ترکیبی از پانچ رویه، فشردگی سلولی هسته و جدایش پلاگ از پشت نمونه است و افزایش انرژی موجب کاهش راندمان جذب انرژی به دلیل افزایش سهم شکست‌های ترد و نفوذ کامل می‌شود. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که چوب خرما می‌تواند به‌عنوان یک هسته‌ی زیست‌پایه با عملکرد مکانیکی مناسب برای کاربردهای جذب انرژی در پانل‌های ساندویچی به‌کار رود.

واژه‌های کلیدی: پانل ساندویچی، چوب درخت خرما، رویه آلومینیوم، تست نفوذ ضربه‌ای، جذب انرژی

Experimental Investigation of Palm Wood Core Sandwich Panel under Low-velocity Impact Loading

1st Vahid Atabakhshian, 2nd Abbas Ghareghashi, 3rd Hossein Taghipoor

Abstract

In this study, the impact response of sandwich panels incorporating a date-palm wood core was experimentally investigated under low-velocity perforation loading. Six panel configurations were manufactured using two core thicknesses (20 and 40 mm) and three impact energy levels (50, 100, and 150 J). Perforation tests were carried out with a 10-kg drop-weight impactor. Force–displacement curves and absorbed-energy histories were extracted, and the failure mechanisms were examined by comparing the front- and back-face damage patterns. The results showed that the heterogeneous cellular architecture of date-palm wood produces a multi-stage energy-absorption response, resulting in complete perforation accompanied by progressive core crushing at all investigated energy levels. Increasing the core thickness markedly improved the energy-absorption capacity; the absorbed energy of the 40-mm specimens under the 100-J impact was more than three times that of the 50-J specimens. Additionally, the peak force increased from about 2.3 kN at 50 J to over 6.3 kN at 150 J. Failure analysis revealed a combined mechanism involving face-sheet punching, cellular core crushing, and plug pull-out on the back face. Higher impact energies were associated with reduced energy-absorption efficiency due to the greater contribution of brittle fracture and full perforation. Overall, the findings demonstrate that date-palm wood is a promising bio-based core material with favorable mechanical characteristics for energy-absorption applications in sandwich structures.

Key words: *Sandwich panel, palm wood, aluminum surface, impact penetration test, energy absorption*

* نویسنده پاسخگو: حسین تقی‌پور، تلفن: 09120730229، پست الکترونیک: h.taghipoor@velayat.ac.ir

این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس از آدرس https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمایید.

مقدمه

پانل‌های ساندویچی از جمله سازه‌های مرکب سبک‌وزنی هستند که به‌دلیل نسبت بالای استحکام به وزن، سختی مناسب و قابلیت جذب انرژی، در صنایع مختلف از جمله ساختمان، خودروسازی، حمل‌ونقل و صنایع هوایی کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند. این سازه‌ها معمولاً از دو لایه‌ی رویه‌ای سخت و مقاوم و یک هسته‌ی سبک در میان تشکیل می‌شوند. عملکرد مکانیکی چنین ساختارهایی تا حد زیادی به نوع مواد استفاده‌شده در لایه‌ها، ضخامت نسبی اجزا و چسبندگی میان آن‌ها وابسته است [1-4].

در سال‌های اخیر، با توجه به دغدغه‌های زیست‌محیطی و محدودیت منابع معدنی، پژوهشگران به‌سمت استفاده از مواد زیست‌پایه و تجدیدپذیر به‌عنوان جایگزین برای هسته‌های مصنوعی مانند فوم‌های پلیمری و آلومینیومی گرایش یافته‌اند. یکی از گزینه‌های ارزشمند در این زمینه، چوب درخت خرما است که به‌طور گسترده در مناطق گرمسیری و بیابانی در دسترس بوده و به‌عنوان یک منبع زیست‌پایه‌ی ارزان، سبک و سازگار با محیط زیست شناخته می‌شود. چوب خرما با داشتن ساختار متخلخل طبیعی و مقاومت ویژه‌ی قابل‌قبول، می‌تواند در نقش هسته‌ی جذب‌کننده‌ی انرژی در سازه‌های چندلایه ایفای نقش کند[5].

سیلوا و همکاران [6] در مطالعه‌ای اظهار کردند که مواد چوبی طبیعی به‌دلیل ساختار سلولی چندمقیاسی، رفتار وابسته به دانسیته و قابلیت فشردگی مرحله‌ای، یکی از مستحکم‌ترین گزینه‌ها برای جذب انرژی تحت بارهای ضربه‌ای هستند. تحلیل کیفی این پژوهش نشان می‌دهد که چوب‌های طبیعی رفتار سه‌مرحله‌ای تحت بار فشاری شامل تسلیم اولیه، فروریزش پیشرونده و تراکم نهایی دارند. بررسی کمی ارائه‌شده توسط آن‌ها نشان داد که مدول فشاری چوب بالسا در راستای الیاف تا 6 برابر بیشتر از جهت شعاعی و مماسی است و این ناهمسانگردی یکی از دلایل کارایی بالای آن در جذب انرژی محسوب می‌شود.

آنژوس و همکاران [7] نیز با انجام آزمون‌های تجربی متعدد روی چوب‌های متخلخل طبیعی نشان دادند که میزان تغییرشکل پلاستیک و ظرفیت جذب انرژی با دانسیته رابطه مستقیم دارد. داده‌های آن‌ها بیان می‌کند که انرژی جذب‌شده تا سطح کرنش 60٪ می‌تواند بیش از 40 درصد بین نواحی با دانسیته متفاوت یک تنه چوب تغییر کند. این یافته‌های کمی نقش ناهمگنی را در طراحی هسته‌های گرادیانی دوچندان می‌کند.

روسا و فورتس [8] در تحلیل آناتومیک چوب نخل نشان دادند که دانسیته در راستای شعاع و ابعاد الیاف به‌صورت لایه‌لایه تغییر می‌کند؛ به‌گونه‌ای که دانسیته مناطق محیطی تنه تا دو برابر بیشتر از نواحی مرکزی گزارش شده است. نتایج میکروسکوپی این مطالعات کیفی—کمی نشان می‌دهد که وجود فیبرهای متراکم‌تر در لایه‌های بیرونی، مقاومت ساختاری چوب نخل را در برابر نفوذ و ضربه افزایش می‌دهد. وانگ و همکاران [9] در مطالعه‌ای به بررسی پاسخ ضربه‌ای با سرعت متوسط پانل‌های ساندویچی با هسته‌های مختلف پرداختند و تأثیر ماده هسته بر رفتار دینامیکی این پانل‌ها را مورد تحلیل قرار دادند. در این تحقیق، پانل‌ها با صفحات رویی آلومینیومی و پنج نوع هسته شامل چوب بالسا با چگالی پایین و بالا، چوب پنبه، ساختار لانه‌زنبوری پلی‌پروپیلن و فوم پلی‌استایرن ساخته شدند و تحت ضربه با انرژی‌های 43، 85 و 120 ژول مورد آزمایش قرار گرفتند. داده‌ها با استفاده از شتاب‌سنج و دوربین پرسرعت جمع‌آوری شد و تغییر شکل صفحات جلویی و پشتی با تکنیک اسکن سه‌بعدی بررسی شد. نتایج نشان داد که ماده هسته تأثیر قابل توجهی بر نیروی تماس، جذب انرژی، عمق فرورفتگی و تغییر شکل کلی پانل دارد و مکانیزم‌های شکست شامل پارگی صفحات، خرد شدن هسته و جداشدگی بین صفحات و هسته مشاهده شد. علاوه بر آن، مدلسازی المان محدود برای تحلیل بهتر نتایج تجربی و درک اثر ماده هسته به کار گرفته شد. ترکیب رویه فلزی با هسته چوبی موجب افزایش قابل‌توجه مقاومت ضربه‌ای نسبت به هسته‌های فومی می‌شود. تحلیل کمی آن‌ها نشان داد که انرژی جذب‌شده در سازه‌های فلز—چوب تا 1,8 برابر بیشتر از سازه‌های فلز—فوم است، و این اختلاف به‌دلیل رفتار پیشرونده فروریزش هسته‌های چوبی است. افزون بر آن، نتایج کیفی این پژوهش نشان داد که حضور سلول‌های تصادفی شکل و با ابعاد نامنظم باعث تأخیر در ایجاد مسیر شکست و افزایش کارایی انرژی‌گیری می‌شود.

جندلی و همکاران [10] در مطالعه‌ای به بررسی تجربی رفتار ضربه‌ای با سرعت پایین ساختار ساندویچی زیست‌پایه متشکل از پوست‌های کامپوزیتی و هسته چوبی بالسا پرداختند که به‌منظور کاهش وزن، دمپینگ ارتعاشات و قابلیت بازیافت طراحی شده است. آزمایش‌ها با استفاده از فرآیند تزریق رزین یک مرحله‌ای و تست ضربه با وزنه سقوط بر روی پیکربندی‌های مختلف ساندویچ انجام شد تا تأثیر ترتیب لایه‌بندی، چگالی و ضخامت هسته بر رفتار ضربه‌ای ارزیابی شود. همچنین مقایسه‌ای بین دو نوع لایه کامپوزیتی شیشه و فلاکس انجام شد تا کارایی الیاف کتان به عنوان پوست ساندویچ مشخص گردد. مکانیزم‌های آسیب قابل توجه شناسایی و توالی زمانی توسعه آن‌ها پیشنهاد شد و تحلیل اولتراسونیک با استفاده از تصاویر سی-اسکن برای طرف مخالف نمونه‌های ضربه‌خورده به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که ساختار ساندویچی زیست‌پایه قابلیت جذب انرژی بالایی در ضربه با سرعت پایین دارد و مطالعه پارامترهای مختلف مؤثر، درک بهتری از رفتار این ساختارها و انتخاب مواد مناسب برای کاربردهای عملی فراهم می‌آورد. از سوی دیگر، تحقیقات ساختاری سریوارو و همکاران [11] بر روی فشردگی چوب بالسا نشان داد که رفتار الاستوپلاستیک این مواد به‌صورت شدیداً جهت‌دار و منطبق بر ساختار سلولی آن‌ها است. این پژوهش نه‌تنها ویژگی‌های کیفی ساختار سلولی را گزارش می‌کند بلکه داده‌های کمی نشان می‌دهد که تنش تسلیم در راستای الیاف می‌تواند تا 5 برابر جهت شعاعی افزایش یابد. این یافته‌ها اهمیت توجه به جهت‌گیری فیبرها در تحلیل ضربه‌ای را روشن می‌سازد.

بنزایدن و همکاران [12] در مطالعه‌ای، به بررسی رفتار مکانیکی و مورفولوژی چوب دمبرگ خرما پرداختند و نشان دادند که این ماده به‌عنوان یک کامپوزیت طبیعی با ساختار جهت‌دار دارای پتانسیل بالایی برای استفاده در کاربردهای مهندسی سبک وزن و هسته‌های ساندویچی است. چوب دمبرگ خرما به دلیل فراوانی زیاد ضایعات آن در مناطق کشاورزی، به ویژه در کشورهای شمال آفریقا و خاورمیانه، یک منبع تجدیدپذیر و اقتصادی برای تولید مواد کامپوزیتی محسوب می‌شود. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که خواص مکانیکی مواد گیاهی مانند چوب، فیبرهای طبیعی و دمبرگ‌ها به شدت به ترکیب میکروسکوپی، توزیع الیاف و شرایط اقلیمی محل رشد وابسته است. به‌عنوان مثال، پژوهش‌های مختلف بر روی فیبرهای طبیعی مانند بامبو، کنف و جوت گزارش داده‌اند که افزایش نسبت حجم الیاف و تراکم ساختار سلولی موجب بهبود مدول الاستیسیته و مقاومت کششی می‌شود. با این حال، تحقیقات محدود بر روی DPPW انجام شده و اطلاعات جامع در مورد رفتار خستگی و تغییرات خواص مکانیکی در مناطق مختلف جغرافیایی هنوز ناقص است. جانتاوی و همکاران [13] در مطالعه‌ای نوع جدیدی از پانل‌های ساندویچی سازه‌ای با هسته چوب روغن‌خرما لایه‌لایه شده و روکش‌های تخته چندلایه یا OSB مبتنی بر چوب رابر معرفی کردند که برای دیوارهای کم‌مصرف انرژی طراحی شده‌اند. آن‌ها نشان دادند که پیکربندی هسته، چگالی و نوع روکش تأثیر قابل توجهی بر پایداری ابعادی، مقاومت فشاری و هدایت حرارتی پانل‌ها دارد و پانل‌های دارای هسته متقاطع و روکش تخته چندلایه عملکرد مکانیکی و حرارتی بهتری از خود نشان می‌دهند. این پانل‌ها با هدایت حرارتی حدود یک‌سوم دیوارهای بتنی و آجری، عایق حرارتی مناسبی برای فضاهای داخلی فراهم می‌کنند و استفاده از چوب روغن‌خرما و رابر به‌عنوان منابع محلی، علاوه بر صرفه‌جویی انرژی، مزیت اقتصادی و پایداری محیطی دارد. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که چنین پانل‌هایی قابلیت توسعه صنعتی و کاربرد در ساختمان‌های کم‌مصرف انرژی در کشورهای گرمسیری را دارند و می‌توانند جایگزین کارآمد مصالح سنتی باشند.

ژی و همکاران [14] در مطالعه‌ای به بررسی تشخیص و شناسایی آسیب ناشی از ضربه با سرعت پایین در پانل‌های ساندویچی با هسته چوب پالاوونیا پرداختند و استفاده از ترموگرافی مادون قرمز (IRT) را به عنوان یک روش غیرمخرب برای تحلیل انواع آسیب‌ها معرفی کردند. در این تحقیق، نمونه‌ها تحت ضربه توسط یک سر نیم‌کره به قطر 16 میلی‌متر و با انرژی‌های 22 تا 77 ژول قرار گرفتند و تصاویر حرارتی به‌دست‌آمده، امکان شناسایی آسیب‌های ماتریسی، لایه‌لایه شدن و شکست الیاف را از طریق الگوهای حرارتی مشخص فراهم کرد. نتایج نشان داد که IRT می‌تواند علاوه بر تشخیص آسیب‌های سطحی، نقص‌ها و آسیب‌های زیرسطحی را نیز به‌طور مؤثر شناسایی کند. این مطالعه همچنین به

بررسی تأثیر پارامترهای مختلف مانند سطح انرژی ضربه، ضخامت الیاف و ترتیب لایه‌بندی بر نوع و شدت آسیب پرداخت، که این موضوع اهمیت طراحی بهینه پانل‌های ساندویچی با مقاومت بالا در برابر ضربه را برجسته می‌کند. یافته‌های این تحقیق با مطالعات پیشین در زمینه تحلیل آسیب پانل‌های کامپوزیتی هم‌راستا بوده و نقطه عطفی در استفاده از روش‌های غیرمخرب برای ارزیابی کیفیت و دوام سازه‌های سبک وزن ارائه می‌دهد.

لی و همکاران [15] در مطالعه‌ای به بررسی رفتار ضربه‌ای و مکانیزم شکست چوب نوار بامبو موازی (PBSL) تحت ضربه نفوذی با وزن سقوط پرداختند و تأثیر ارتفاع نمونه و جهت‌گیری الیاف بر مقاومت، تغییر شکل و جذب انرژی را مورد تحلیل قرار دادند. نتایج نشان داد که PBSL در انرژی ضربه پایین رفتار نفوذ-بازگشت و در انرژی بالا رفتار نفوذ-شکست از خود نشان می‌دهد. همچنین مکانیزم شکست به شدت به جهت‌گیری الیاف وابسته است؛ نمونه‌های موازی با الیاف دچار جداشدگی‌های ستونی و نمونه‌های عمود بر الیاف دچار پارگی مثلثی وارونه می‌شوند. این مطالعه با استفاده از تصاویر میکروسکوپی تفاوت‌های شکست را روشن کرده و بینش مهمی برای طراحی بهینه PBSL مقاوم در برابر ضربه ارائه می‌دهد. پاندرایاج و همکاران [16] در مطالعه‌ای به بررسی پاسخ ضربه‌ای با سرعت پایین پانل‌های ساندویچی با هسته کروی ساخته شده از پلاستیک تقویت‌شده با الیاف شیشه پرداختند. در این تحقیق، چهار نوع آرایش هسته شامل Regular، Interlock، Inverted و Stagger با روش دست‌ساز ساخته شد و رفتار ضربه‌ای نمونه‌ها در سرعت‌های 3، 5 و 7 متر بر ثانیه مورد ارزیابی قرار گرفت. پارامترهایی مانند بیشینه نیروی تماس، ظرفیت جذب انرژی، ضریب بازگشت و الگوهای آسیب بررسی شدند. نتایج نشان داد که مدل Regular بیشترین ظرفیت جذب انرژی و مدل Interlock مقاومت بالایی در برابر آسیب از خود نشان می‌دهد. الگوهای شکست شامل ترک ماتریس و شکست الیاف در سرعت پایین و خرد شدن هسته در سرعت‌های بالاتر مشاهده شد. این مطالعه اهمیت طراحی هندسی هسته و انتخاب ساختار مناسب برای بهینه‌سازی جذب انرژی و مقاومت به ضربه در پانل‌های ساندویچی را برجسته می‌کند.

با وجود مطالعات متعدد بر روی مواد زیست‌پایه مانند بامبو، نخل روغنی، بالسا و چوب‌های متخلخل، بررسی رفتار ضربه‌ای پانل‌های ساندویچی با هسته‌ی چوب درخت خرما هنوز بسیار محدود است و هیچ پژوهشی تاکنون ارتباط میان ناهمگنی دانسیته‌ی طبیعی چوب خرما و مکانیزم‌های جذب انرژی تحت بارگذاری نفوذی سرعت پایین را به‌صورت کمی بررسی نکرده است. از این‌رو، هدف این تحقیق تحلیل دقیق پاسخ ضربه‌ای چنین ساختاری در سه سطح انرژی و دو ضخامت مختلف هسته است تا تأثیر ویژگی‌های ذاتی چوب خرما بر الگوی شکست، نیروی اوج و انرژی جذب‌شده مشخص شود. نوآوری اصلی این پژوهش ارائه‌ی یک ارزیابی جامع تجربی از پانل‌های آلومینیومی–چوب خرما و نشان دادن رفتار گرادیانی جذب انرژی ناشی از ساختار متخلخل و ناهمگن این هسته‌ی طبیعی است؛ رفتاری که می‌تواند مبنایی برای طراحی هسته‌های زیستی مهندسی‌شده و توسعه‌ی سازه‌های سبک‌وزن با عملکرد بالا باشد.

مواد و روش‌ها

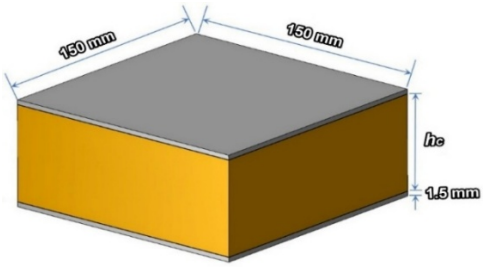
مواد

در این پژوهش برای ساخت نمونه‌ها از چوب درخت خرما به‌عنوان هسته‌ی زیست‌پایه و ورق‌های آلومینیومی به‌عنوان رویه‌های مقاوم استفاده شد. چوب خرما پس از برش از بخش میانی تنه، خشک و هم‌دما در آزمایشگاه نگهداری شد تا رطوبت آن به حدود 12٪ برسد. ویژگی‌های فیزیکی چوب شامل چگالی تقریبی 550 کیلوگرم بر مترمکعب و تخلخل طبیعی بالا بود. رویه‌های آلومینیومی از نوع آلیاژ Al 3003 با ضخامت 1,5 میلی‌متر انتخاب گردیدند که به‌دلیل مقاومت مناسب در برابر ضربه و قابلیت چسبندگی بالا با چسب اپوکسی، گزینه‌ای مناسب برای این نوع ساختار محسوب می‌شوند. برای اتصال لایه‌ها، از چسب اپوکسی دو جزئی با مقاومت برشی بالا (در دمای اتاق) استفاده شد، در شکل 1 نمونه پانل‌های ساندویچی و نمونه چوب درخت خرما نشان داده شده است.

آماده‌سازی نمونه‌ها

تعداد 18 نوع نمونه برای آزمون نفوذ ضربه‌ای سرعت پایین ساخته شد. ابعاد تمام نمونه‌ها به‌صورت مربع ساخته شده و در شکل 2 به صورت شماتیک نشان داده شده است. همچنین در جدول 1 ارتفاع هسته برای هر یک از نمونه‌ها و چگونگی کدگذاری اسم نمونه ها نشان داده شده است. لایه‌های آلومینیومی با استفاده از فشار یکنواخت و به‌صورت سرد بر سطح چوب با رزین چسبانده شدند و پس از عمل‌آوری به مدت 24 ساعت در دمای محیط، آماده‌ی آزمون گردیدند.

شکل 1. نمایی از پانل ساندویچی و هسته چوب درخت خرما



شکل 2. ابعاد نمونه پانل ساندویچی و پارامترهای طراحی

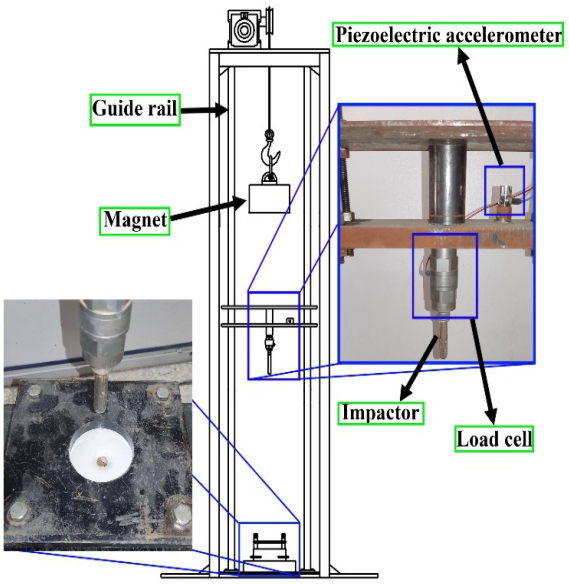
جدول 1. اسامی نمونه ها و پارامترهای آزمون ضربه و ابعاد پانل ساندویچی

نام نمونه ها	تعداد تکرار آزمون	ارتفاع هسته h_c(mm)	انرژی ضربه (J)	سرعت لحظه برخورد (m/s)	وزن ضربه زننده (kg)	ارتفاع سقوط وزنه (m)	ضخامت صفحات رویه (mm)
SWD20.50	3	20	50	3.16	10	0.5	1.5
SWD40.50	3	40	50	3.16	10	0.5	1.5
SWD20.100	3	20	100	4.47	10	1	1.5
SWD40.100	3	40	100	4.47	10	1	1.5
SWD20.150	3	20	150	5.47	10	1.5	1.5
SWD40.150	3	40	150	5.47	10	1.5	1.5

تجهیزات و شرایط آزمون

آزمون نفوذ ضربه‌ای با استفاده از دستگاه ضربه‌زن سقوطی انجام شد. انرژی ضربه در سه سطح 50، 100 و 150 ژول توسط سقوط آزاد ضربه زننده با جرم 10 کیلوگرم و ارتفاع سقوط متفاوت (با توجه به میزان انرژی ضربه) تامین می‌گردد. ضربه‌زن از نوع کروی با قطر 12 میلی‌متر انتخاب گردید. همچنین در جدول 1 مشخصات آزمون ضربه برای هر نمونه نشان داده شده است.

در حین آزمون، نیروی تماس توسط سنسور نیرو سنج پیزوالکتریک و میزان جابجایی با دوبار انتگرال از نتایج سنسور شتاب با نرخ نمونه‌برداری 20 کیلوهرتز بدست می‌آید. تمام نمونه‌ها در شرایط مشابه دمای محیط مورد آزمایش قرار گرفتند. نمایی از دستگاه سقوط وزنه در شکل 3 نشان داده شده است. برای دقت در نتایج آزمون هر نمونه سه مرتبه تحت بارگذاری ضربه سرعت پایین قرار می‌گیرد.



شکل 3. نمایی از دستگاه آزمون ضربه سرعت پایین نمونه تحت آزمون

شاخص‌های تحلیلی

داده‌های ثبت‌شده شامل نمودار نیرو–جابجایی و منحنی انرژی جذب‌شده برای هر نمونه بود. انرژی جذب‌شده E از انتگرال‌گیری سطح زیر منحنی نیرو–جابجایی طبق رابطه 1 قابل محاسبه می‌باشد.

$$E = \int_0^{\delta_{max}} F(\delta)\, d\delta \qquad (1)$$

که در آن F نیروی تماس و δ_{max} بیشینه جابجایی در لحظه‌ی اوج تماس است. همچنین نیروی بیشینه اولیه که نشان دهنده حداکثر نیرو در سطح نمودار نیرو-جابه جایی می‌باشد، نشان می‌دهد شروع فروریزش و تخریب پانل در چه نیرویی اتفاق می‌افتد و در واقع حد استانه تحمل پانل تحت بارگذاری ضربه سرعت پایین می‌باشد. مقایسه نمونه‌ها با دو شاخص میزان انرژی جذب شده و نیروی بیشینه طراحی بهینه در کاربرد پانل ساندویچی تحت بارگذاری ضربه نفوذی سرعت پایین را نشان می‌دهد. جدول 2 نتایج دو شاخص جذب انرژی و نیروی بیشینه برای تمامی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

جدول 2. نتایج جذب انرژی و نیروی بیشینه نمونه‌ها بعد از آزمون ضربه

	Energy Absorption (J)	Peak Force (kN)
SWD40.50	36.58±0.5	2.29±0.13
SWD40.100	101.69±1.2	4.47±0.3
SWD40.150	108.02±1	6.21±0.2
SWD20.50	44.39±0.9	2.32±0.09
SWD20.100	82.07±0.8	4.55±0.07
SWD20.150	102.27±1.1	6.41±0.21

نتایج و بحث

تحلیل مکانیزم شکست و مسیر انتقال انرژی در نفوذ کامل

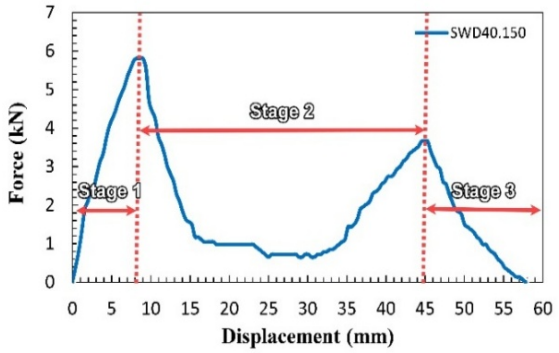
مسیر انتقال انرژی از لحظه‌ی تماس تا نفوذ کامل را مطابق نمودار نیرو- جابه جایی شکل 4 می‌توان به سه مرحله تقسیم کرد. در مرحله‌ی اول، انرژی برخورد به‌صورت متمرکز از نوک ضربه‌زن به رویه منتقل شده و باعث تغییرشکل پلاستیک موضعی می‌شود. در مرحله‌ی دوم، این انرژی به هسته انتقال می‌یابد و در آنجا از طریق فروریزش سلولی و اصطکاک داخلی تلف می‌شود. در مرحله‌ی سوم، انرژی باقیمانده برای شکست صفحه پشت پانل و خروج پلاگ مصرف می‌گردد. این سه‌مرحله‌ی پیوسته در تمامی سازه‌های دارای هسته‌ی متخلخل گزارش شده است و تحلیل انرژی تفکیک‌شده (partitioned energy analysis) روشی مؤثر برای مدل‌سازی آن به‌شمار می‌آید. مشاهدات سطح شکست و تصاویر مقطع پشتی نمونه‌ها نشان می‌دهد که در هر سه سطح انرژی، مکانیزم شکست شامل سه فاز اصلی است؛ فاز اول تغییرشکل پلاستیک رویه‌ی آلومینیومی تحت تنش خمشی و برشی موضعی است. در ادامه فاز دوم فروریزش و تراکم تدریجی در هسته چوب خرما و در نهایت فاز سوم، شکست نهایی در ناحیه‌ی پشت بوده که پرتاب پلاگ را به دنبال دارد. در این میان، نقش ساختار ناهمگن چوب خرما بسیار تعیین‌کننده است.

به‌دلیل توزیع غیریکنواخت دانسیته در راستای ضخامت، بخش‌های با چگالی پایین زودتر فشرده شده و انرژی بیشتری را جذب می‌کنند، در حالی‌که بخش‌های متراکم‌تر در لایه‌های میانی به‌عنوان سد نفوذ عمل می‌کنند. این رفتار چندمرحله‌ای در جذب انرژی، منحصر به چوب خرما است و می‌تواند در طراحی هسته‌های گرادیان‌دار آینده مورد استفاده قرار گیرد. رفتار مشابهی در هسته‌های طبیعی مانند بامبو و چوب نخل روغنی نیز مشاهده شده است [11], [17].

نتایج نشان داد هسته چوب درخت خرما به‌دلیل ناهمگنی ذاتی ساختار خود مطابق شکل 5، رفتار گرادیان‌گونه‌ای در جذب انرژی دارد که موجب افزایش پایداری ساختار در مقایسه با هسته‌های فوم یکنواخت می‌شود. بر این اساس می‌توان از چوب خرما با کنترل دانسیته یا تراکم لایه‌ای در عمق، به‌عنوان یک هسته‌ی طبیعی از ضایعات درخت خرما در هسته پانل ساندویچی استفاده کرد. چنین دیدگاهی با روندهای نوین طراحی مواد با الهام از طبیعت (bio-inspired cores) که در مطالعات اخیر مطرح شده‌اند هم‌راستا است.

مقاومت ضربه‌ای نمونه‌ها در سطوح انرژی مختلف

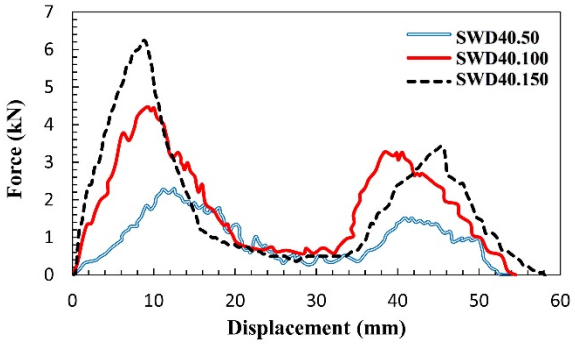
همانطور که در نمودارهای نیرو- جابه جایی شکل 6 و 7 مشاهده می‌گردد، با افزایش انرژی ضربه از 50 به 150 ژول، رفتار کلی همه‌ی نمونه‌ها با ضخامت هسته 20 و 40 میلیمتر نشان‌دهنده‌ی افزایش جذب انرژی و نیروی بیشینه است. شکل تخریب نمونه ها تحت نفوذ ضربه‌ای نشان داد که در هر سه سطح انرژی اعمال‌شده (50، 100 و 150 ژول) نمونه‌ها دچار نفوذ کامل از پشت شدند، که نشان‌دهنده‌ی عبور انرژی برخورد از آستانه‌ی نفوذ سازه بوده و این رفتار کمک می‌کند میزان انرژی جذب شده از کل انرژی اعمالی دقیقتر مورد بررسی قرار گیرد. این یافته تأیید می‌کند که انرژی‌های انتخاب‌شده در این پژوهش در ناحیه‌ی تخریب کامل سازه قرار دارند و رفتار نمونه‌ها باید بر اساس مکانیزم‌های نفوذ و شکست مورد ارزیابی قرار گیرد.



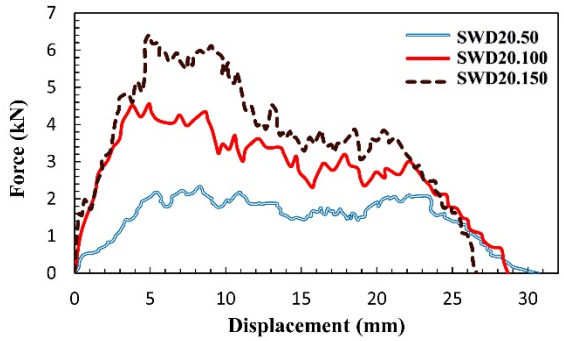
شکل4. سه فاز تخریب و فروریزش در نمودار نیرو-جابه جایی برای پانل ساندویچی تحت بارگذاری ضربه سرعت پایین

شکل 5. نمایی از الوار چوب درخت خرما و تغییر در دانسیته چوب

بر اساس منحنی‌های نیرو–جابجایی، می‌توان سه ناحیه‌ی رفتاری متمایز را شناسایی کرد: ناحیه‌ی افزایش سریع نیرو تا رسیدن به اوج تماس، ناحیه‌ی افت نیرو که بیانگر شروع فروریزش و فشردگی هسته است، و در نهایت ناحیه‌ی نفوذ که در آن نیرو به‌سرعت کاهش یافته و به صفر می‌رسد. کاهش ناگهانی نیرو پس از اوج نشان‌دهنده‌ی آغاز شکست موضعی و خروج پلاگ است. چنین الگویی پیش‌تر در آزمون‌های نفوذ سرعت پایین روی پنل‌های با رویه‌ی فلزی گزارش شده و به‌عنوان مشخصه‌ی اصلی مرحله‌ی «face-sheet punching» شناخته می‌شود [18].



شکل 6. نمودار نیرو-جابه جایی برای نمونه ها با ضخامت هسته 40 میلیمتر و انرژی ضربه متفاوت



شکل 7. نمودار نیرو-جابه جایی برای نمونه ها با ضخامت هسته 20 میلیمتر و انرژی ضربه متفاوت

همان‌طور که در نمودارهای میله‌ای شکل 8 مشاهده می‌شود، با افزایش انرژی ضربه، نیروی بیشینه تماس و انرژی جذب‌شده افزایش می‌یابند، اما این افزایش به‌صورت غیرخطی است؛ زیرا بخشی از انرژی اضافی صرف ایجاد سطوح شکست جدید و جدایش پلاگ در سطح پشتی و نه صرفاً تغییر شکل پلاستیک در هسته یا رویه‌های می‌شود. چنین روندی در مطالعات مشابه بر روی پانل‌های ساندویچی با رویه‌های فلزی نیز گزارش شده است [12].

در ضربه با انرژی 50 ژول، تغییر شکل موضعی در مرکز برخورد با فرورفتگی قابل‌توجه در رویه‌ی آلومینیومی مشاهده گردید، که در ادامه منجر به فروریزش محلی در هسته‌ی چوب خرما و آغاز نفوذ از رویه پشتی گردید. در این سطح انرژی، انرژی جذب‌شده در حدود 36,5 تا 45,4 ژول و نیروی اوج بین 2,2 تا 2,3 kN ثبت گردید، که بیانگر عملکرد پایدار ماده در برابر بارگذاری ضربه‌ای خفیف است. در انرژی 100 ژول، این پدیده با گسترش ترک‌های شعاعی در چوب و جدا شدن پلاگ پشت نمونه همراه گردید؛ هسته در این سطح انرژی به‌صورت کامل فشرده شد و سلول‌های چوبی ساختار متخلخل خود را از دست دادند. در انرژی 100 ژول، افزایش قابل‌توجهی در انرژی جذب‌شده مشاهده گدید، به‌طوری‌که مقادیر جذب برای نمونه‌های دارای هسته‌ی 40 میلی‌متر تا حدود سه برابر افزایش یافت. نتایج نشان داد که انرژی ضربه‌ی 100 ژول برای هر دو نوع نمونه در محدوده‌ی گذار از رفتار الاستوپلاستیک به شکست نیمه‌پایدار است، به‌گونه‌ای که کرنش موضعی در مرکز تماس افزایش یافته و اثرات خمشی در رویه‌ها آشکارتر می‌شود. این یافته با نتایج مطالعات مشابه در زمینه‌ی ساندویچ‌پنل‌های زیست‌پایه مطابقت دارد که در آن‌ها نیز افزایش انرژی ضربه موجب فعال‌شدن هم‌زمان مکانیزم‌های خمش رویه و فشردگی هسته گزارش شده است [19].

در انرژی 150 ژول، مکانیزم تخریب ترکیبی از پارگی صفحه رویه، فشردگی کامل و شکست هسته، و پارگی به همراه جدایش پلاگ از صفحه پشتی بود که در شکل 9-الف دیده میشود. این رفتار مشابه نتایج گزارش‌شده در مورد ساندویچ‌پنل‌های با هسته‌های متخلخل طبیعی است که در آن‌ها، افزایش انرژی ضربه منجر به گذار از مرحله‌ی جذب انرژی پلاستیک به شکست انفجاری و نفوذ کامل می‌شود. به‌طور کلی، افزایش انرژی برخورد موجب افزایش کل انرژی جذب‌شده شد، اما راندمان جذب انرژی کاهش یافت، زیرا سهم انرژی‌های اتلافی غیرقابل‌بازگشت (شکست، نفوذ و پرتاب قطعات) نسبت به انرژی کرش پلاستیک افزایش یافت. این رفتار با مدل‌های کلاسیک جذب انرژی در فوم‌ها و هسته‌های طبیعی که توسط جانتاوی [13] ارائه شده‌اند مطابقت دارد و نشان می‌دهد که با رسیدن به حد بحرانی،

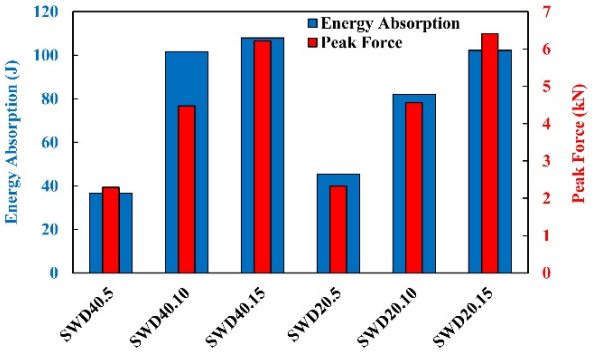
سازه از حالت جذب‌کننده‌ی انرژی به حالت نفوذپذیر تغییر مکانیزم می‌دهد. به عبارت دیگر مانده انرژی ضربه جذب نشده بیشتر می‌گردد. منحنی نیرو–جابجایی در این سطح انرژی دارای نیروی اوج بالاتر (6,2 تا 6,4 kN) و افت سریع نیرو پس از نقطه‌ی ماکزیمم بود که نشانگر آغاز شکست موضعی در چسب و نفوذ جزئی به درون هسته است. سطح نمونه‌ها پس از آزمون دارای الگوی شکست شعاعی در اطراف محل تماس و چین‌خوردگی‌های موضعی در رویه‌ی آلومینیومی بود. این پدیده معمولاً زمانی رخ می‌دهد که انرژی ورودی از ظرفیت پانل فراتر می‌رود و رویه‌ها از هسته نیز جدا می‌شوند.

با مقایسه‌ی روند تغییرات نیرو–جابجایی در شکل‌های 6 و 7، مشاهده می‌شود که افزایش انرژی ضربه منجر به افزایش نیروی اوج و افزایش جابجایی نهایی تا لحظه‌ی نفوذ کامل می‌شود. به‌طور مشخص، در ضخامت 40 میلی‌متر، نیروی اوج از 2.29 kN در انرژی 50 ژول به 6.21 kN در انرژی 150 ژول افزایش یافته که معادل رشد 171٪ است. این افزایش نشان می‌دهد که با افزایش انرژی برخورد، سهم بیشتری از انرژی به رویه منتقل شده و هسته درگیر مکانیزم‌های فشردگی و شکست می‌شود. همچنین تغییر شیب اولیه منحنی‌ها در انرژی‌های بالاتر بیانگر سخت‌شوندگی اولیه‌ی بیشتر و مشارکت هم‌زمان خمش رویه و فشردگی هسته است. از نظر جابجایی نیز افزایش تغییر شکل تا نفوذ کامل تأیید می‌کند که ساختار تا لحظه‌ی شکست نهایی قادر است بخش قابل‌توجهی از انرژی اعمالی را به تغییر شکل پلاستیک تبدیل کند.

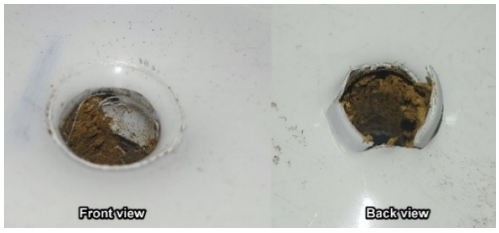
تأثیر ضخامت هسته بر مقاومت در برابر ضربه

بررسی اثر ضخامت هسته نشان داد، گرچه در هر دو ضخامت 20 و 40 میلی‌متر نفوذ کامل رخ داد، اما مسیر و الگوی آسیب کاملاً متفاوت بود. در نمونه‌های با هسته‌ی 20 میلی‌متر، تخریب به‌صورت موضعی و سریع رخ داد و فروریزش هسته محدود به ناحیه‌ای نزدیک محل تماس بود. در مقابل، در نمونه‌های با هسته‌ی 40 میلی‌متر، آسیب در عمق بیشتری توزیع شد و جذب انرژی از طریق فشردگی تدریجی سلول‌های چوبی در طول ضخامت اتفاق افتاد. این تفاوت بیانگر نقش کلیدی ضخامت هسته در کنترل نرخ انتقال تنش و توزیع انرژی درون هسته است [20].

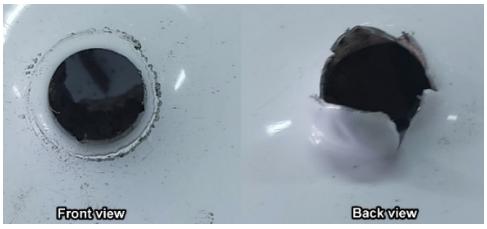
نمودارهای نیرو-جابه‌جایی شکل 10 نشان می‌دهد که ضخامت هسته نه‌تنها ظرفیت جذب انرژی را افزایش می‌دهد، بلکه زمان بروز شکست و نیروی اوج را نیز تغییر می‌دهد.



شکل 8. نمودار میله‌ای مقایسه میزان جذب انرژی و نیروی بیشینه نمونه ها تحت بارگذاری ضربه سرعت پایین



الف)



ب)

شکل 9. نمایی از سطح جلو و پشت نمونه الف)SWD40.50،

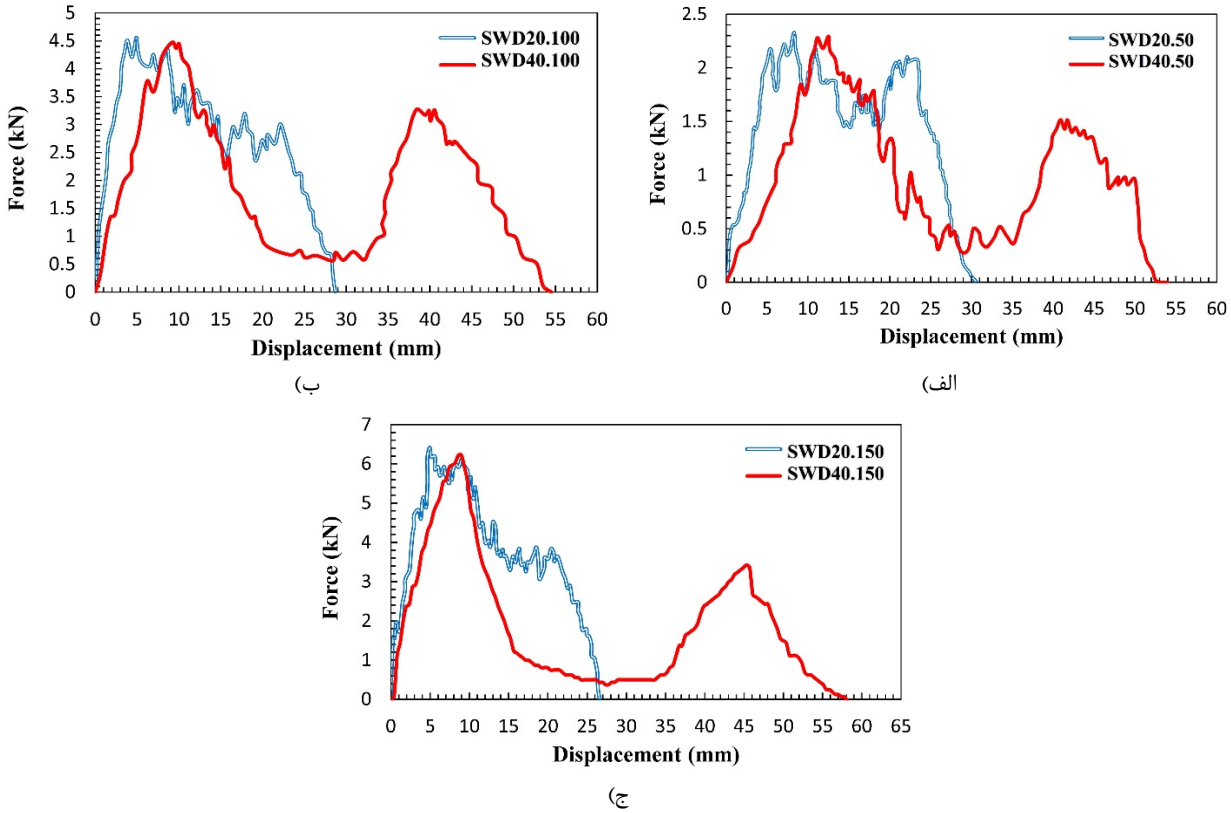
ب) SWD20.150، بعد از آزمون ضربه سرعت پایین

نمونه‌های 40 میلی‌متر به دلیل حجم بیشتر ماده متخلخل، دیرتر وارد مرحله‌ی فروپاشی شده و توزیع تنش یکپارچه‌تری در طول ضخامت ایجاد می‌کنند؛ به‌طوری‌که اختلاف انرژی جذب‌شده بین نمونه‌های 40 و 20 میلی‌متر در انرژی 100 ژول حدود 24٪ است (101,69 در برابر 82,07 ژول). این اختلاف در انرژی 150 ژول نیز حفظ شده و نشان می‌دهد که حتی در حالت نفوذ کامل نیز سهم قابل‌توجهی از انرژی ورودی صرف فشردگی لایه‌های میانی چوب خرما می‌شود. در مقابل، هسته‌های 20 میلی‌متر رفتار بیشتری مشابه ساختارهای فوم یکنواخت داشته و تخریب آن‌ها غالباً موضعی و سریع‌تر است. این موضوع اهمیت هندسه‌ی هسته را در طراحی سازه‌های سبک‌وزن مبتنی بر چوب نشان می‌دهد.

افزایش ضخامت هسته باعث افزایش فاصله‌ی بین رویه‌ها و به تبع آن افزایش ممان اینرسی خمشی کل ساختار می‌شود که مقاومت در برابر نفوذ را بالا می‌برد. با این حال، در سطوح انرژی بالا، حتی ضخامت 40 میلی‌متر نیز نتوانست از نفوذ کامل جلوگیری کند. این موضوع حاکی از آن است که مقاومت ضربه‌ای سازه تنها تابع ضخامت هسته نیست بلکه به چسبندگی بین لایه‌ها و چگالی موضعی چوب نیز وابسته است. در نمونه‌های با ضخامت بیشتر، انرژی بیشتری صرف فروریزش هسته شد. چنین رفتار چندمرحله‌ای در فشردگی هسته‌های چوبی پیش‌تر در پژوهش‌های مربوط به مواد زیست‌پایه نیز گزارش شده است [21].

افزایش ضخامت هسته موجب انتقال بخشی از انرژی از مکانیزم پانچ رویه به مکانیزم فروریزش هسته می‌شود. در واقع، در هسته‌های ضخیم‌تر بخش قابل توجهی از انرژی ورودی با فروریزش هسته تلف می‌شود، در حالی‌که در هسته‌های نازک‌تر انرژی عمدتاً صرف شکست سریع رویه و جدایش پلاگ می‌شود. این پدیده با مدل‌های تحلیلی گزارش‌شده برای ساختارهای ساندویچی که در آن‌ها افزایش ضخامت، جذب انرژی مؤثر را در محدوده‌ای خاص بهینه می‌کند توسط سایر پژوهشگران تایید شده است. در تصاویر پس‌آزمون در شکل 9 الف و ب، نمونه‌های با هسته‌ی 20 میلی‌متر دارای لبه‌های پشتی تیز و بریدگی‌های مشخص در محل خروج پلاگ هستند، در حالی‌که نمونه‌های با هسته‌ی 40 میلی‌متر دارای حفره‌های پهن‌تر با الگوی فشردگی سلولی اطراف محل نفوذ می‌باشند. این تفاوت در شکل سطح تخریب‌شده نشان می‌دهد که افزایش ضخامت علاوه بر افزایش انرژی شکست، موجب توزیع تدریجی‌تر تنش در زمان و کاهش نیروی اوج تماس نیز می‌شود [11].

مقایسه‌ی نمونه‌های با هسته‌ی 20 و 40 میلی‌متر نشان می‌دهد که ضخامت هسته نقش کلیدی در تعیین مکانیزم جذب انرژی و مقاومت نهایی در برابر نفوذ دارد. نمونه‌های دارای هسته‌ی ضخیم‌تر (40 mm) در سطوح انرژی پایین‌تر رفتار نرم‌تر اما پایدارتری نشان دادند و با افزایش انرژی تا 10 ژول ظرفیت جذب انرژی آن‌ها به‌صورت چشمگیری افزایش یافت (از 36,5 به 101,7 ژول). در مقابل، نمونه‌های با هسته‌ی 20 mm در انرژی‌های پایین‌تر جذب انرژی بالاتری داشتند اما با افزایش انرژی، کارایی آن‌ها کاهش نسبی یافت. این تفاوت را می‌توان به تغییر حالت غالب تنش نسبت داد: در نمونه‌های ضخیم‌تر، ناحیه‌ی تماس بار به حجم بزرگ‌تری از هسته منتقل می‌شود و فروریزش تدریجی در عمق رخ می‌دهد، در حالی‌که در نمونه‌های نازک‌تر، پاسخ ماده بیشتر موضعی و متمرکز بر لایه‌ی رویه است [20].



شکل 10. مقایسه نمودار نیرو-جابه جایی برای نمونه ها با ضخامت هسته متفاوت تحت انرژی ضربه الف) 50 ژول، ب) 100 ژول، ج) 150 ژول

نتیجه گیری

در این پژوهش رفتار ضربه‌ای پانل‌های ساندویچی با هسته‌ی چوب خرما تحت بارگذاری نفوذی سرعت پایین بررسی شد و نتایج نشان داد که چوب خرما به‌عنوان یک هسته‌ی زیست‌پایه، دارای ظرفیت جذب انرژی قابل‌توجه و رفتار شکست چندمرحله‌ای است. افزایش انرژی ضربه منجر به افزایش نیروی اوج و انرژی جذب‌شده شد، اما راندمان جذب انرژی به دلیل افزایش سهم شکست‌های ترد و جدایش پلاگ کاهش یافت. ضخامت هسته نقش تعیین‌کننده‌ای در مکانیزم‌های جذب انرژی داشت؛ نمونه‌های 40 میلی‌متری در هر سه سطح انرژی عملکرد پایدارتر و جذب انرژی بیشتری از خود نشان دادند و فشردگی تدریجی سلول‌های چوب در عمق هسته باعث توزیع یکنواخت‌تر تنش شد. این رفتار نتیجه‌ی ناهمگنی ذاتی چوب خرما و وجود مناطق با دانسیته متفاوت است که امکان جذب انرژی مرحله‌ای و تأخیر در شکست را فراهم می‌سازد. تحلیل رفتار شکست نشان می‌دهد که افزایش ضخامت هسته نه‌تنها مقاومت کلی در برابر نفوذ را افزایش می‌دهد، بلکه با به‌تعویق‌انداختن آغاز شکست چسب و کاهش نیروی اوج، موجب بهبود مقاومت ضربه‌ای سازه می‌گردد. بنابراین، انتخاب ضخامت هسته باید بر اساس توازن بین وزن، جذب انرژی و نیروی اوج انجام گیرد تا طراحی بهینه برای کاربردهای واقعی (نظیر قطعات خودرو یا سازه‌های محافظ زیست‌پایه) حاصل شود. نوآوری اصلی این مطالعه ارائه‌ی ارزیابی جامع از پانل‌های آلومینیومی–چوب خرما و نشان دادن قابلیت این ماده در ایجاد هسته‌های گرادیانی طبیعی بدون نیاز به فرآیندهای مهندسی پیچیده است. این یافته‌ها می‌تواند مبنای توسعه‌ی سازه‌های سبک‌وزن مبتنی بر مواد زیستی و الهام‌بخش طراحی هسته‌های چندلایه برای کاربردهای محافظتی در صنایع حمل‌ونقل، خودرو و تجهیزات ضربه‌پذیر باشد. برای

تحقیقات آینده، پیشنهاد می‌شود تأثیر تغییر رطوبت، جهت‌گیری الیاف، و ترکیب چسب‌های مختلف بر مقاومت ضربه‌ای و پایداری بلندمدت این سازه‌ها بررسی شود.

مراجع:

[1] A. Dogan and V. Arikan, “Low-velocity impact response of E-glass reinforced thermoset and thermoplastic based sandwich composites,” *Compos B Eng*, vol. 127, pp. 63–69, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.compositesb.2017.06.027.

[2] H. Wang, K. R. Ramakrishnan, and K. Shankar, “Experimental study of the medium velocity impact response of sandwich panels with different cores,” *Mater Des*, vol. 99, pp. 68–82, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2016.03.048.

[3] T. Boonkong, Y. O. Shen, Z. W. Guan, and W. J. Cantwell, “The low velocity impact response of curvilinear-core sandwich structures,” *Int J Impact Eng*, vol. 93, pp. 28–38, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2016.01.012.

[4] O. Ozdemir, N. Oztoprak, and H. Kandas, “Single and repeated impact behaviors of bio-sandwich structures consisting of thermoplastic face sheets and different balsa core thicknesses,” *Compos B Eng*, vol. 149, pp. 49–57, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.05.016.

[5] B. Castanié *et al.*, “Wood and plywood as eco-materials for sustainable mobility: A review,” *Compos Struct*, vol. 329, p. 117790, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.compstruct.2023.117790.

[6] J. M. Silva, T. C. Devezas, A. Silva, L. Gil, C. Nunes, and N. Franco, “Exploring the Use of Cork Based Composites for Aerospace Applications,” *Materials Science Forum*, vol. 636–637, pp. 260–265, Jan. 2010, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.636-637.260.

[7] O. Anjos, H. Pereira, and M. E. Rosa, “Effect of quality, porosity and density on the compression properties of cork,” *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol. 66, no. 4, pp. 295–301, Aug. 2008, doi: 10.1007/s00107-008-0248-2.

[8] M. E. Rosa and M. A. Fortes, “Deformation and fracture of cork in tension,” *J Mater Sci*, vol. 26, no. 2, pp. 341–348, 1991, doi: 10.1007/BF00576525.

[9] H. Wang, K. R. Ramakrishnan, and K. Shankar, “Experimental study of the medium velocity impact response of sandwich panels with different cores,” *Mater Des*, vol. 99, pp. 68–82, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2016.03.048.

[10] Z. Jendli, M. Haggui, A. Monti, A. El Mahi, and L. Guillaumat, “Experimental analysis of low-velocity impact behaviour on flax-balsa biobased sandwich,” *Composites Part C: Open Access*, vol. 14, p. 100489, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.jcomc.2024.100489.

[11] S. Srivaro, N. Matan, and F. Lam, “Stiffness and strength of oil palm wood core sandwich panel under center point bending,” *Mater Des*, vol. 84, pp. 154–162, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.06.097.

[12] R. Benzidane, Z. Sereir, M. L. Bennegadi, P. Doumalin, and C. Poilâne, “Morphology, static and fatigue behavior of a natural UD composite: The date palm petiole ‘wood,’” *Compos Struct*, vol. 203, pp. 110–123, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.compstruct.2018.06.122.

[13] S. Jantawee *et al.*, “Developing structural sandwich panels for energy-efficient wall applications using laminated oil palm wood and rubberwood-based plywood/oriented strand board,” *Journal of Wood Science*, vol. 69, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.1186/s10086-023-02109-x.

[14] H. Xie, H. Fang, X. Li, L. Wan, P. Wu, and Y. Yu, “Low-velocity impact damage detection and characterization in composite sandwich panels using infrared thermography,” *Compos Struct*, vol. 269, p. 114008, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.114008.

[15] X. Li *et al.*, “Experimental study on the deformation and failure mechanism of parallel bamboo Strand Lumber under drop-weight penetration impact,” *Constr Build Mater*, vol. 242, p. 118135, May 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118135.

[16] V. Pandyaraj and A. Rajadurai, “Experimental investigation on low-velocity impact response of spherical core sandwich structure,” *J Compos Mater*, vol. 57, no. 3, pp. 425–442, Feb. 2023, doi: 10.1177/00219983221146265.

[17] Y. Liu, F. Chen, X. Ni, and X. Xia, “The effect of reinforcement on the mechanical properties of veneered wood fiber/polypropylene composites assembled with chlorinated polypropylene,” *Sci Rep*, vol. 12, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1038/s41598-022-17777-w.

[18] J. Fan, P. Li, W. Guo, X. Zhao, C. Su, and X. Xu, “Experimental Investigation on the Low-Velocity Impact Response of Tandem Nomex Honeycomb Sandwich Panels,” *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 2, p. 456, Jan. 2023, doi: 10.3390/polym15020456.

[19] A. Nuryawan, J. Sutiawan, Rahmawaty, N. Masruchin, and P. Bekhta, “Panel Products Made of Oil Palm Trunk: A Review of Potency, Environmental Aspect, and Comparison with Wood-Based Composites,” May 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/polym14091758.

[20] N. Lakreb, B. Bezzazi, and H. Pereira, “Mechanical behavior of multilayered sandwich panels of wood veneer and a core of cork agglomerates,” *Mater Des*, vol. 65, pp. 627–636, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2014.09.059.

[21] M. Haseli, M. Layeghi, and H. Zarea Hosseinabadi, “Evaluation of modulus of elasticity of date palm sandwich panels using ultrasonic wave velocity and experimental models,” *Measurement (Lond)*, vol. 149, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.measurement.2019.107016.