

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

وحید عتابخشیان^۱، عباس قره‌قاشی^۲، حسین تقی‌پور^{۳*}

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

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

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

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۶)

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 (۲۰ و ۴۰ میلی‌متر) و سه سطح انرژی ضربه (۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ ژول) ساخته شد و آزمون نفوذ با ضربه‌زن سقوطی ۱۰ 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 ۴۰ میلی‌متری تحت ضربه ۱۰۰ ژول بیش از سه برابر مقدار نمونه‌های ۵۰ ژول افزایش یافت. همچنین نیروی اوج نمونه‌ها از حدود ۲٫۳ کیلو نیوتون در انرژی ۵۰ ژول به بیش از ۶٫۳ کیلو نیوتون در انرژی ۱۵۰ 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: ۰۹۱۲۰۷۳۰۲۲۹، پست الکترونیک: h.taghipoor@velayat.ac.ir

این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این

لایسنس از آدرس <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.



مقدمه

پانل‌های ساندویچی از جمله سازه‌های مرکب سبک‌وزنی هستند که به دلیل 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 [۱-۴].

در سال‌های اخیر، با توجه به دغدغه‌های زیست‌محیطی و محدودیت منابع معدنی، پژوهشگران به سمت استفاده از مواد زیست‌پایه و تجدیدپذیر به عنوان جایگزین برای هسته‌های مصنوعی مانند فوم‌های پلیمری و آلومینیومی گرایش یافته‌اند. یکی از گزینه‌های ارزشمند در این زمینه، چوب درخت خرما است که به طور گسترده در مناطق گرمسیری و بیابانی در دسترس بوده و به عنوان یک منبع زیست‌پایه‌ی ارزان، سبک و سازگار با محیط زیست شناخته می‌شود. چوب خرما با داشتن ساختار متخلخل طبیعی و مقاومت ویژه‌ی قابل قبول، می‌تواند در نقش هسته‌ی جذب‌کننده‌ی انرژی در سازه‌های چندلایه ایفای نقش کند [۵].

سیلوا و همکاران [۶] در مطالعه‌ای اظهار کردند که مواد چوبی طبیعی به دلیل 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 ۶ 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 [۷] نیز با انجام آزمون‌های تجربی متعدد روی چوب‌های متخلخل طبیعی نشان دادند که میزان تغییر شکل پلاستیک و ظرفیت جذب انرژی با دانسیته رابطه مستقیم دارد. داده‌های آن‌ها بیان می‌کند که انرژی

جذب‌شده تا سطح کرنش ۰.۶٪ می‌تواند بیش از ۴۰ درصد بین نواحی با دانسیته متفاوت یک تنه چوب تغییر کند. این یافته‌های کمی نقش ناهمگنی را در طراحی هسته‌های گرادایانی دوچندان می‌کند.

روسا و فورتنس [۸] در تحلیل آناتومیک چوب نخل نشان دادند که دانسیته در راستای شعاع و ابعاد الیاف به صورت لایه‌لایه تغییر می‌کند؛ به گونه‌ای 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 [۹] 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 ۴۳، ۸۵ و ۱۲۰ 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 جداسازی 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 قابل توجه مقاومت ضربه‌ای نسبت به هسته‌های فومی می‌شود. تحلیل کمی آن‌ها نشان داد که انرژی جذب‌شده در سازه‌های فلز-چوب تا ۱.۸ برابر بیشتر از سازه‌های فلز-فوم است، و این اختلاف به دلیل 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.

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 [۱۳] در مطالعه‌ای نوع جدیدی از پانل‌های ساندویچی سازه‌ای با هسته چوب روغن خرما 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 روغن خرما 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 [۱۴] در مطالعه‌ای به بررسی تشخیص و شناسایی آسیب ناشی از ضربه با سرعت پایین در پانل‌های ساندویچی با هسته چوب پالوونیا پرداختند و استفاده از ترموگرافی مادون قرمز (IRT) را به‌عنوان یک روش غیرمخرب برای تحلیل انواع آسیب‌ها معرفی کردند. در این تحقیق، نمونه‌ها تحت ضربه توسط یک سر نیم‌کره به قطر ۱۶ میلی‌متر و با انرژی‌های ۲۲ تا ۷۷ ژول قرار گرفتند و تصاویر حرارتی به‌دست آمده، 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

جندلی و همکاران [۱۰] 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 به‌عنوان 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 سربارو و همکاران [۱۱] بر روی فشردگی چوب بالسا نشان داد که رفتار الاستوپلاستیک این مواد به‌صورت شدیداً جهت‌دار و منطبق بر ساختار سلولی آن‌ها است. این پژوهش نه تنها ویژگی‌های کیفی ساختار سلولی را گزارش می‌کند بلکه داده‌های کمی نشان می‌دهد که تنش تسلیم در راستای الیاف می‌تواند تا ۵ برابر جهت شعاعی افزایش یابد. این یافته‌ها اهمیت توجه به جهت‌گیری فیبرها در تحلیل ضربه‌ای را روشن می‌سازد.

بنزایدن و همکاران [۱۲] 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

با وجود مطالعات متعدد بر روی مواد زیست پایه 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 به صورت کمی بررسی نکرده است. از این رو، 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 جذب شده مشخص شود. نوآوری اصلی این پژوهش ارائه‌ی یک ارزیابی جامع تجربی از پانل‌های آلومینیومی-چوب خرما و نشان دادن رفتار گرادانی جذب انرژی ناشی از ساختار متخلخل و ناهمگن این هسته‌ی طبیعی است؛ رفتاری که می‌تواند مبنایی برای طراحی هسته‌های زیستی مهندسی شده و توسعه‌ی سازه‌های سبک‌وزن با عملکرد بالا باشد.

مواد و روش‌ها

مواد

در این پژوهش برای ساخت نمونه‌ها از چوب درخت خرما به‌عنوان هسته‌ی زیست پایه و ورق‌های آلومینیومی به‌عنوان رویه‌های مقاوم استفاده شد. چوب خرما پس از برش از بخش میانی تنه، خشک و هم‌دم در آزمایشگاه نگهداری شد تا رطوبت آن به حدود ۱۲٪ برسد. ویژگی‌های فیزیکی چوب شامل چگالی تقریبی ۵۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و تخلخل طبیعی بالا بود. رویه‌های آلومینیومی از نوع آلیاژ Al 3003 با ضخامت ۱٫۵ میلی‌متر انتخاب گردیدند که به دلیل 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 ۱ نمونه پانل‌های ساندویچی و نمونه چوب درخت خرما نشان داده شده است.

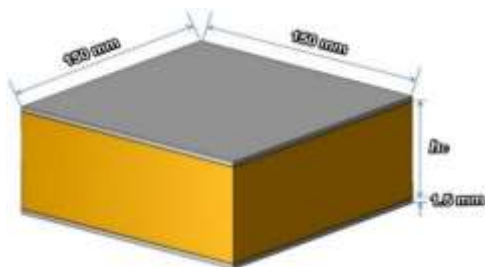
بررسی تأثیر پارامترهای مختلف مانند سطح انرژی ضربه، ضخامت الیاف و ترتیب لایه‌بندی بر نوع و شدت آسیب پرداخت، که این موضوع اهمیت طراحی بهینه پانل‌های ساندویچی با مقاومت بالا در برابر ضربه را برجسته می‌کند. یافته‌های این تحقیق با مطالعات پیشین در زمینه تحلیل آسیب پانل‌های کامپوزیتی هم‌راستا بوده و نقطه عطفی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

لی و همکاران [۱۵] 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 [۱۶] 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 Inverted Interlock Regular و Stagger با روش دست‌ساز ساخته شد و رفتار ضربه‌ای نمونه‌ها در سرعت‌های ۳، ۵ و ۷ 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.

آماده‌سازی نمونه‌ها



شکل ۱. نمایی از پانل ساندویچی و هسته چوب درخت خرما



شکل ۲. ابعاد نمونه پانل ساندویچی و پارامترهای طراحی

تعداد ۱۸ نوع نمونه برای آزمون نفوذ ضربه‌ای سرعت پایین ساخته شد. ابعاد تمام نمونه‌ها به صورت مربع ساخته شده و در شکل ۲ به صورت شماتیک نشان داده شده است. همچنین در جدول ۱ ارتفاع هسته برای هر یک از نمونه‌ها و چگونگی کدگذاری اسم نمونه‌ها نشان داده شده است. لایه‌های آلومینیومی با استفاده از فشار یکنواخت و به صورت سرد بر سطح چوب با رزین چسبانده شدند و پس از عمل‌آوری به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط، آماده‌ی آزمون گردیدند.

جدول ۱. اسامی نمونه‌ها و پارامترهای آزمون ضربه و ابعاد پانل ساندویچی

نام نمونه‌ها	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

سنسور شتاب با نرخ نمونه‌برداری ۲۰ کیلوهرتز بدست می‌آید. تمام نمونه‌ها در شرایط مشابه دمای محیط مورد آزمایش قرار گرفتند. نمایی از دستگاه سقوط وزنه در شکل ۳ نشان داده شده است. برای دقت در نتایج آزمون هر نمونه سه مرتبه تحت بارگذاری ضربه سرعت پایین قرار می‌گیرد.

تجهیزات و شرایط آزمون

آزمون نفوذ ضربه‌ای با استفاده از دستگاه ضربه‌زن سقوطی انجام شد. انرژی ضربه در سه سطح ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ ژول توسط سقوط آزاد ضربه زننده با جرم ۱۰ کیلوگرم و ارتفاع سقوط متفاوت (با توجه به میزان انرژی ضربه) تامین می‌گردد. ضربه‌زن از نوع کروی با قطر ۱۲ میلی‌متر انتخاب گردید. همچنین در جدول ۱ 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

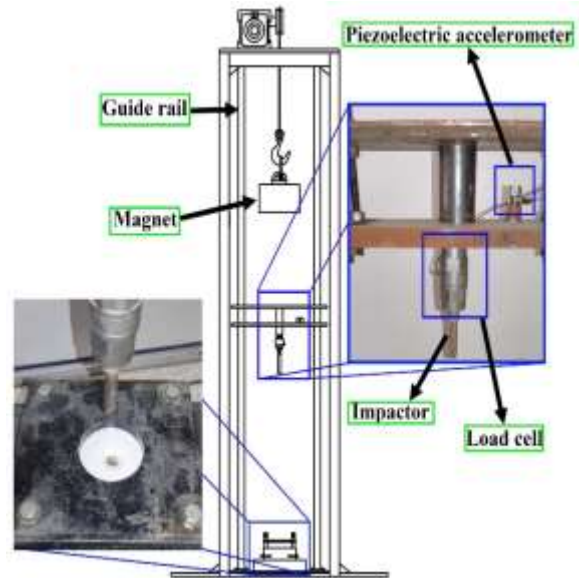
جدول ۲. نتایج جذب انرژی و نیروی بیشینه نمونه‌ها بعد از

آزمون ضربه	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- جابه‌جایی شکل ۴ 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 سه مرحله‌ی 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 پستی 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.



شکل ۳. نمایی از دستگاه آزمون ضربه سرعت پایین نمونه تحت آزمون

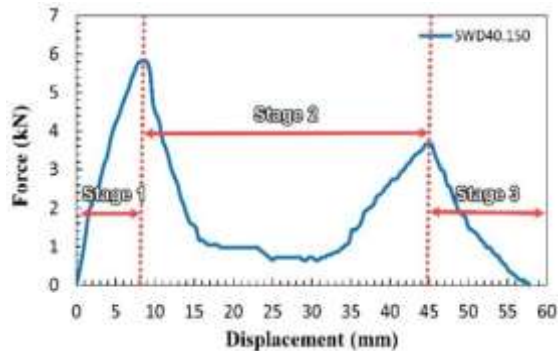
شاخص‌های تحلیلی

داده‌های ثبت‌شده شامل نمودار نیرو-جابه‌جایی و منحنی انرژی جذب‌شده برای هر نمونه بود. انرژی جذب‌شده E از انتگرال‌گیری سطح زیر منحنی نیرو-جابه‌جایی طبق رابطه ۱ قابل محاسبه می‌باشد.

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

که در آن F نیروی تماس و δ_{max} بیشینه جابه‌جایی در لحظه‌ی اوج تماس است. همچنین نیروی بیشینه اولیه که نشان دهنده حداکثر نیرو در سطح نمودار نیرو-جابه‌جایی 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 جذب‌شده و نیروی بیشینه طراحی بهینه در کاربرد پانل ساندویچی تحت بارگذاری ضربه نفوذی سرعت پایین را نشان می‌دهد. جدول ۲ نتایج دو شاخص جذب انرژی و نیروی بیشینه برای تمامی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

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.



شکل ۴. سه فاز تخریب و فروریزش در نمودار نیرو-جابجایی برای پانل ساندویچی تحت بارگذاری ضربه سرعت پایین



شکل ۵. 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 به سرعت 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 [۱۸].

به‌دلیل توزیع غیریکنواخت دانسیته در راستای ضخامت، بخش‌های با چگالی پایین زودتر فشرده شده و انرژی بیشتری را جذب می‌کنند، در حالی که 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 گرادپان‌دار آینده مورد استفاده قرار گیرد. رفتار مشابهی در هسته‌های طبیعی مانند بامبو و چوب نخل روغنی نیز مشاهده شده است [۱۱]. [۱۷].

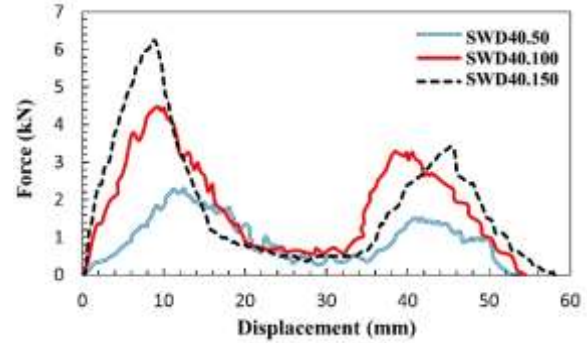
نتایج نشان داد هسته چوب درخت خرما به‌دلیل ناهمگنی ذاتی ساختار خود مطابق شکل ۵، رفتار گرادپان‌گونه‌ای در جذب انرژی دارد که موجب افزایش پایداری ساختار در مقایسه با هسته‌های فوم یکنواخت می‌شود. بر این اساس می‌توان از چوب خرما با کنترل دانسیته یا تراکم لایه‌های در عمق، به‌عنوان یک هسته‌ی طبیعی از ضایعات 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

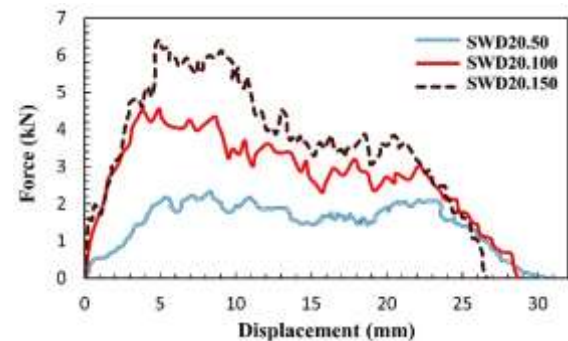
همانطور که در نمودارهای نیرو-جابجایی شکل ۶ و ۷ مشاهده می‌گردد، با افزایش انرژی ضربه از ۵۰ به ۱۵۰ ژول، رفتار کلی همه‌ی نمونه‌ها با ضخامت هسته ۲۰ و ۴۰ میلیمتر نشان‌دهنده‌ی افزایش جذب انرژی و نیروی بیشینه است. شکل تخریب نمونه‌ها تحت نفوذ ضربه‌ای نشان داد که در هر سه سطح انرژی اعمال‌شده (۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ ژول) 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

و نیروی اوج بین ۲,۲ تا ۲,۳ kN ثبت گردید، که بیانگر عملکرد پایدار ماده در برابر بارگذاری ضربه‌ای خفیف است. در انرژی ۱۰۰ ژول، این پدیده با گسترش ترک‌های شعاعی در چوب و جدا شدن پلاگ پشت نمونه همراه گردید؛ هسته در این سطح انرژی به صورت کامل فشرده شد و سلول‌های چوبی ساختار متخلخل خود را از دست دادند. در انرژی ۱۰۰ ژول، افزایش قابل توجهی در انرژی جذب شده مشاهده گردید، به طوری که مقادیر جذب برای نمونه‌های دارای هسته‌ی ۴۰ میلی‌متر تا حدود سه برابر افزایش یافت. نتایج نشان داد که انرژی ضربه‌ی ۱۰۰ ژول برای هر دو نوع نمونه در محدوده‌ی گذار از رفتار الاستوپلاستیک به شکست نیمه پایدار است، به گونه‌ای 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 فعال شدن هم‌زمان مکانیزم‌های خمش رویه و فشرده‌گی هسته گزارش شده است [۱۹].

در انرژی ۱۵۰ ژول، مکانیزم تخریب ترکیبی از پارگی صفحه رویه، فشرده‌گی کامل و شکست هسته، و پارگی به همراه جدایش پلاگ از صفحه پشتی بود که در شکل ۹-الف دیده می‌شود. این رفتار مشابه نتایج گزارش شده 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 جذب شده شد، اما راندمان جذب انرژی کاهش یافت، زیرا سهم انرژی‌های اتلافی غیرقابل بازگشت (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 [۱۳] ارائه شده‌اند مطابقت دارد و نشان می‌دهد که با رسیدن به حد بحرانی،



شکل ۶. نمودار نیرو-جاب‌جایی برای نمونه‌ها با ضخامت هسته ۴۰ میلی‌متر و انرژی ضربه متفاوت



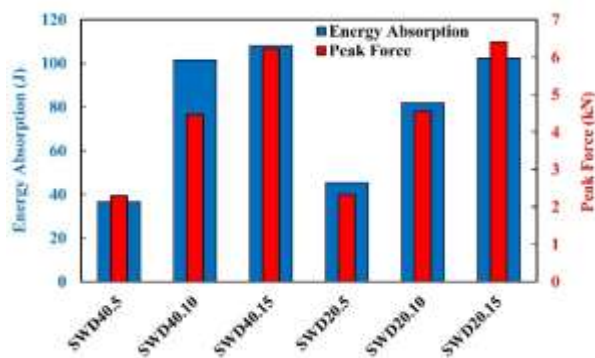
شکل ۷. نمودار نیرو-جاب‌جایی برای نمونه‌ها با ضخامت هسته ۲۰ میلی‌متر و انرژی ضربه متفاوت

همان‌طور که در نمودارهای میله‌ای شکل ۸ مشاهده می‌شود، با افزایش انرژی ضربه، نیروی بیشینه تماس و انرژی جذب شده افزایش می‌یابند، اما این افزایش به صورت 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 [۱۲].

در ضربه با انرژی ۵۰ ژول، تغییر شکل موضعی در مرکز برخورد با فرورفتگی قابل توجه 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 جذب شده در حدود ۳۶,۵ تا ۴۵,۴ ژول

میلی‌متر، تخریب به‌صورت موضعی و سریع رخ داد و فروریزش هسته محدود به ناحیه‌ای نزدیک محل تماس بود. در مقابل، در نمونه‌های با هسته‌ی ۴۰ 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 [۲۰].

نمودارهای نیرو-جابجایی شکل ۱۰ نشان می‌دهد که ضخامت هسته نه‌تنها ظرفیت جذب انرژی را افزایش می‌دهد، بلکه زمان بروز شکست و نیروی اوج را نیز تغییر می‌دهد.



شکل ۸. نمودار میله‌ای مقایسه میزان جذب انرژی و نیروی بیشینه نمونه‌ها تحت بارگذاری ضربه سرعت پایین



(الف)



(ب)

شکل ۹. نمایی از سطح جلو و پشت نمونه الف) SWD40.50.

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 (۶٫۲ تا ۶٫۴ 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 ۶ و ۷، مشاهده می‌شود که افزایش انرژی ضربه منجر به افزایش نیروی اوج و افزایش جابجایی نهایی تا لحظه‌ی نفوذ کامل می‌شود. به‌طور مشخص، در ضخامت ۴۰ میلی‌متر، نیروی اوج از ۲٫۲۹ kN در انرژی ۵۰ ژول به ۶٫۲۱ kN در انرژی ۱۵۰ ژول افزایش یافته که معادل رشد ۱۷۱٪ 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 ۲۰ و ۴۰ میلی‌متر نفوذ کامل رخ داد، اما مسیر و الگوی آسیب کاملاً متفاوت بود. در نمونه‌های با هسته‌ی ۲۰

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

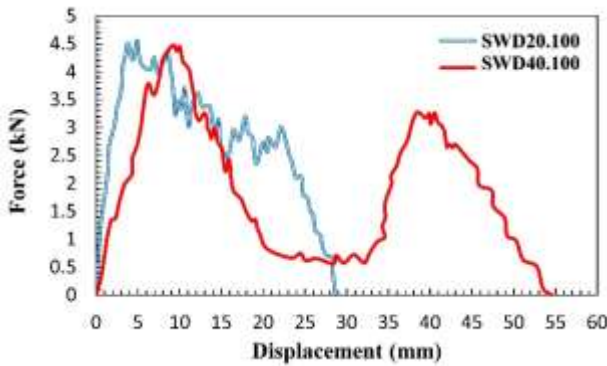
نمونه‌های ۴۰ میلی‌متر به دلیل حجم بیشتر ماده متخلخل، دیرتر وارد مرحله فروپاشی شده و توزیع تنش یکپارچه‌تری در طول ضخامت ایجاد می‌کنند؛ به طوری که اختلاف انرژی جذب شده بین نمونه‌های ۴۰ و ۲۰ میلی‌متر در انرژی ۱۰۰ ژول حدود ۲۴٪ است (۱۰۱،۶۹ در برابر ۸۲،۰۷ ژول). این اختلاف در انرژی ۱۵۰ ژول نیز حفظ شده و نشان می‌دهد که حتی در حالت نفوذ کامل نیز سهم قابل توجهی از انرژی ورودی صرف فشردگی لایه‌های میانی چوب خرما می‌شود. در مقابل، هسته‌های ۲۰ 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 ۴۰ 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 [۲۱].

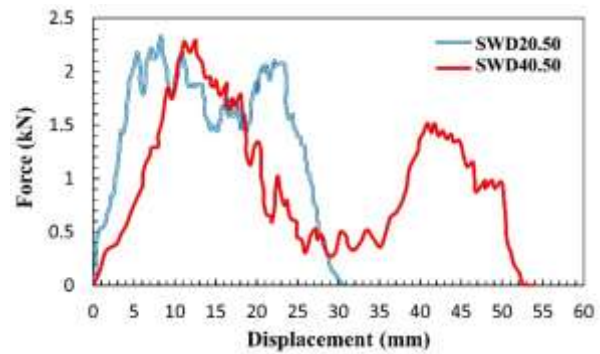
افزایش ضخامت هسته موجب انتقال بخشی از انرژی از مکانیزم پانچ رویه به مکانیزم فروریزش هسته می‌شود. در واقع، در هسته‌های ضخیم‌تر بخش قابل توجهی از انرژی ورودی با فروریزش هسته تلف می‌شود، در حالی که در

هسته‌های نازک‌تر انرژی عمدتاً صرف شکست سریع رویه و جدایش پلاگ می‌شود. این پدیده با مدل‌های تحلیلی گزارش شده 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 ۹ الف و ب، نمونه‌های با هسته‌ی ۲۰ میلی‌متر دارای لبه‌های پشتی تیز و بریدگی‌های مشخص در محل خروج پلاگ هستند، در حالی که نمونه‌های با هسته‌ی ۴۰ میلی‌متر دارای حفره‌های پهن‌تر با الگوی فشردگی سلولی اطراف محل نفوذ می‌باشند. این تفاوت در شکل سطح تخریب شده نشان می‌دهد که افزایش ضخامت علاوه بر افزایش انرژی شکست، موجب توزیع تدریجی‌تر تنش در زمان و کاهش نیروی اوج تماس نیز می‌شود [۱۱].

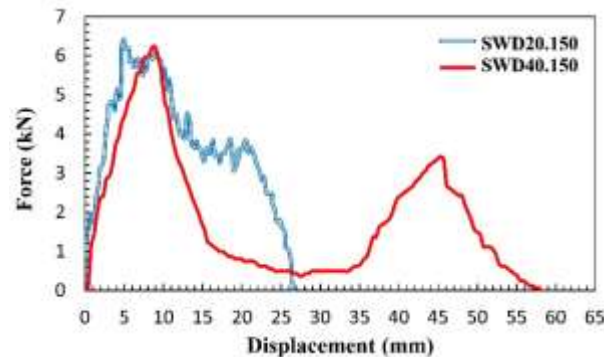
مقایسه‌ی نمونه‌های با هسته‌ی ۲۰ و ۴۰ میلی‌متر نشان می‌دهد که ضخامت هسته نقش کلیدی در تعیین مکانیزم جذب انرژی و مقاومت نهایی در برابر نفوذ دارد. نمونه‌های دارای هسته‌ی ضخیم‌تر (۴۰ mm) در سطوح انرژی پایین‌تر رفتار نرم‌تر اما پایدارتری نشان دادند و با افزایش انرژی تا ۱۰ ژول ظرفیت جذب انرژی آن‌ها به صورت چشمگیری افزایش یافت (از ۳۶،۵ به ۱۰۱،۷ ژول). در مقابل، نمونه‌های با هسته‌ی ۲۰ 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 حالی که در نمونه‌های نازک‌تر، پاسخ ماده بیشتر موضعی و متمرکز بر لایه‌ی رویه است [۲۰].



(ب)



(ف)



(ج)

شکل ۱۰. مقایسه نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه‌ها با ضخامت هسته متفاوت تحت انرژی ضربه الف) ۵۰ ژول، ب) ۱۰۰ ژول، ج) ۱۵۰ ژول نتیجه‌گیری

تأخیر در شکست را فراهم می‌سازد. تحلیل رفتار شکست نشان می‌دهد که افزایش ضخامت هسته نه تنها مقاومت کلی در برابر نفوذ را افزایش می‌دهد، بلکه با به تعویق انداختن 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 گرادسانی 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

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 ۴۰ 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

10.4028/www.scientific.net/MSF.636-637.260.

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

- 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.
- [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*,