



Experimental Analysis of Impact Loading on Sandwich Panels with Glass/Epoxy Composite Faces and Cork Core

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Gerami A.¹,
Vahidi H.¹,
Ahmadi H.^{1*},
Liaghat G.¹

How to cite this article

Gerami A, Vahidi H, Ahmadi H, Liaghat G, Experimental analysis of impact loading on sandwich panels with glass/epoxy composite faces and cork core. Modares Mechanical Engineering; 2025;25(01):55-63.

¹ Mechanical Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

h_ahmadi@modares.ac.ir

Article History

Received: January 16, 2025
Accepted: March 11, 2025
ePublished: April 22, 2025

ABSTRACT

This research experimentally investigates the effect of cork layer configuration on the Impact loading behavior of glass/epoxy hybrid composites. Three types of specimens were fabricated and subjected to a 9.32 g spherical projectile impact test: GE8 (8-layer glass/epoxy composite without cork), LSPC1 (with 1 mm thick cork layers alternating between glass fiber layers), and SPC (with a 3 mm thick cork layer in the center). The results showed that the LSPC1 specimen exhibited significantly higher ballistic resistance, with the highest ballistic limit velocity (135 m/s). Furthermore, this specimen demonstrated the lowest damage (including bulging, petaling, and delamination) and the highest energy absorption (84.9 J). This superior performance is attributed to the uniform distribution of thin cork layers, multi-stage energy absorption at multiple fiber/cork interfaces, plastic deformation of cork cells under buckling and crushing, and crack growth resistance. This study demonstrates that the use of thin and alternating cork layers is an effective strategy to significantly improve the ballistic resistance of glass/epoxy composites and highlights the importance of engineered layup design for achieving optimal impact performance. The findings of this research can be used in the design and manufacturing of lightweight and impact-resistant structures in the aerospace, automotive, and protective equipment industries.

Keywords Impact Loading, Sandwich Panel, Energy Absorption, Glass/Epoxy Composite, Cork

CITATION LINKS

1- Influence of shear plugging in the energy absorbed by thin carbon-fibre laminates subjected to high-velocity impacts. 2- Ballistic impact mechanisms—a review on textiles and fibre-reinforced composites impact responses. 3- Experimental and numerical study on the low-velocity impact behavior of foam-core sandwich panels. 4- Experimental and numerical study of impact energy absorption of safety important honeycomb core sandwich structures. 5- Numerical modelling of the low-velocity impact response of composite sandwich beams with honeycomb core. 6- Effect of core density on the low-velocity impact response of foam-based sandwich composites. 7- Parameters influencing the impact response of fiber-reinforced polymer matrix composite materials: A critical review. 8- Damage tolerance assessment of composite sandwich panels with localised damage. 9- High-velocity impact behaviour of aluminium honeycomb sandwich panels with different structural configurations. 10- High velocity impact behavior of Kevlar/rubber and Kevlar/epoxy composites: a comparative study. 11- Static and dynamic characterization of agglomerated cork and related sandwich structures. 12- Green sandwich structures under impact: experimental vs numerical analysis. 13- Low velocity impact behaviour of a hybrid carbon-epoxy/cork laminate. 14- Impact resistance of marine sandwich composites. 15- Assessing impact velocity and temperature effects on crashworthiness properties of cork material. 16- Experimental study of agglomerated-cork-cored structures subjected to ballistic impacts. 17- The high-velocity impact behaviour of kevlar composite laminates filled with cork powder. 18- High-velocity impact behaviour of damaged sandwich plates with agglomerated cork core. 19- Modelling of carbon/epoxy sandwich panels with agglomerated cork core subjected to impact loads. 20- Experimental analysis of the impact behaviour of sandwich panels with sustainable cores. 21- Impact resistance of cork-skinned marine PVC/GRP sandwich laminates. 22- Experimental and numerical analysis of the ballistic response of agglomerated cork and its bio-based sandwich structures. 23- Compression impact behaviour of agglomerated cork at intermediate strain rates.

تحلیل تجربی بارگذاری ضربه روی ورق ساندویچی با رویه های کامپوزیت شیشه/اپوکسی و هسته چوب پنبه

احمد گرامی^۱، هادی وحیدی^۱، حامد احمدی^{۱*}، غلامحسین لیاقت^۱

^۱ گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

این پژوهش به بررسی تجربی تاثیر پیکربندی لایه های چوب پنبه بر رفتار ضربه ای ساختار ساندویچی با رویه های شیشه/اپوکسی و هسته چوب پنبه می پردازد. سه نوع نمونه شامل: GE8 (کامپوزیت شیشه/اپوکسی ۸ لایه بدون چوب پنبه)، LSPC1 (با لایه های اپوکسی متری چوب پنبه متناوب بین لایه های الیاف شیشه) و SPC (با یک لایه ۳ میلی متری چوب پنبه در مرکز) ساخته شده و تحت آزمایش برخورد یک پرتابه با دماغه کرومی ۹/۳۲ گرمی قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که نمونه LSPC1 با بیشترین سرعت حد بالستیک (۱۳۵ متر بر ثانیه) به طور قابل توجهی از دو نمونه دیگر مقاوم تر است. همچنین، این نمونه کمترین میزان آسیب (برآمدگی، شکاف و جدایش بین لایه ای) و بیشترین جذب انرژی (۸۴/۹ ژول) را نشان داد. این عملکرد برتر به توزیع یکنواخت لایه های نازک چوب پنبه، جذب انرژی چند مرحله ای در فصل مشترک های لایه-های کامپوزیت/چوب پنبه، تغییر شکل پلاستیک سلول های چوب پنبه تحت کماتش موضعی و لهیدگی و مانعت از رشد ترک نسبت داده می شود. این مطالعه نشان می دهد که استفاده از لایه های نازک و متناوب چوب پنبه، راهکاری موثر برای بهبود قابل ملاحظه مقاومت بالستیک کامپوزیت های شیشه/اپوکسی است و بر اهمیت طراحی مهندسی شده لایه چینی برای دستیابی به عملکرد بهینه در برابر ضربه تاکید دارد. نتایج این تحقیق می تواند در طراحی و ساخت سازه های سبک و مقاوم در برابر ضربه در صنایع هوافضا، خودرو و تجهیزات حفاظتی مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه ها: بارگذاری ضربه ای، ساندویچ پنل، جذب انرژی، کامپوزیت شیشه/اپوکسی، چوب پنبه.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۱

*نویسنده مسئول: h_ahmadi@modares.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه اهمیت استفاده از کامپوزیت ها به دلیل ویژگی های منحصر به فرد آنها در صنایع مختلف اعم از هوافضا، خودروسازی، صنایع دریایی و سایر حوزه ها برکسی پوشیده نیست. سازه های کامپوزیتی با توجه به کاربردهایشان، در طول عملکردشان بارگذاری های مختلفی از جمله برخورد اجسام را تجربه می کنند، به همین دلیل بررسی رفتار آن ها تحت برخورد با اجسام در سرعت های مختلف حائز اهمیت است. به طور معمول، ضربه با سرعت بالا در مواد کامپوزیتی منجر به ایجاد آسیب های موضعی می شود که این آسیب ها به دلیل مکانیسم های مختلف جذب انرژی مانند تشکیل مخروط، شکست الیاف و ترک خوردگی ماتریس رخ می دهند [1,2].

در ضربات با سرعت بالا، زمان تماس بین پرتابه و نمونه بسیار کوتاه است، به طوری که نفوذ پرتابه پیش از رسیدن موج های تنش به مرزهای نمونه رخ می دهد. همچنین حد بالستیک، کلیدی ترین پارامتر برای ارزیابی پدیده نفوذ می باشد [3].

ساختارهای کامپوزیتی ساندویچی می تواند یک راهکار عملی برای مقابله با این تهدیدات باشند. [4-6] ساختارهای ساندویچی با ترکیب لایه های مستحکم در رویه و هسته سبک، عملکرد مناسبی در برابر ضربات سرعت بالا و نفوذ از خود نشان می دهند. در این ساختارها، آسیب ناشی از ضربات سرعت بالا به شکل لایه لایه شدن و شکست الیاف در لایه های رویه کامپوزیتی، جدایش بین هسته و لایه های رویه، و خرد شدن یا شکست برشی در هسته نمایان می شود [7,8].

ضخامت رویه ها، نوع هسته و ساختار لایه ای تاثیر قابل توجهی بر مقاومت در برابر ضربه و نفوذ دارند [9,10]. در این بین، نوع ماده هسته نیز می تواند تاثیر چشم گیری بر مکانیزم های گسیختگی و میزان جذب انرژی داشته باشد. امروزه ورق چوب پنبه، به عنوان هسته، بدلیل زیست تخریب پذیر بودن در کنار سایر ویژگی های مثبت نظیر وزن مخصوص کم، انعطاف پذیری و دوام بالا، استحکام و سختی مناسب، نفوذناپذیری نسبت به مایعات و گازها، مقاومت در برابر سایش و آتش و پایداری ابعادی بالا، مورد توجه محققین قرار گرفته است.

ساراسینی و همکاران [11] پاسخ ساختارهای ساندویچی با هسته چوب پنبه متراکم را تحت ضربه مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان دادند که این نوع هسته ها دارای خواص ویژه ای از جمله توانایی بالای اتلاف انرژی هستند و می تواند برای کاربردهای ضربه ای مورد استفاده قرار گیرد. بوریا و همکاران [12] پاسخ ساختارهای ساندویچی با لایه های رویه نازک از کتان/اپوکسی و هسته چوب پنبه متراکم را تحت ضربات با سرعت پایین بررسی کردند. نتایج نشان دادند که وجود چوب پنبه متراکم باعث بهبود مقاومت در برابر ضربه و جذب انرژی بالا می شود. سیلوا و همکاران [13] اثر یک لایه چوب پنبه ای به عنوان هسته در بین لایه های کامپوزیت کربن-اپوکسی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان دادند که گنجانیدن یک لایه چوب پنبه در فصل مشترک لایه هایی که ناهمخوانی بالای خمشی بین لایه ای با جهت گیری مختلف دارند، موجب بهبود رفتار مقاومت به آسیب و لایه لایه شدن می شود. کاستیلو و همکاران [14] در مطالعه ای به بررسی رفتار ساندویچ پنل هایی با هسته های PVC، چوب بالسا، چوب پنبه NL10 و NL20 و رویه های کامپوزیتی الیاف شیشه/پلی استر پرداختند. آزمایش های شبه استاتیک و ضربه ای نشان دادند که نمونه های PVC و NL20 نتایج پیش بینی پذیری دارند، اما NL10 انرژی جذب شده بالاتری (۳ برابر در آزمایش ضربه ای) و مودهای

نشان‌دهنده افزایش آسیب است. برای ضربه با انرژی ۴۰ ژول، انرژی جذب شده، متغیری که مستقیماً با آسیب مرتبط است، در چندلایه کامپوزیتی حدود ۳۰٪ بیشتر از صفحات ساندویچی است. بیشترین تفاوت بین صفحات ساندویچی و چندلایه کامپوزیتی زمانی مشاهده شد که نتایج نسبت فرورفتگی به انرژی ضربه مقایسه شد: حدود ۱۱۰٪ نسبت فرورفتگی بیشتر در صفحات چندلایه کامپوزیتی اندازه‌گیری شد. و به طور کلی افزودن چوب‌پنبه به‌عنوان هسته، عملکرد بالستیک سازه‌های کامپوزیتی را که قبلاً آسیب‌دیده‌اند را بهبود می‌بخشد. گومز و همکارانش^[19] به‌صورت تجربی و عددی رفتار ساندویچ پانل‌های ساخته شده از ورق‌های کربن بافته شده/اپوکسی با هسته چوب‌پنبه متراکم شده، تحت ضربه‌هایی با سرعت‌های متوسط، مورد مطالعه قرار دادند. یک مدل المان محدود غیرخطی/ صریح برای این مطالعه که مبتنی بر مدل‌های آسیب پیوسته برای پیش‌بینی تکامل آسیب درون لایه‌ای و بین لایه‌ای در صفحات بود، مورد استفاده قرار گرفت. رفتار هسته از طریق یک مدل فوم الاستومری هایپرالاستیک با معیارهای شکست چند محوری مدل‌سازی شد. نتایج نشان دادند که مدل عددی به دقت جابجایی‌های عرضی و نفوذ را پیش‌بینی می‌کند. گومز و همکارانش^[20] در مطالعه‌ای تجربی به بررسی رفتار سازه‌های ساندویچی متشکل از رویه‌های کربنی و هسته چوب‌پنبه ایی تحت بارهای ضربه‌ای که منجر به نفوذ اما سوراخ‌شدگی کامل نمی‌شود، پرداختند. نتایج نشان دادند برای سرعت‌های زیر سرعت سوراخ شدن، ماده هسته نقش کوچکی در نسبت انرژی بازگشتی دارد و هسته فوم PET اثرات اتلاف انرژی کمی بیشتر از همتای چوب‌پنبه‌ای آگلومره شده خود دارد. پانل‌های با هسته چوب‌پنبه‌ای آگلومره جابجایی‌های بیشتری نسبت به پانل‌های هسته فوم PET نشان دادند. همچنین لایه‌لایه شدن پوسته نیز یکی دیگر از مکانیسم‌های شکست بحرانی پانل‌های ساندویچی می‌باشد. با این وجود، این مکانیسم خرابی در پانل‌های ساندویچی با هسته چوب‌پنبه‌ای آگلومره مشاهده نشد که نشان می‌دهد اتصال صفحه و هسته در این پانل‌ها قوی‌تر است.

سادرلند و سورس^[21] به‌صورت تجربی به مطالعه و بهبود مقاومت در برابر ضربه ساختارهای ساندویچی مورد استفاده در سازه‌های دریایی پرداختند. آنان شش ساختار ساندویچی با ورقه‌های چوب‌پنبه و فوم PVC را مورد ارزیابی قرار دادند. لایه چوب‌پنبه نازک به‌عنوان ماده‌ای برای افزایش جذب انرژی ضربه در ساختار ساندویچی مورد استفاده قرار گرفت. ساختارهای مذکور مورد مطالعه و تحلیل تورفتگی شبه‌استاتیکی و آزمایش ضربه‌ای قرار گرفتند. عملکرد و رتبه‌بندی ساختارهای ساندویچی مذکور با معیارهای مقاومت در برابر آسیب (آسیب اولیه، نفوذ و سوراخ) و بارگذاری (تورفتگی شبه‌استاتیک، ضربه، برش و خمش) متفاوت بود. به طور کلی، این مفهوم برای بهبود مقاومت در برابر سوراخ (تا ۶۰٪) برای هر دو فرورفتگی شبه استاتیک و نرخ بارگذاری ضربه،

شکست متفاوتی نشان دادند. همچنین نمونه‌ها با هسته چوب‌پنبه‌ای NL10 و NL20 برای کاربردهای نیازمند مقاومت ضربه‌ای بالا و در صنایع دریایی مناسب هستند، اما سختی کمتر و وزن بالاتری دارند. پتاک و همکاران^[15] قابلیت سه نوع مختلف از چوب‌پنبه متراکم را برای تحمل مقادیری از انرژی ضربه در دماهای مختلف را مورد ارزیابی قرار دادند. هدف از این مطالعه، توسعه موادی با ضخامت مناسب برای طراحی‌های پیشرفته و تجهیزات محافظتی با شتاب کم بود. نتایج نشان دادند چوب‌پنبه تحت ضربه توانایی بالایی در جذب انرژی و ظرفیت بازیابی بسیار بالایی دارد. همچنین، شبیه‌سازی عددی با استفاده از تحلیل اجزای محدود جهت ارزیابی صحت مدل مواد تحت انرژی‌های ضربه‌ای بالا انجام دادند.

سانچز و همکارانش^[16] به مطالعه تجربی ساندویچ پنل با هسته چوب‌پنبه متراکم تحت ضربه سرعت بالا پرداختند. آنان سه نوع ساندویچ پنل را مورد بررسی قرار دادند: ۱- چوب‌پنبه متراکم شده ۲- دو صفحه آلومینیومی نازک با فاصله از هم ۳- ساندویچ پنل متشکل از دو صفحه آلومینیومی نازک با هسته چوب‌پنبه‌ای متراکم شده. رفتار چوب‌پنبه متراکم شده و اثرات هسته چوب‌پنبه از نظر حد بالستیک، سرعت باقیمانده و جذب انرژی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان دادند که حد بالستیک چوب‌پنبه متراکم شده کم است و تقریباً نصف حد بالستیک صفحات نازک آلومینیومی است. انرژی جذب شده توسط چوب‌پنبه متراکم شده به‌سرعت پس از سوراخ شدن کامل صفحه کاهش می‌یابد. در مقابل، انرژی جذب شده برای صفحات آلومینیومی با افزایش انرژی ضربه، کندتر کاهش می‌یابد. افزودن یک هسته چوب‌پنبه‌ای به ساختار ساندویچی متشکل از دو صفحه آلومینیومی نازک، سبب افزایش حد بالستیک و به‌ویژه انرژی جذب می‌شود و همچنین مکانیسم شکست صفحات تغییر نمی‌کند. مارتین آمارو و همکارانش^[17] به مطالعه رفتار بالستیک و تحمل آسیب کامپوزیت‌های تقویت‌شده Kevlar/epoxy با ماتریس حاوی پودر چوب‌پنبه پرداختند. نتایج نشان داد که افزودن چوب‌پنبه به رزین مقاومت به نفوذ را اندکی افزایش داده و نواحی آسیب را کاهش می‌دهد. همچنین این کامپوزیت‌ها حساسیت کمتری به سرعت ضربه نشان داده و به دلیل کاهش مصرف رزین، دوستدار محیط‌زیست هستند. ایوانز و همکارانش^[18] در مطالعه‌ای تجربی به بررسی پاسخ ضربه سرعت بالا و حد بالستیک ساختارهای ساندویچی آسیب دیده (تحت ضربه سرعت پایین) با هسته چوب‌پنبه در مقایسه با صفحات چندلایه کامپوزیتی آسیب دیده پرداختند. آنان در ابتدا هر دو نوع نمونه را تحت ضربه سرعت پایین با انرژی ۲۵ و ۴۰ ژول قرار دادند. مقدار پیک نیرو مشاهده شده در هر دو نوع نمونه برای هر دو انرژی ضربه‌زننده مشابه بود. هنگامی که انرژی ضربه افزایش می‌یابد، سفتی خمش چندلایه کامپوزیتی اندکی کاهش می‌یابد که



شکل ۱) ورق چوب پنبه طبیعی

۲- آزمایش‌های تجربی

۲-۱- خصوصیات مواد

پانل‌های ساندویچی از دو بخش اصلی تشکیل می‌شوند. نخست هسته میانی با چگالی کم که سبک و معمولاً حجیم است و دیگری رویه‌های واقع در دو طرف هسته که سخت و معمولاً نازک هستند. در این تحقیق، از رویه‌های کامپوزیتی شیشه-اپوکسی و هسته ورق چوب پنبه (کرک) استفاده شده است. در ساخت رویه‌ها از الیاف شیشه تک جهت با چگالی سطحی ۵۰۰ گرم بر سانتی‌متر مربع به عنوان تقویت‌کننده و رزین اپوکسی استفاده شده است. همچنین ورق چوب پنبه طبیعی (شکل ۱) با ضخامت‌های ۳ میلی‌متر و ۱ میلی‌متر به عنوان هسته در ساخت ساندویچ پنل‌ها استفاده شده است که چگالی آن ۵۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد.

۲-۲- ساخت نمونه‌ها

برای تولید نمونه‌های این پژوهش از روش قالب‌گیری فشاری استفاده شده است. فرآیند ساخت با آماده‌سازی قالب آغاز شد، به این صورت که سطح داخلی قالب با یک لایه واکس جداکننده پوشش داده شد تا از چسبندگی رزین اپوکسی به قالب جلوگیری شود. این مرحله برای تسهیل جداسازی نمونه‌ها و تضمین کیفیت سطح نهایی بسیار حائز اهمیت است. پس از آماده‌سازی قالب، الیاف شیشه تک جهت آغشته به رزین به صورت لایه‌چینی دستی به صورت متقاطع ۰ و ۹۰ درجه در داخل قالب قرار گرفتند. هسته‌های چوب پنبه نیز در مکان‌های مشخص از پیش تعیین شده در بین لایه‌های کامپوزیت قرار داده شدند (شکل ۲). قالب با استفاده از پیچ‌های مخصوص محکم بسته شد تا فشار یکنواختی به تمامی بخش‌های نمونه وارد شود. این مرحله باعث حذف عیوبی مانند لایه‌لایه شدن و افزایش کسر حجمی الیاف و استحکام نمونه‌ها می‌شود. فرآیند پخت در آون انجام شد که طی آن قالب به مدت ۸ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و قرار گرفته و سپس ۴ ساعت جهت پخت کامل در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد

البته با افزایش وزن ورقه، پیدا شد. و مکانیسم‌های آسیب به نرخ بارگذاری وابسته هستند. کلودیا سرجی و همکارانش [22] به تجزیه و تحلیل تجربی و عددی پاسخ بالستیک ساختارهای ساندویچی با هسته چوب پنبه تراکم شده پرداختند.

مواد به کار رفته در ورقه‌های رویی و زیرین ساندویچ پنل مذکور، پلی‌پروپیلن (PP) تقویت شده با پارچه هیبریدی کتان/بازالت می‌باشد. همچنین از چوب پنبه تراکم شده با چگالی مختلف در مقایسه با فوم‌های پلی‌وینیل (کلرید) مورد مطالعه قرار گرفتند. مقاومت بالستیک چوب پنبه آگلومره شده قطعاً کمتر از فوم PVC مصنوعی است که به عنوان معیار استفاده می‌شود و حد بالستیک آن برخلاف فوم PVC به صورت خطی با چگالی افزایش نمی‌یابد. هر دو نتیجه عمدتاً به دلیل جداسدن زود هنگام شاخه‌های چوب پنبه‌ای ناشی از اتصال ضعیف بین دانه‌های چوب پنبه و چسب پلیمری است. این نقطه ضعف به عنوان یک گلوگاه عمل می‌کند که حد بالایی قابل دستیابی به هسته مبتنی بر زیستی را محدود می‌کند.

بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهند که استفاده از چوب پنبه به عنوان هسته، در کنار توجه به مسائل زیست‌محیطی، رویکردی نوآورانه در طراحی سازه‌های ساندویچی می‌باشد. چوب پنبه به دلیل ساختار سلولی خاص خود، قابلیت جذب انرژی بالایی دارد و می‌تواند جایگزینی برای فوم‌های پلیمری سنتی مانند PVC باشد. مطالعات مقایسه‌ای نشان می‌دهند که سازه‌های ساندویچی با هسته چوب پنبه‌ای، در برخی محدوده‌های سرعتی ضربه، عملکردی مشابه یا حتی برتر از هسته‌های پلیمری دارند [16,19,22]. علاوه بر این، ویژگی‌هایی مانند چگالی و ترکیب مواد هسته، نقش مهمی در تغییر رفتار مکانیکی و بالستیک این سازه‌ها ایفا می‌کنند [19,23]. با در نظر گرفتن حرکت جوامع پیشرو به سمت طراحی و ساخت ساختارهای کارآمد زیست تخریب پذیر و اطلاعات و مقالات اندک موجود در این زمینه، نیاز به تولید دانش در این حوزه به شدت احساس می‌شود.

در این پژوهش، رفتار مکانیکی و مقاومت بالستیک ساندویچ پنل‌های ساخته شده با رویه‌های کامپوزیتی شیشه-اپوکسی و هسته چوب پنبه‌ای تحت ضربات سرعت بالا مورد بررسی قرار خواهد گرفت. نمونه ورق‌هایی با ساختار و لایه چینی مشخص با و بدون چوب پنبه تحت ضربات سرعت بالا در رنج سرعتی ۱۱۰ تا ۱۸۰ متر بر ثانیه قرار خواهند گرفته و حد بالستیک، سرعت باقی مانده و آسیب در این ساختارها مورد مطالعه و مقایسه قرار خواهد گرفت. این مطالعه تلاش دارد تا با استفاده از آزمایش‌های تجربی و تحلیل داده‌ها، درک بهتری از مکانیزم‌های گسیختگی، جذب انرژی و پتانسیل چوب پنبه به عنوان یک ماده زیست‌سازگار در طراحی سازه‌های مقاوم در برابر ضربه فراهم کند.



شکل ۴) نمایی از دستگاه آزمایش و نمونه قرارداده شده در فیکسچر.

۲-۴- دستگاه آزمایش

برای انجام آزمایش بالستیک، از دستگاه تفنگ گازی تک مرحله ای موجود در دانشگاه تربیت مدرس (شکل ۴) استفاده شد که از یک شیر برقی سلونوئیدی برای اتصال محفظه ذخیره گاز به انتهای لوله شلیک بهره می برد. محفظه ذخیره گاز توسط یک کپسول تغذیه یا کمپرسور پرفشار شارژ می شود. با فعال کردن کلید برقی شیر سلونوئیدی، گاز ذخیره شده به طور ناگهانی آزاد شده و فشار مورد نیاز برای شلیک پرتابه را تأمین می کند. سرعت اولیه پرتابه توسط عوامل مختلفی تعیین می شود، از جمله فشار گاز در محفظه ذخیره، نوع و ویژگی های گاز (مانند جرم مولکولی و دما)، جرم و شکل پرتابه، قطر و طول لوله شلیک، و تلورانس هندسی بین پرتابه و لوله. سرعت پرتابه در لحظه خروج از لوله با استفاده از یک سیستم سرعت سنج مبتنی بر لیزر اندازه گیری می شود. این سیستم شامل دو نور لیزری متمرکز است که پرتابه هنگام عبور از آن ها، نور را قطع کرده و دستگاه با اندازه گیری فاصله این دو نور و زمان عبور، سرعت پرتابه را تخمین می زند. سرعت پرتابه قبل از برخورد با سیستم لیزری دوگانه اندازه گیری و داده ها توسط دوربین های پرسرعت ثبت می شوند.

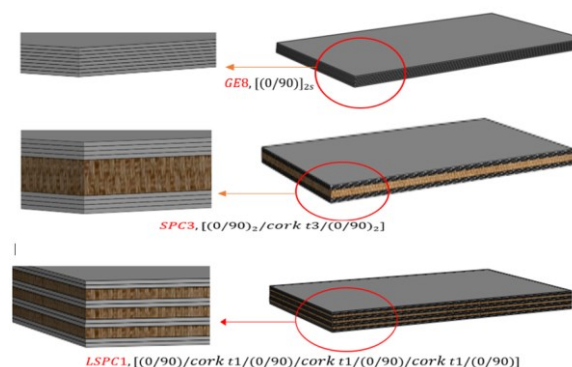
۲-۵- آزمون بالستیک

نمونه ها با ابعاد استاندارد در چارچوب فلزی دستگاه محکم شده و شرایط مرزی به گونه ای تنظیم گردید که از جابه جایی یا ارتعاش ناخواسته جلوگیری شود. سطح مؤثر سازه ساندویچی برای نفوذ پرتابه در این محفظه، دایره ای به قطر ۷/۵ سانتی متر می باشد. پرتابه مورد استفاده در این آزمون یک استوانه سر کروی با وزن ۹/۳۲ گرم می باشد که مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است. سرعت پرتابه با تنظیم فشار گاز در دستگاه کنترل می شود.

قرار گرفته است. این مرحله برای تکمیل پلیمریزاسیون رزین و ایجاد



شکل ۲) سطح مقطع و نوع ساختار نمونه های ساندویچی

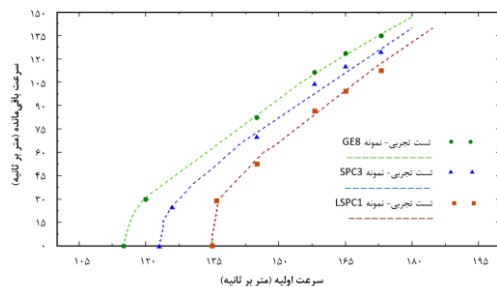


شکل ۳) انواع ساختارهای ساخته شده به همراه نوع لایه چینی و کد اختصار.

ساختاری پایدار و یکنواخت در نمونه ها ضروری بود. پس از خنک شدن قالب، نمونه ها با دقت از قالب جدا شده و سطوح آن ها تمیز و صاف شدند. ضخامت نهایی نمونه ها در تمامی نمونه های ساده برابر با ۳ میلی متر و نمونه های ساندویچی برابر ۶ میلی متر می باشد که با دقت اندازه گیری و تأیید شدند. این روش تولید، نمونه هایی با کیفیت بالا و تکرارپذیری مطلوب را برای انجام آزمایش های ضربه سرعت بالا فراهم کرده است.

۲-۳- کد گذاری نمونه ها

برای تسهیل درک نمونه ها و پیگیری نتایج آزمایش ها، هر نمونه با کدی مختصر و توصیفی شناسایی شده است. نمونه اول به صورت *GE8 (Glass-Epoxy -8 layers)* نام گذاری شده که نشان دهنده یک صفحه کامپوزیتی شیشه-اپوکسی با ۸ لایه است. نمونه دوم با رویه های شیشه-اپوکسی و هسته چوب پنبه ای به ضخامت ۳ میلی متر را توصیف می کند. نمونه سوم نیز با کد *LSPC1 (Layered, Sandwich Panel, Cork 1mm)* نام گذاری شده که بیانگر یک ساختار لایه ای متناوب، متشکل از لایه های شیشه-اپوکسی و چوب پنبه است. در شکل ۳ انواع ساختارهای ساخته شده به همراه نوع لایه چینی و کد اختصاص یافته مربوطه نشان داده شده است.

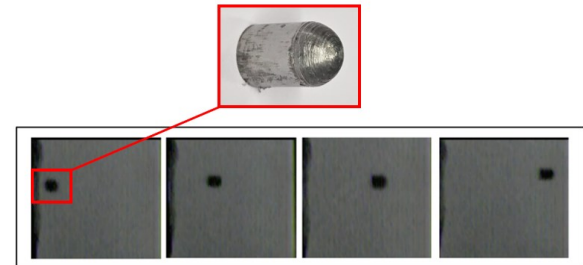


شکل ۶) منحنی تغییرات سرعت باقی‌مانده نسبت به سرعت اولیه برای سه نوع.

GE8 دارای حد بالستیک ۱۱۵ متر بر ثانیه می‌باشد. با عبور از این حد، سرعت باقی‌مانده پرتابه به‌صورت خطی افزایش یافت که این رفتار به محدودیت در مکانیزم‌های جذب انرژی و افزایش تمرکز تنش در ساختار یکپارچه مربوط می‌شود. این رفتار ناشی از خواص ترد و سخت کامپوزیت است که منجر به شکست سریع پس از نفوذ می‌شود. نمونه SPC3 حد بالستیک کمتری معادل ۱۲۳ متر بر ثانیه نشان داد که کاهش آن به سختی کلی کمتر این ساختار نسبت داده می‌شود. با این حال، رفتار غیرخطی سرعت باقی‌مانده پس از نفوذ، عملکرد مؤثر هسته چوب‌پنبه را در جذب انرژی نشان می‌دهد. در مقابل، نمونه LSPC1 حد بالستیک بالاتری معادل ۱۳۵ متر بر ثانیه داشت، که نشان‌دهنده توانایی بهتر این ساختار در جذب انرژی و توزیع تنش به‌صورت مؤثرتر است. این به این معناست که پرتابه برای نفوذ کامل در نمونه LSPC1 به سرعت و در نتیجه انرژی جنبشی بیشتری نیاز دارد. ترکیب لایه‌های چوب‌پنبه و کامپوزیت در LSPC1 منجر به کاهش تمرکز تنش و تأخیر در گسیختگی شده است. مقایسه نمونه‌های GE8 و SPC3 نشان می‌دهد که افزودن یک لایه کرک ۳ میلی‌متری به صورت ساندویچی در مرکز ساختار، حد بالستیک را از ۱۱۵ به ۱۲۳ متر بر ثانیه افزایش داده است. این بهبود ناشی از توانایی کرک در جذب انرژی و توزیع تنش ضربه است. نمونه SPC3 همچنین پس از عبور از حد بالستیک، سرعت باقیمانده کمتری نسبت به GE8 نشان داد که عملکرد بهتر آن در کاهش انتقال تنش و بهبود رفتار مکانیکی در برابر نفوذ را تأیید می‌کند. مقایسه نمونه‌های SPC3 و LSPC1 نشان می‌دهند که توزیع لایه‌لایه کرک، حد بالستیک را به ۱۳۵ متر بر ثانیه افزایش داده است. این روش باعث توزیع یکنواخت‌تر تنش و فعال شدن مکانیزم‌های چندگانه جذب انرژی مانند فشردگی در کرک و تغییر شکل در لایه‌های کامپوزیت شده است. و مقاومت کلی سازه را در برابر ضربه افزایش داده است. از طرفی نتایج فوق به طور کامل با نتایج مرجع [۱۸] همخوانی دارد به طوری که نتایج سرعت حد بالستیک و سرعت باقی‌مانده در نمونه‌های حاضر و نمونه‌های مرجع تقریباً باهم برابر می‌باشند.

جدول ۱) مشخصات پرتابه

مشخصات	مقادیر
طول (میلی‌متر)	۱۶/۷۵
قطر (میلی‌متر)	۱۰
وزن (گرم)	۹/۳۲
سختی (راکول سی)	۵۶



شکل ۵) تصاویر بدست آمده از دوربین پرسرعت (ضربه زننده در چهار فریم متوالی).

در طول آزمون، پرتابه با سرعت به مرکز نمونه برخورد می‌کند. انرژی جنبشی پرتابه قبل و بعد از برخورد محاسبه می‌شود تا میزان انرژی جذب‌شده توسط نمونه تعیین گردد. همچنین از دوربین‌های سرعت بالا که قابلیت ثبت ۳۰۰۰ فریم در ثانیه را دارد برای بدست آوردن سرعت خروجی پرتابه، استفاده شد. این دوربین در مسیر پرتابه قرار داده شد تا لحظات عبور پرتابه از نمونه‌ها را با وضوح بالا ضبط کند. تصاویر ثبت‌شده مطابق شکل ۵ امکان اندازه‌گیری سرعت خروجی را فراهم می‌کند. برای هر سرعت مشخص، به منظور افزایش دقت و کاهش خطا، سه آزمایش تکرار شد و میانگین داده‌ها برای تحلیل استفاده گردید. پس از آزمون، نمونه‌ها از دستگاه جدا شده و تحت بررسی‌های دقیق قرار گرفتند. مودهای گسیختگی از جمله ترک‌خوردگی، لایه‌لایه شدن، و شکست در هسته یا رویه‌ها تحلیل شدند. داده‌های ثبت‌شده شامل سرعت برخورد، سرعت باقیمانده و تصاویر تغییر شکل نمونه‌ها استخراج شد تا برای مقایسه و ارزیابی عملکرد نمونه‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- سرعت باقی‌مانده پرتابه و حد بالستیک

نتایج سرعت حد بالستیک نمونه‌ها، که با روش تجربی به‌دست آمده است، در نمودار شکل ۶ نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، رفتار نمودار در سرعت‌های بالاتر از حد بالستیک روندی خطی دارد، اما با نزدیک شدن به حد بالستیک، این روند به‌صورت غیرخطی تغییر می‌کند. به‌ویژه، در برخوردهایی با سرعت نزدیک به حد بالستیک، کاهش سرعت باقی‌مانده پرتابه به طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از نمونه‌های GE8، SPC3 و LSPC1 نشان‌دهنده تأثیر ساختار و ترکیب مواد بر رفتار مکانیکی این سازه‌ها تحت ضربه با سرعت بالا است. نمونه

۳-۳- مکانیزم آسیب

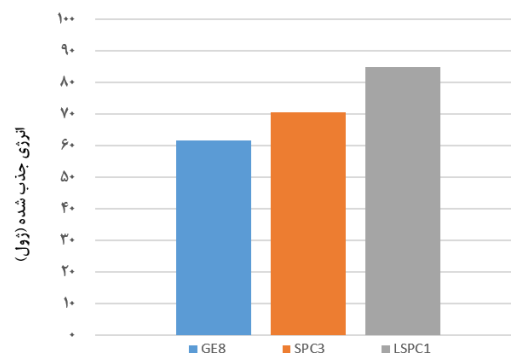
در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ تصویر نمونه‌ها بعد از انجام تست ضربه سرعت بالا نشان داده شده است. همانطور که در تصاویر نمونه‌ها مشهود است، سطح و مقدار آسیب در نمونه‌ها بسیار متفاوت هست. که این مهم حاکی از تاثیر قابل توجه پیکربندی لایه‌های چوب‌پنبه بر نحوه تخریب نمونه‌ها در ضربه سرعت بالا دارد.

نمونه GE8 (شکل ۸)، که فاقد لایه‌های چوب‌پنبه است، بیشترین سطح آسیب را نشان دارد. برآمدگی قابل توجه، شکاف‌های بزرگ و گسترده و جدایش بین لایه‌ای وسیع در وجه پشتی این نمونه، نشان‌دهنده عدم توانایی کافی این نمونه در جذب موثر انرژی ضربه و مقاومت در برابر نفوذ پرتابه می‌باشد. در مقابل، نمونه LSPC1 (شکل ۹) بهترین عملکرد را در بین نمونه‌ها از خود نشان می‌دهد. کاهش چشمگیر ناحیه آسیب، کوچکتر شدن برآمدگی و محدود شدن ناحیه جدایش بین لایه‌ای در وجه پشتی این نمونه، به وضوح نقش موثر لایه‌های نازک و متناوب چوب‌پنبه در جذب موثرتر انرژی ضربه و محدود کردن گسترش تخریب را نشان می‌دهد. این رفتار به دلیل توزیع یکنواخت‌تر تنش و جذب تدریجی و چندمرحله‌ای انرژی در طول ضخامت کامپوزیت رخ می‌دهد. در این پیکربندی، لایه‌های چوب‌پنبه به عنوان موانع فیزیکی در برابر رشد ترک‌های ایجاد شده در ماتریس و همچنین عامل محدود کننده جدایش بین لایه‌ای عمل می‌کنند. به عبارتی، در هر فصل مشترک کامپوزیت/چوب‌پنبه، هسته (چوب‌پنبه)، تحت فشار ناشی از ضربه، بخش قابل توجهی از انرژی ضربه را بدلیل تغییر شکل پلاستیک سلول‌های خود تحت کمانش و لهیدگی جذب می‌کند. علاوه بر این، به دلیل توزیع لایه‌ای چوب‌پنبه در پنبه در کامپوزیت، انتقال و توزیع تنش بین این دو نوع لایه به صورت موثرتری انجام می‌شود. این جذب انرژی مرحله‌ای و یکنواخت‌تر، از تمرکز بیش از حد تنش در یک ناحیه خاص جلوگیری کرده و منجر به کاهش تنش‌های فشاری و کششی مخرب در لایه‌های کامپوزیت می‌شود.

آسیب وارده به نمونه SPC3 (شکل ۱۰) نشان می‌دهد که این نمونه عملکردی بینابین دو دیگر دارد. اگرچه این نمونه نسبت به نمونه GE8 مقاومت بهتری در برابر ضربه نشان می‌دهد، اما به وضوح از نمونه LSPC1 ضعیف‌تر عمل کرده می‌کند. این رفتار ناشی از تمرکز لایه ضخیم‌تر چوب‌پنبه در مرکز کامپوزیت و توزیع غیریکنواخت آن در کل ضخامت نمونه است. در واقع، لایه ضخیم چوب‌پنبه در نمونه SPC3 نمی‌تواند به اندازه لایه‌های نازک و متناوب در نمونه LSPC1 در جذب موثر و یکنواخت انرژی و جلوگیری از گسترش وسیع تخریب عمل کند. در این حالت، جذب انرژی بیشتر در یک ناحیه محدود صورت پذیرفته و لایه‌های کامپوزیت دورتر از مرکز، کمتر از مزایای جذب انرژی چوب‌پنبه بهره‌مند می‌شوند.

۳-۲- انرژی جذب شده

نمودار جذب انرژی هر سه ساختار مورد مطالعه در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که نمونه GE8 با مقدار جذب انرژی ۶۱/۶ ژول ضعیف‌ترین عملکرد را در این بین دارد. که ناشی از ساختار یکپارچه آن است. افزودن چوب‌پنبه به عنوان هسته در نمونه ساندویچی SPC3 باعث افزایش انرژی جذب شده به ۷۰/۵ ژول شده که نشان‌دهنده نقش مؤثر چوب‌پنبه در توزیع تنش و جذب انرژی است. همچنین توزیع لایه‌لایه چوب‌پنبه در سازه (نمونه LSPC1) سبب بهترین عملکرد در این بین با جذب انرژی ۸۴/۹ ژول شده است. که بیانگر تأثیر مثبت توزیع یکنواخت‌تر چوب‌پنبه در فعال‌سازی مکانیزم‌های چنگانه جذب انرژی و کاهش تنش ضربه است. در جدول ۲ سرعت باقی‌مانده و جذب انرژی هر سه نمونه در سرعت های مختلف پرتابه ارائه شده است.



شکل ۷) انرژی جذب شده برای هر سه نمونه

جدول ۲) سرعت باقی مانده و جذب انرژی هر سه نمونه در سرعت های مختلف پرتابه.

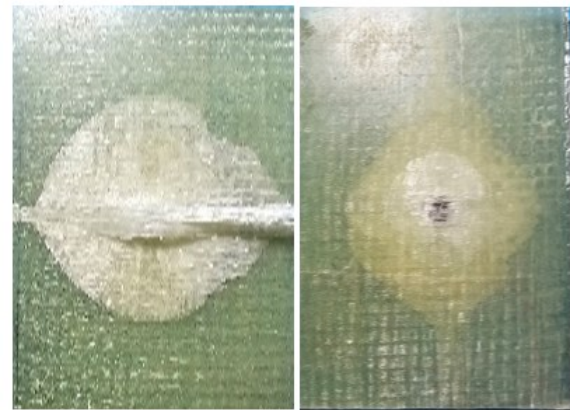
جذب انرژی (ژول)	سرعت باقی مانده (متر بر ثانیه)	سرعت برخورد (متر بر ثانیه)	نام نمونه
۶۱/۶	۰	۱۱۵	GE8
۵۸/۸	۱۱۴/۴	۱۵۸	
۵۵/۱	۱۳۴/۹	۱۷۳	
۷۰/۵	۰	۱۲۳	SPC3
۶۶/۲	۱۰۴	۱۵۸	
۶۳/۳	۱۲۸/۱	۱۷۳	
۸۵/۳	۰	۱۳۵	LSPC1
۸۱/۸۱	۸۶/۵	۱۵۸	
۷۹/۷	۱۱۳/۶	۱۷۳	

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش به بررسی جامع رفتار ورق ساندویچی با رویه شیشه/اپوکسی و هسته چوب پنبه در برابر بارگذاری ضربه سرعت بالا پرداخته و نقش حیاتی پیکربندی این لایه‌ها را در بهبود مقاومت در برابر ضربه نشان می‌دهد. نتایج حاصل از آزمایش‌های ضربه سرعت بالا، شامل بررسی سرعت حد بالستیک، سرعت باقی‌مانده، جذب انرژی و تحلیل دقیق آسیب، همگی بر عملکرد فوق‌العاده نمونه LSPC1 صحنه می‌گذارند. نمونه LSPC1 با ثبت بالاترین سرعت بالستیک در بین دیگر نمونه‌های مورد آزمایش، به وضوح نشان داد که توزیع یکنواخت لایه‌های نازک چوب پنبه در ساختار کامپوزیت، مقاومت در برابر نفوذ پرتابه را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد. این افزایش مقاومت، مستقیماً به جذب انرژی چند مرحله‌ای و تدریجی در فصل مشترک‌های کامپوزیت/چوب پنبه و تغییر شکل پلاستیک سلول‌های چوب پنبه تحت کم‌انرژی و لهیدگی وابسته است. نمونه LSPC1 با جذب ۸۴/۹ ژول انرژی، به طور موثری انرژی جنبشی پرتابه را مستهلک کرد. این جذب انرژی بالا، با کاهش چشمگیر آسیب و تخریب در نمونه LSPC1 همراه بود. بررسی دقیق تصاویر نمونه‌ها، برآمدگی، شکاف‌ها و ناحیه جدایش بین لایه‌ای به مراتب کمتری را در نمونه LSPC1 در مقایسه با نمونه‌های GE8 (فاقد چوب پنبه) و SPC (دارای لایه ضخیم چوب پنبه در مرکز) آشکار ساخت. این یافته‌ها به وضوح نقش لایه‌های نازک و متناوب چوب پنبه را به عنوان جاذب‌های موثر انرژی و موانع فیزیکی در برابر رشد ترک و گسترش آسیب در ساختار کامپوزیت اثبات می‌کنند. مقایسه عملکرد نمونه‌های LSPC1 و SPC نشان دادند که توزیع یکنواخت و متناوب لایه‌های نازک چوب پنبه، به مراتب موثرتر از استفاده از یک لایه ضخیم چوب پنبه در مرکز کامپوزیت است. این امر بر اهمیت طراحی بهینه و مهندسی دقیق ساختار لایه‌چینی در کامپوزیت‌های هیبریدی، به منظور دستیابی به عملکرد بالستیک برتر تأکید می‌کند. نتایج به دست آمده، زمینه را برای طراحی و تولید سازه‌های کامپوزیتی سبک، مستحکم و با عملکرد بالستیک بهینه برای کاربردهای مختلف مهندسی، به ویژه در صنایع هوافضا، خودروسازی و تجهیزات حفاظتی فراهم می‌آورد.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

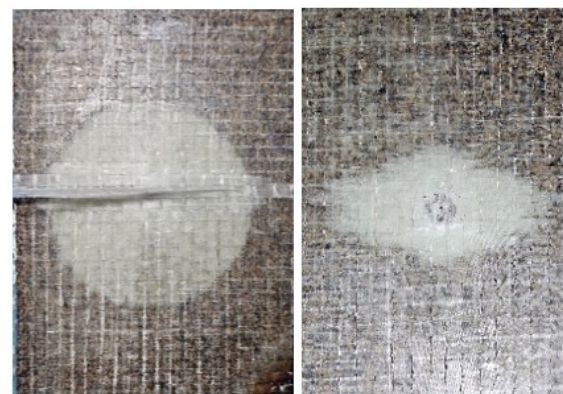
تعارض منافع: در این مقاله هیچ تعارض منافعی برای اظهار وجود ندارد.



شکل ۸) نمونه GE8 تحت برخورد پرتابه با سرعت ۱۵۸ متر بر ثانیه.
الف) جلو نمونه. ب) پشت نمونه.



شکل ۹) نمونه LSPC1 تحت برخورد پرتابه با سرعت ۱۵۸ متر بر ثانیه.
الف) جلو نمونه. ب) پشت نمونه.



شکل ۱۰) نمونه SPC3 تحت برخورد پرتابه با سرعت ۱۵۸ متر بر ثانیه.
الف) جلو نمونه. ب) پشت نمونه.

- 15- Ptak M, Kaczynski P, Fernandes FA, de Sousa RA. Assessing impact velocity and temperature effects on crashworthiness properties of cork material. *International Journal of Impact Engineering*. 2017 Aug 1;106:238-48.
- 16- Sánchez-Sáez S, Barbero E, Cirne J. Experimental study of agglomerated-cork-cored structures subjected to ballistic impacts. *Materials Letters*. 2011 Jul 31;65(14):2152-4.
- 17- Amaro AM, Reis PN, Ivañez I, Sánchez-Saez S, Garcia-Castillo SK, Barbero E. The high-velocity impact behaviour of kevlar composite laminates filled with cork powder. *Applied Sciences*. 2020 Sep 3;10(17):6108.
- 18- Ivañez I, Sánchez-Saez S, Garcia-Castillo SK, Barbero E, Amaro A, Reis PN. High-velocity impact behaviour of damaged sandwich plates with agglomerated cork core. *Composite Structures*. 2020 Sep 15;248:112520.
- 19- Gomez A, Barbero E, Sanchez-Saez S. Modelling of carbon/epoxy sandwich panels with agglomerated cork core subjected to impact loads. *International Journal of Impact Engineering*. 2022 Jan 1;159:104047.
- 20- Gomez A, Sanchez-Saez S, Barbero E. Experimental analysis of the impact behaviour of sandwich panels with sustainable cores. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2023 Mar 1;166:107383.
- 21- Sutherland LS, Soares CG. Impact resistance of cork-skinned marine PVC/GRP sandwich laminates. *Thin-Walled Structures*. 2022 Nov 1;180:109830.
- 22- Sergi C, Sarasini F, Russo P, Vitiello L, Barbero E, Sanchez-Saez S, Tirillò J. Experimental and numerical analysis of the ballistic response of agglomerated cork and its bio-based sandwich structures. *Engineering Failure Analysis*. 2022 Jan 1;131:105904.
- 23- Gómez A, Sanchez-Saez S, Barbero E. Compression impact behaviour of agglomerated cork at intermediate strain rates. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2021 Mar;79(2):381-96.

منابع

- 1- Buitrago BL, García-Castillo SK, Barbero E. Influence of shear plugging in the energy absorbed by thin carbon-fibre laminates subjected to high-velocity impacts. *Composites Part B: Engineering*. 2013 Jun 1;49:86-92.
- 2- Abtew MA, Boussu F, Bruniaux P, Loghini C, Cristian I. Ballistic impact mechanisms—a review on textiles and fibre-reinforced composites impact responses. *Composite Structures*. 2019 Sep 1;223:110966.
- 3- Wang J, Waas AM, Wang H. Experimental and numerical study on the low-velocity impact behavior of foam-core sandwich panels. *Compos Struct*. 2013;96:298-311.
- 4- Griškevičius P, Zeleniakienė D, Leišis V, Ostrowski M. Experimental and numerical study of impact energy absorption of safety important honeycomb core sandwich structures. *Materials Science*. 2010;16(2):119-23.
- 5- Ivañez I, Sanchez-Saez S. Numerical modelling of the low-velocity impact response of composite sandwich beams with honeycomb core. *Composite Structures*. 2013 Dec 1;106:716-23.
- 6- Feng D, Aymerich F. Effect of core density on the low-velocity impact response of foam-based sandwich composites. *Composite Structures*. 2020 May 1;239:112040.
- 7- Andrew JJ, Srinivasan SM, Arockiarajan A, Dhakal HN. Parameters influencing the impact response of fiber-reinforced polymer matrix composite materials: A critical review. *Composite Structures*. 2019 Sep 15;224:111007.
- 8- Zenkert D, Shipsha A, Bull P, Hayman B. Damage tolerance assessment of composite sandwich panels with localised damage. *Composites Science and Technology*. 2005 Dec 1;65(15-16):2597-611.
- 9- Sun G, Chen D, Wang H, Hazell PJ, Li Q. High-velocity impact behaviour of aluminium honeycomb sandwich panels with different structural configurations. *International Journal of Impact Engineering*. 2018 Dec 1;122:119-36.
- 10- Khodadadi A, Liaghat G, Bahramian AR, Ahmadi H, Anani Y, Asemani S, Razmkhah O. High velocity impact behavior of Kevlar/rubber and Kevlar/epoxy composites: a comparative study. *Composite Structures*. 2019 May 15;216:159-67.
- 11- Sarasini F, Tirillò J, Lampani L, Sasso M, Mancini E, Burgstaller C, Calzolari A. Static and dynamic characterization of agglomerated cork and related sandwich structures. *Composite Structures*. 2019 Mar 15;212:439-51.
- 12- Boria S, Raponi E, Sarasini F, Tirillò J, Lampani L. Green sandwich structures under impact: experimental vs numerical analysis. *Procedia Structural Integrity*. 2018 Jan 1;12:317-29.
- 13- Silva FG, De Moura MF, Magalhães AG. Low velocity impact behaviour of a hybrid carbon-epoxy/cork laminate. *Strain*. 2017 Dec;53(6):e12241.
- 14- Castilho T, Sutherland LS, Soares CG. Impact resistance of marine sandwich composites. *Maritime Technology and Engineering*. London: Taylor & Francis Group. 2015:607-18.