



## بررسی رفتار ساندویچ پنل‌های با هسته چوب‌پنبه متراکم شده تحت نفوذ شبه‌استاتیک و بارگذاری خمشی سه‌نقطه‌ای

هادی وحیدی، احمد گرامی، حامد احمدی\*، غلامحسین لیاقت

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
\* ایمیل نویسنده مسئول: h\_ahmadi@modares.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۳ اسفند ۱۴۰۳

پذیرش: ۱۱ اردیبهشت ۱۴۰۴

کلیدواژگان:

ساندویچ پنل

چوب‌پنبه

نفوذ شبه‌استاتیک

خمشی سه‌نقطه‌ای

جذب انرژی

این پژوهش به بررسی تجربی رفتار مکانیکی ساندویچ پنل‌های نوآورانه با هسته چوب‌پنبه متراکم‌شده تحت آزمون‌های نفوذ شبه‌استاتیک و خمشی سه‌نقطه‌ای می‌پردازد. دو نوع هسته چوب‌پنبه، شامل چوب‌پنبه خشک (SPDC3) و چوب‌پنبه با پرکننده لاستیک (SPC3)، به صورت یکپارچه و نمونه‌ای لایه‌ای (LSPC1) از چوب‌پنبه همراه پرکننده لاستیک، مورد بررسی قرار گرفتند. رویه‌ی تمام نمونه‌های ساندویچی از جنس کامپوزیت الیاف شیشه/اپوکسی با چگالش ۰ و ۹۰ درجه می‌باشد. یک نمونه ورق کامپوزیتی (GE8) نیز به عنوان نمونه مرجع به منظور مقایسه عملکرد در نظر گرفته شد. اگرچه نتایج آزمون خمشی نشان دادند که نمونه GE8 استحکام خمشی بالاتری نسبت به نمونه‌های ساندویچی دارد، اما رفتار ترد و شکست ناگهانی آن در مقایسه با رفتار نرم‌تر نمونه‌های ساندویچی از نقاط ضعف آن به‌شمار می‌رود. در آزمون نفوذ، نمونه SPDC3 به دلیل مکانیزم خردشدن هسته، بیشترین جذب انرژی را از خود نشان داد. نتایج نشان دادند که حضور پرکننده لاستیکی در چوب‌پنبه، در بارگذاری شبه‌استاتیک، تأثیر مثبتی بر مقاومت به نفوذ و جذب انرژی ندارد. نمونه LSPC1 اگرچه استحکام خمشی کمتری نسبت به SPDC3 داشت، اما به دلیل ساختار لایه‌ای، جابجایی نهایی بیشتر و قابلیت بازگشت به حالت اولیه پس از باربرداری را از خود نشان داد. این ویژگی می‌تواند در کاربردهایی که به شکل‌پذیری و حفظ یکپارچگی سازه نیاز است، حائز اهمیت باشد. بررسی‌های آسیب‌شناسی، مکانیزم‌های تخریب متفاوتی را شامل شکست ترد الیاف در GE8، جدایش بین‌لایه‌ای در LSPC1، و خردشدن هسته در SPDC3 و SPC3 نشان دادند. با وجود استحکام خمشی بالاتر نمونه مرجع (GE8)، ساندویچ پنل‌های با هسته چوب‌پنبه، به ویژه نمونه SPDC3، به دلیل جذب انرژی قابل توجه در آزمون نفوذ و رفتار نرم‌تر در خمشی، پتانسیل کاربردی مناسبی در صنایع مختلف از خود نشان می‌دهند.

## Behavior of sandwich panels with expanded cork agglomerate cores under quasi-Static indentation and three-point bending

Hadi Vahidi, Ahmad Gerami, Hamed Ahmadi\*, Gholam Hossein Liaghat

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

\* Corresponding Author's Email: h\_ahmadi@modares.ac.ir

### Article Information

#### Original Research Paper

Received: 21 February 2025

Accepted: 1 May 2025

#### Keywords:

Sandwich Panel

Cork Agglomerate

Quasi-Static Indentation

Three-Point Bending

Energy Absorption

### Abstract

This research experimentally investigates the mechanical behavior of innovative sandwich panels with expanded cork agglomerate cores under quasi-static indentation and three-point bending tests. Two types of cork cores, including dry cork (SPDC3) and cork with rubber particles (SPC3), were used in a monolithic configuration, while a layered core configuration (LSPC1) consisting of alternating layers of cork with rubber particles and glass fiber/epoxy composite was also examined. The face sheets of all sandwich panels were made of glass fiber/epoxy composite with a 0/90 layup. A reference specimen, an 8-layer glass fiber/epoxy composite plate (GE8), was also tested for comparison. The indentation test results showed that the SPDC3 sample exhibited the highest energy absorption due to the core crushing mechanism, whereas the presence of rubber particles had a negative effect on both indentation resistance and energy absorption under quasi-static loading. In the bending test, the GE8 sample demonstrated the highest flexural strength but failed in a brittle manner. In contrast, the SPDC3 sample, despite having lower flexural strength than GE8, exhibited significantly higher energy absorption (16.5 J compared to 9.43 J) due to the core crushing mechanism. The LSPC1 sample, while having lower flexural strength than SPDC3, showed the highest ultimate displacement (31.9 mm) and recovered to its original shape after unloading, indicating a unique ductility. Damage analysis revealed different failure mechanisms, including brittle fiber failure in GE8, delamination in LSPC1, and core crushing in SPDC3 and SPC3. Although the reference sample (GE8) showed higher flexural strength, the sandwich panels with expanded cork agglomerate cores, especially those with dry cork, demonstrated considerable potential in applications requiring high energy absorption and a more ductile behavior under quasi-static loading, highlighting the high potential of these novel materials as a suitable alternative to traditional structures.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Vahidi H, Gerami A, Ahmadi H, Liaghat GH. Behavior of sandwich panels with expanded cork agglomerate cores under quasi-Static indentation and three-point bending. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Jun 22;12(4):16-28. doi: 10.22034/ijme.2025.507790.2050 [In Persian]

## ۱- مقدمه

ساختارهای ساندویچی به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فردشان، کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف، از جمله هوافضا، خودروسازی، ساختمان‌سازی و دریایی دارند. این ساختارها از سه بخش اصلی تشکیل شده‌اند: دو لایه بیرونی نازک با مقاومت و سختی بالا و یک هسته میانی سبک و انعطاف‌پذیر. وظیفه اصلی هسته، ایجاد فاصله بین دو لایه بیرونی و تحمل تغییر شکل‌های ناشی از بارگذاری است. همچنین، هسته معمولاً خواص عایق حرارتی و صوتی را نیز فراهم می‌کند. تنوع در جنس و ضخامت لایه‌های بیرونی و هسته میانی، امکان تولید ساختارهای ساندویچی با ویژگی‌ها و عملکردهای گوناگون را فراهم می‌آورد [۱-۳].

در سال‌های اخیر، استفاده از مواد طبیعی و پایدار در ساخت این سازه‌ها، به دلیل نگرانی‌های زیست‌محیطی، مورد توجه ویژه‌ای واقع شده است. رفتار مکانیکی چوب‌پنبه آگلومره در شرایط مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است، از جمله فشار [۴، ۵]، بارگذاری کششی [۴] و خمش سه نقطه‌ای [۶-۸].

اگرچه کاربرد چوب‌پنبه به‌واسطه چگالی پایین، قابلیت تراکم‌پذیری و بازیابی ابعادی بالا، نفوذپذیری ناچیز در برابر مایعات و گازها، و همچنین ساختار سلولی منحصربه‌فرد و حضور سوپرین به‌عنوان ترکیب شیمیایی اصلی [۹، ۱۰]، در سال‌های اخیر مورد توجه فزاینده‌ای قرار گرفته است، اما مطالعات محدودی به بررسی کاربرد چوب‌پنبه متراکم به‌عنوان هسته در پانل‌های ساندویچی پرداخته‌اند. این ماده علاوه بر کاربردهای سنتی مانند عایق حرارتی و صوتی، به‌عنوان هسته در ساختارهای ساندویچی و همچنین لایه داخلی یا بالشتک در تجهیزات جذب انرژی استفاده می‌شود که آن را به گزینه‌ای ایده‌آل برای کاربردهای متنوع صنعتی تبدیل کرده است [۱۰].

اسوالدو کاسترو و همکاران [۱۱] در مطالعه‌ای به مقایسه رفتار مکانیکی پانل‌های ساندویچی با هسته فومی و چوب‌پنبه‌ای تحت خمش استاتیک و ضربه پرداختند. نتایج این پژوهش نشان دادند که پانل‌های دارای هسته چوب‌پنبه عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند، به‌طوری که این پانل‌ها در مقایسه با نمونه‌های دارای هسته فومی، نیروی ضربه حداکثری بیشتری را تحمل کرده، انرژی ضربه را بهتر جذب می‌کنند و در عین حال، عمق آسیب کمتری را متحمل می‌شوند. چن-شی لیو و همکاران [۱۲] به بررسی استفاده از چوب‌پنبه به‌عنوان هسته در سازه‌های ساندویچی سازگار با محیط زیست پرداختند. در این تحقیق، رویه‌های آلومینیومی مورد استفاده قرار گرفته و رفتار خمشی و مودهای شکست این سازه‌ها ارزیابی شده است. نتایج حاکی از آن است که این ساختارهای ساندویچی دارای راندمان بالای مکانیکی و عملکرد بهینه از نظر زیست‌محیطی و بهره‌وری منابع هستند. هاچمن و همکاران [۱۳] به بررسی تأثیر چگالی چوب‌پنبه و انرژی ضربه بر رفتار ساندویچ‌پنل‌های کنف/اپوکسی-چوب‌پنبه تحت آزمایش‌های ضربه و نفوذ پرداختند. نتایج نشان دادند که چگالی چوب‌پنبه و انرژی ضربه بر نیروی شروع آسیب، حداکثر نیرو و اندازه آسیب تأثیر می‌گذارند و چوب‌پنبه متراکم‌تر ظرفیت اتلاف انرژی کمتری دارد. ساترلند و همکاران [۱۴] تأثیر افزودن یک لایه نازک از چوب‌پنبه بر مقاومت در برابر نفوذ ساندویچ‌پنل‌های کامپوزیتی با هسته فومی را بررسی کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که این لایه چوب‌پنبه‌ای قادر است مقاومت به سوراخ‌شدن در برابر نفوذ شبه‌استاتیک و ضربه را تا ۶۰٪ افزایش دهد. این یافته‌ها نشان می‌دهند که استفاده از یک لایه نازک چوب‌پنبه می‌تواند به شکل قابل‌توجهی مقاومت به سوراخ‌شدن ساندویچ‌پنل‌های کامپوزیتی با هسته فومی را بهبود بخشد و عملکرد مکانیکی این سازه‌ها را ارتقا دهد. لاکرب و همکاران [۱۵] در مطالعه‌ای عملکرد ساندویچ‌پنل‌های با هسته چوب‌پنبه متراکم‌شده و رویه‌های از جنس چوب کاج را تحت آزمون خمش بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که هسته چوب‌پنبه عملکرد بسیار خوبی در برابر فشار از خود نشان می‌دهد و افزایش تعداد لایه‌های به‌کاررفته در ساختار ساندویچ‌پنل به بهبود عملکرد مکانیکی آن منجر می‌شود. فرناندس و همکاران [۱۶] به بررسی عملکرد ساندویچ‌پنل‌های با هسته چوب‌پنبه متراکم‌شده و رویه‌های الیاف کتان/رزین تحت آزمون‌های خمش پرداختند. یافته‌ها نشان دادند که این ساختارهای ساندویچی طبیعی، از نظر خواص مکانیکی، با نمونه‌های مصنوعی مشابه (الیاف شیشه/اپوکسی) رقابت‌پذیر هستند. علی‌رغم تفاوت در جنس رویه‌ها با پژوهش حاضر، این مطالعه نشان‌دهنده کارایی چوب‌پنبه به‌عنوان یک هسته طبیعی با عملکرد مکانیکی مطلوب در ساختارهای ساندویچی می‌باشد. نووا و همکاران [۱۷] کاربرد چوب‌پنبه سیاه تجاری و اصلاح‌شده را به‌عنوان هسته ساندویچی با رویه‌های کامپوزیت الیاف شیشه/اپوکسی تحت آزمون‌های خمش سه نقطه‌ای و چهار نقطه‌ای بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که علی‌رغم افزایش چگالی در نمونه‌های اصلاح‌شده با ستون‌های پلیمری، استحکام برشی و مدول برشی به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. این مطالعه بر پتانسیل چوب‌پنبه،

به‌ویژه نوع اصلاح‌شده، به‌عنوان یک هسته کارآمد با عملکرد خمشی و برشی مطلوب تأکید دارد. کوریا و همکاران [۱۸] به بررسی کاربرد چوب‌پنبه متراکم‌شده به‌عنوان هسته ساندویچی در تخته موج‌سواری پرداختند و خواص مکانیکی آن را از طریق آزمایش‌های کشش، فشار و خمش بررسی کرده است. نتایج نشان دادند که چوب‌پنبه متراکم‌شده علی‌رغم افزایش جزئی وزن، می‌تواند بارهای قابل‌توجهی را تحمل کرده و اثرات زیست‌محیطی را به‌میزان قابل‌توجهی کاهش دهد. این مطالعه عملکرد مناسب چوب‌پنبه متراکم‌شده به‌عنوان یک هسته ساندویچی پایدار را تایید کرده و جایگزینی مناسب برای فوم‌های نفتی معرفی می‌کند.

با تمرکز بر بهبود رفتار مکانیکی ساختارهای ساندویچی، پژوهش حاضر به بررسی تجربی رفتار مکانیکی ساندویچ پنل‌های با هسته چوب‌پنبه (حاوی و فاقد پرکننده لاستیکی) و رویه‌های کامپوزیتی (شیشه-اپوکسی) می‌پردازد. این بررسی تحت دو آزمون مکانیکی مهم و پرکاربرد، یعنی خمش سه نقطه‌ای و نفوذ، انجام خواهد شد. هدف اصلی این تحقیق، ارزیابی کمی و کیفی و همچنین مقایسه عملکرد این ساندویچ پنل‌ها با پیکربندی‌های مختلف هسته است. در این راستا، دو پارامتر کلیدی به‌عنوان عوامل مؤثر بر پاسخ مکانیکی این ساختارها مورد مطالعه دقیق قرار می‌گیرند: نخست، تأثیر حضور و عدم حضور پرکننده لاستیکی در چوب‌پنبه، با هدف بهبود خواص جذب انرژی و افزایش چقرمگی ماده هسته و دوم، بررسی دو ساختار متمایز یکپارچه و چندلایه، بر رفتار مکانیکی این نوع ساندویچ پنل‌ها. به منظور فراهم آوردن یک ارزیابی جامع و ارائه مقایسه‌ای دقیق‌تر، عملکرد این ساندویچ پنل‌ها با یک نمونه مرجع از جنس ورق کامپوزیتی شیشه-اپوکسی نیز مورد سنجش قرار خواهد گرفت. انتظار می‌رود نتایج حاصل از این مطالعه بتواند دانش موجود در زمینه طراحی و ساخت ساندویچ پنل‌های سبک وزن با عملکرد مکانیکی بهبود یافته را ارتقا داده و زمینه را برای توسعه کاربردهای نوین و پایدارتر این مواد مرکب در صنایع گوناگون از جمله هوافضا، خودروسازی، ساختمان و صنایع دریایی فراهم آورد.

## ۲- آزمایش تجربی

### ۲-۱- خصوصیات مواد

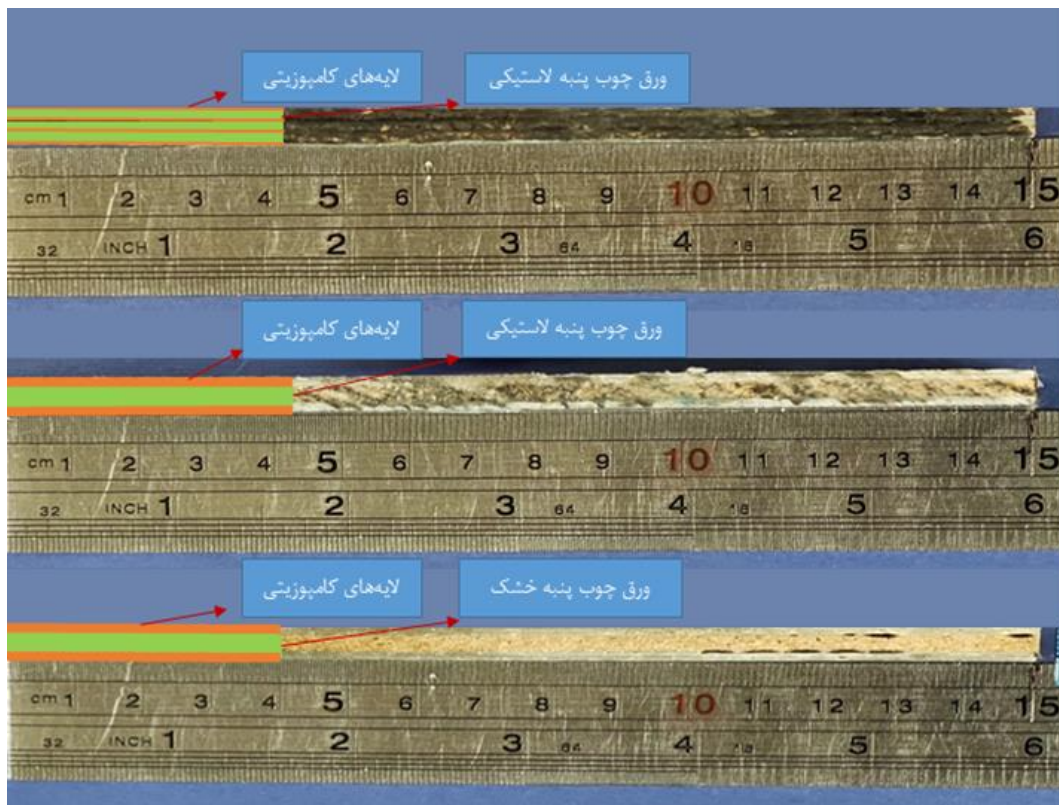
ساندویچ پنل‌های مورد استفاده در این پژوهش از دو بخش اصلی تشکیل شده‌اند: هسته‌ای سبک و حجیم با چگالی پایین و رویه‌هایی نازک و مستحکم که در طرفین هسته قرار می‌گیرند. در این پژوهش، رویه‌ها از جنس کامپوزیت شیشه/اپوکسی و هسته از جنس چوب‌پنبه متراکم‌شده انتخاب شده‌اند. برای ساخت رویه‌ها، از الیاف شیشه تک‌جهته با چگالی سطحی ۵۰۰ گرم بر مترمربع و رزین اپوکسی استفاده شده است. هسته‌ها از جنس چوب‌پنبه طبیعی متراکم‌شده با چگالی اسمی ۵۵۰ و ۱۸۵ کیلوگرم بر مترمکعب، در دو ضخامت سه میلی‌متر و یک میلی‌متر تهیه شدند. سه نوع ساندویچ پنل با پیکربندی‌های مختلف هسته شامل: هسته یکپارچه سه میلی‌متری چوب‌پنبه به‌همراه پرکننده لاستیکی، هسته یکپارچه سه میلی‌متری چوب‌پنبه خشک (با چگالی اسمی ۱۸۵ کیلوگرم بر متر مکعب - بدون پرکننده لاستیکی)، هسته لایه‌ای متشکل از لایه‌های متناوب چوب‌پنبه یک میلی‌متری به‌همراه پرکننده لاستیکی و لایه‌های کامپوزیت شیشه/اپوکسی (LSPC1) ساخته شدند.



شکل ۱ تصویر چوب پنبه خشک و حاوی پرکننده لاستیکی

## ۲-۲- ساخت نمونه‌ها

برای تولید نمونه‌های این پژوهش از روش قالب‌گیری فشاری استفاده شده است. فرایند 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 چوب‌پنبه 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. فرایند پخت در آن انجام شد که طی آن قالب به مدت هشت ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و سپس چهار ساعت جهت پخت کامل در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته است. این مرحله برای تکمیل پلیمریزاسیون رزین و ایجاد ساختاری پایدار و یکنواخت در نمونه‌ها ضروری بود. پس از خنک‌شدن قالب، نمونه‌ها با دقت از قالب جدا شده و سطوح آن‌ها تمیز و صاف شدند. ضخامت نهایی نمونه‌ها در تمامی نمونه‌های ساده برابر با سه میلی‌متر و نمونه‌های ساندویچی برابر شش میلی‌متر می‌باشد که با دقت اندازه‌گیری و تأیید شدند.

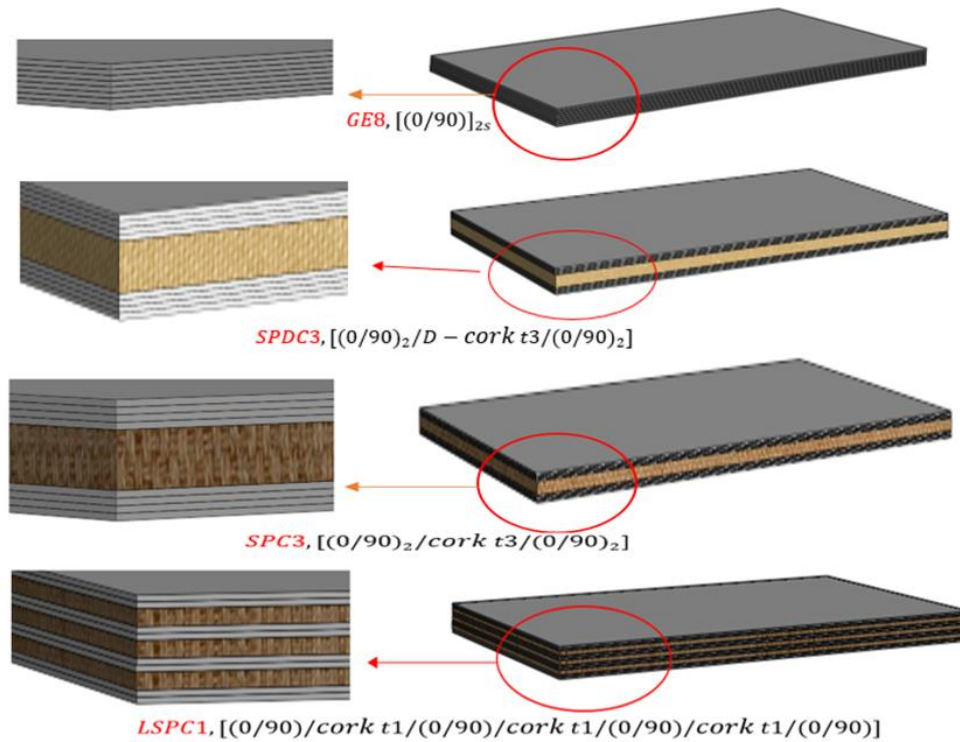


شکل ۲ سطح مقطع و نوع ساختار نمونه‌های ساندویچی

## ۲-۳- کد گذاری نمونه‌ها

برای سهولت درک نمونه‌ها و ارجاع به آن‌ها در طول مقاله، هر نمونه با کدی منحصر به فرد نام‌گذاری شده است. در مجموع، چهار نمونه در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفتند. نمونه مرجع، یک ورق کامپوزیت شیشه/اپوکسی ۸ لایه با چینیش  $[0/90]_{2S}$  است که با کد GE8 (Glass-Epoxy 8 layers) مشخص شده است. سه نمونه دیگر از نوع ساندویچ پنل با رویه‌های کامپوزیت شیشه/اپوکسی و هسته چوب‌پنبه متراکم شده هستند. نمونه اول، با کد SPC3 (Sandwich Panel, Cork 3mm)، دارای هسته چوب‌پنبه به همراه پرکننده لاستیکی و با ضخامت سه میلی‌متر است. نمونه دوم، با کد SPDC3 (Sandwich Panel, Dry Cork 3mm)، دارای هسته چوب‌پنبه

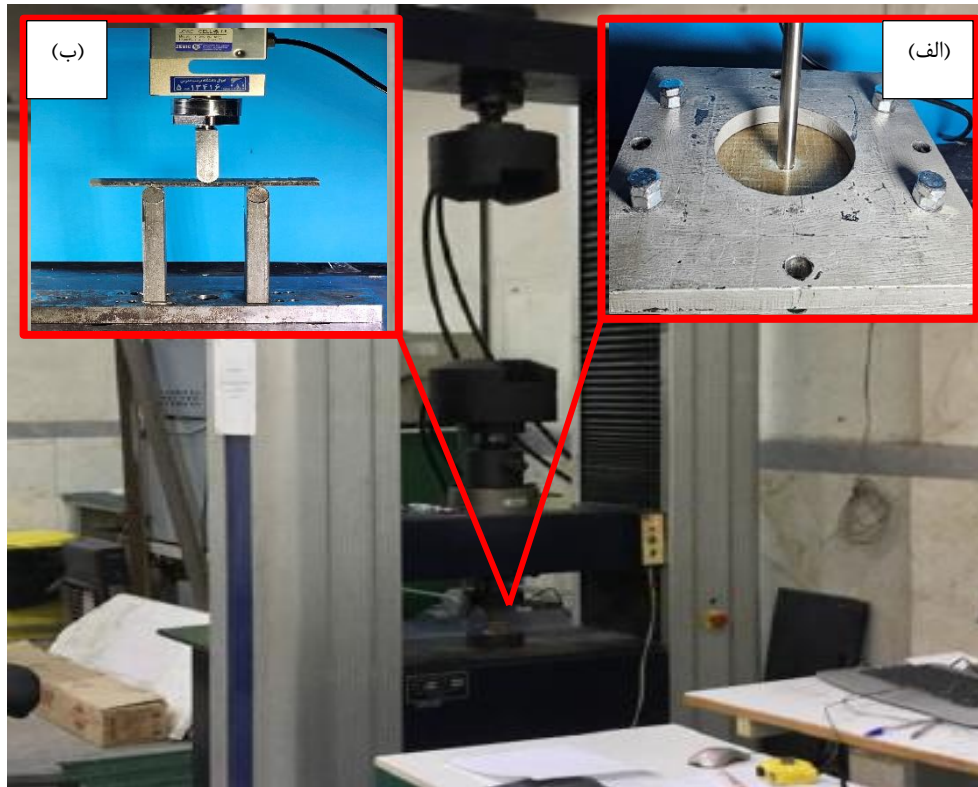
خشک (بدون پرکننده لاستیکی) با ضخامت سه میلی‌متر می‌باشد. نمونه سوم، با کد LSPC1 (Layered, Sandwich Panel, Cork 1mm)، از یک ساختار لایه‌ای متشکل از لایه‌های متناوب کامپوزیت شیشه/اپوکسی و چوب‌پنبه به‌همراه پرکننده لاستیکی با ضخامت یک میلی‌متر برای هر لایه چوب‌پنبه، بهره می‌برد. در این نمونه، ضخامت هر کدام از لایه‌های کامپوزیت برابر یک‌ونیم میلی‌متر است. شایان ذکر است که در تمامی نمونه‌های ساندویچی ضخامت کل هسته برابر سه میلی‌متر و ضخامت هر کدام از رویه‌ها برابر یک‌ونیم میلی‌متر می‌باشد. در شکل ۳ انواع ساختارهای ساخته شده به همراه نوع لایه چینی و کد اختصاص یافته مربوطه نشان داده شده است.



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

## ۲-۴-آزمون نفوذ و خمشی

آزمون‌های خمش سه نقطه‌ای مطابق با استاندارد ASTM C393/C393M انجام شدند که به‌طور ویژه برای ارزیابی خواص خمشی پنل‌های ساندویچی دارای هسته نرم (مانند چوب‌پنبه متراکم) و رویه صلب طراحی شده است. هندسه نمونه‌ها (طول دهانه، عرض، ضخامت) و نرخ بارگذاری کاملاً مطابق دستورالعمل این استاندارد انتخاب شدند. همچنین برای نمونه‌ی مرجع کامپوزیتی GE8 که بدون هسته بوده است، از استاندارد ASTM D7264/D7264M برای انجام آزمون خمش استفاده شده است. آزمون نفوذ شبه‌استاتیک نیز بر اساس شیوه‌ها و دستورالعمل‌های رایج در منابع علمی مرتبط [۱۰] انجام شده است. آزمون نفوذ شبه‌استاتیک با استفاده از یک نفوذکننده صلب از جنس فولاد سخت‌شده با هندسه نیم کروی و قطر ۱۰ میلی‌متر انجام شد. نمونه‌ها روی نگهدارنده مخصوص با دهانه به قطر هفت‌ونیم سانتی‌متر قرار گرفتند. آزمون با سرعت پنج میلی‌متر بر دقیقه تا وقوع نفوذ کامل در نمونه‌ها ادامه یافت. در آزمون خمش، از نگهدارنده مخصوص خمش سه نقطه‌ای با فاصله تکیه‌گاه‌های هفت سانتی‌متر استفاده شد. آزمون با سرعت دو میلی‌متر بر دقیقه تا وقوع شکست در نمونه‌ها ادامه یافت. در طول آزمایش، نیرو و جابجایی به‌طور همزمان ثبت شده و منحنی نیرو-جابجایی برای هر نمونه ترسیم گردید. از این منحنی‌ها، پارامترهای حداکثر نیروی تحمل‌شده، جابجایی در حداکثر نیرو، انرژی جذب‌شده تا حداکثر نیرو برای هر نمونه استخراج خواهد شد. برای هر پیکربندی، سه بار آزمون تحت شرایط یکسان تکرار شد. به دلیل هم‌خوانی قابل توجه نتایج در منحنی‌های نیرو-جابجایی و انرژی جذب‌شده، تکرارهای بیشتر انجام نشد. در شکل ۴ دستگاه، نمونه و نگهدارنده آزمون نفوذ استاتیک و خمش نشان داده شده است.



شکل ۴ دستگاه آزمون به همراه نمونه و فیکسچرهای مربوطه. الف) نفوذ استاتیکی ب) خمش سه نقطه‌ای

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- آزمون نفوذ شبه استاتیکی

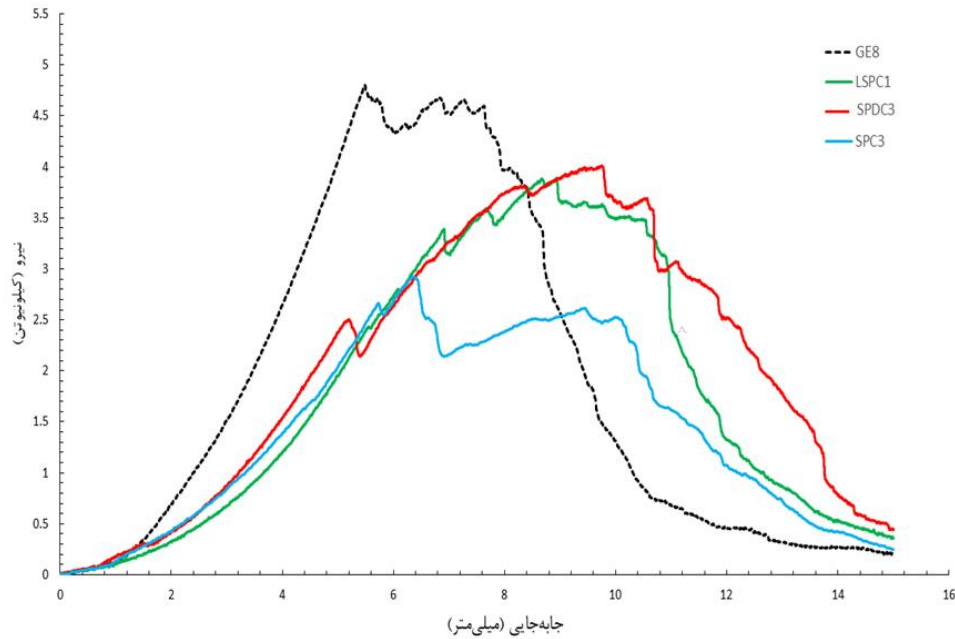
در این پژوهش، رفتار ساندویچ پنل‌های با هسته چوب‌پنبه (با و بدون پرکننده لاستیکی) و رویه‌های کامپوزیت شیشه/اپوکسی تحت آزمون نفوذ شبه‌استاتیک بررسی شدند. در شکل ۵ نمودار نیرو-جابجایی و در جدول ۱ نتایج بیشینه نیرو و جذب انرژی برای تمامی نمونه‌ها ارائه شده است.

جدول ۱ بیشینه نیرو و جذب انرژی نمونه‌ها در آزمون نفوذ استاتیکی

نمونه	جذب انرژی (ژول)	بیشینه نیرو (نیوتن)	سفتی (کیلو نیوتن/میلی‌متر)
GE8	27.6	4789.3	726
SPC3	16.5	2920.7	364
SPDC3	29.1	3996.8	375
LSPC1	25.7	3887.2	298

#### ۳-۱-۱- بررسی رفتار کلی

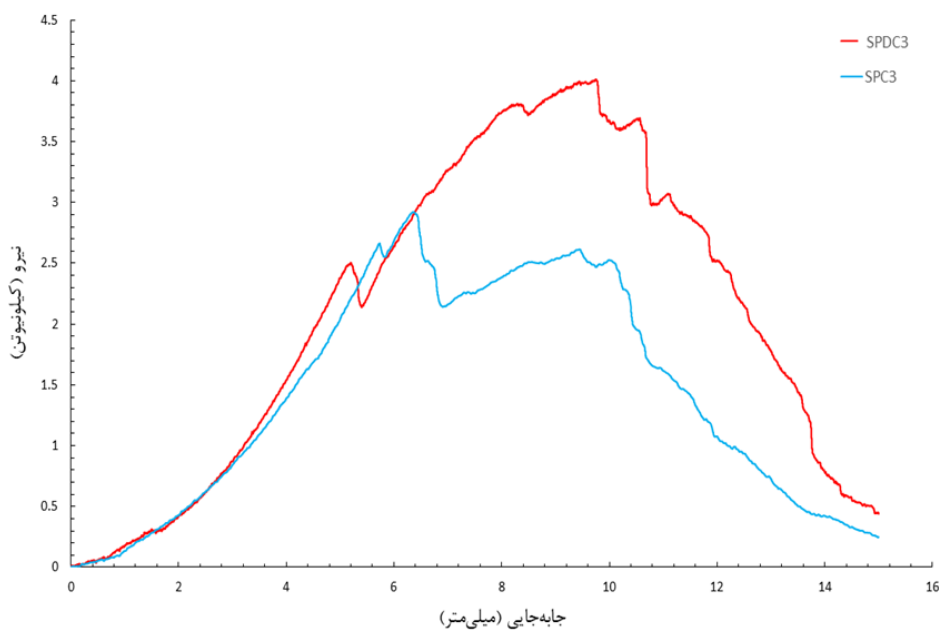
مقایسه منحنی‌های نیرو-جابجایی شکل ۵ نشان می‌دهد که نمونه GE8 (ورق کامپوزیتی) رفتاری متمایز از نمونه‌های ساندویچی دارد. شیب اولیه تندتر منحنی نمونه GE8 نسبت به سایر نمونه‌ها مشهود است. نمونه مرجع GE8 با سختی  $726 \text{ N/mm}$ ، به دلیل ساختار یکپارچه کامپوزیتی، بیشترین صلابت اولیه را نشان می‌دهد. در مقابل، نمونه‌های SPC3، SPDC3 و LSPC1 به ترتیب با  $364 \text{ N/mm}$ ،  $375 \text{ N/mm}$  و  $298 \text{ N/mm}$  کاهش نسبت به GE8، سختی کمتری نشان داده‌اند. این کاهش عمدتاً به مدول پایین‌تر هسته و افزایش ناهمگنی در توزیع تنش نسبت داده می‌شود. این نمونه در جابجایی حدود ۵ میلی‌متر به حداکثر نیروی خود یعنی حدود پنج کیلو نیوتن می‌رسد و پس از آن، به دلیل شکست ترد، نیرو به سرعت افت می‌کند. در مقابل، نمونه‌های ساندویچی رفتار نرم‌تری از خود نشان می‌دهند؛ شیب اولیه منحنی آن‌ها کمتر از GE8 بوده و افت نیرو پس از رسیدن به بیشینه مقدار، به صورت تدریجی رخ می‌دهد.



شکل ۵ منحنی نیرو-جاب‌جایی آزمون نفوذ شبه استاتیکی کل نمونه‌ها

### ۳-۱-۲- تأثیر نوع هسته در آزمون نفوذ شبه استاتیکی

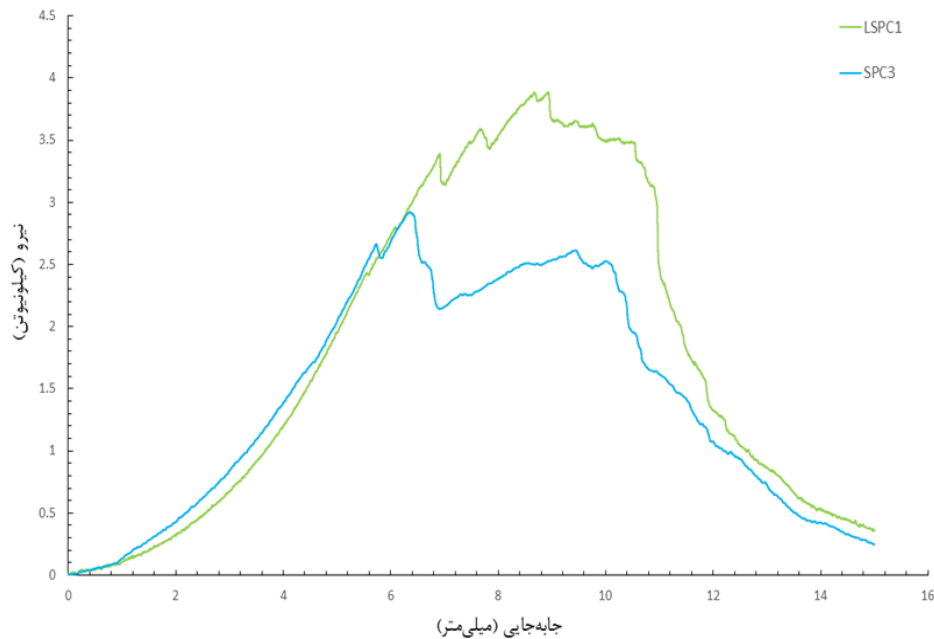
منحنی نیرو-جاب‌جایی نمونه‌های SPC3 و SPDC3 در شکل ۶ ارائه شده است. با مقایسه نمودار این دو نمونه می‌توان دریافت که بیشینه نیروی تحمل شده در نمونه SPDC3 (چوب‌پنبه خشک) بیشتر از نمونه SPC3 (چوب‌پنبه با پرکننده لاستیکی) است. همچنین با توجه به جدول ۱، نمونه SPDC3 با اختلافی قابل توجه (حدود ۴۵٪) جذب انرژی بیشتری نسبت به نمونه SPC3 داشته است. این امر می‌تواند به مکانیزم‌های خردایش و فشرده شدن در ساختار متخلخل چوب‌پنبه خشک و همچنین اصطکاک بین سطوح ترک‌ها در حین نفوذ نسبت داده شود. بنابراین، در بارگذاری شبه‌استاتیک، پرکننده لاستیکی نه تنها کمکی به افزایش جذب انرژی نمی‌کنند، بلکه مقاومت به نفوذ را نیز کاهش می‌دهند.



شکل ۶ منحنی نیرو-جاب‌جایی نمونه‌های LSPC1 و SPC3

### ۳-۱-۳- تأثیر ساختار ساندویچ پنل بر نفوذ شبه استاتیکی

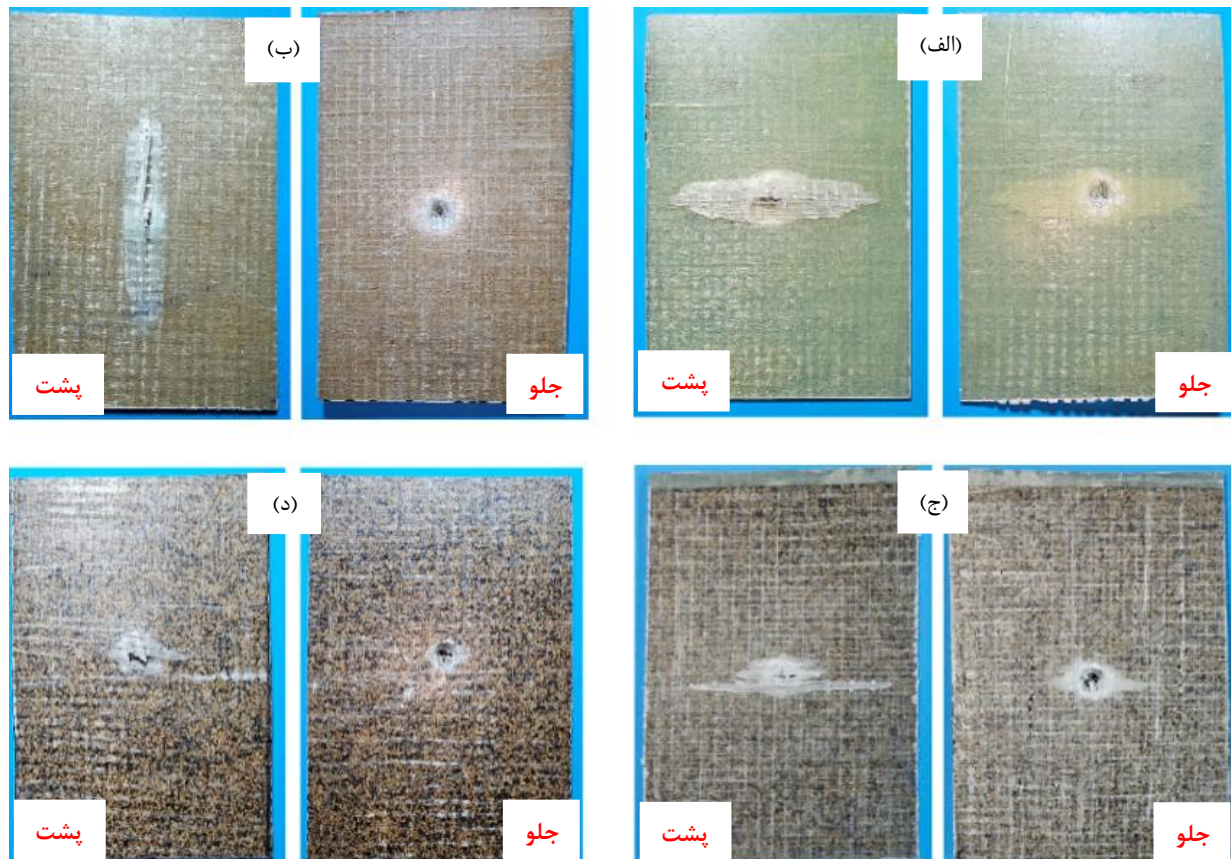
نمودار نیرو-جاب‌جایی نمونه‌های LSPC1 و SPC3 در شکل ۷ ارائه شده است. با مقایسه نمودار این دو نمونه می‌توان تأثیر روش ساخت، بر مقاومت به نفوذ بررسی کرد. هر دو نمونه از هسته چوب‌پنبه حاوی پرکننده لاستیکی بهره می‌برند، اما نمونه LSPC1 به صورت لایه‌ای ساخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که ساختار لایه‌ای به طور قابل توجهی بیشینه نیروی تحمل شده را افزایش می‌دهد. اگرچه مقدار جذب انرژی در نمونه LSPC1 (لایه‌ای) نسبت به نمونه SPDC3 (یکپارچه و خشک) کمتر است. اما همچنان به طور قابل ملاحظه‌ای (حدود ۵۶٪) بیشتر از نمونه SPC3 (یکپارچه با ذرات لاستیک) است. این افزایش مقاومت در برابر نفوذ می‌تواند به مشارکت لایه‌های کامپوزیتی موجود در ساختار لایه‌ای در تحمل بار و همچنین فعال شدن مکانیزم‌های جذب انرژی از طریق جدایش بین لایه‌ای نسبت داده شود.



شکل ۷ منحنی نیرو-جاب‌جایی نمونه‌های LSPC1 و SPC3

### ۳-۱-۴- آسیب نمونه‌ها در آزمون نفوذ شبه استاتیکی

در شکل ۸ تصاویر تمامی نمونه‌ها پس از آزمون نفوذ استاتیکی ارائه شده است. در نمونه GE8، شکست ترد به صورت نفوذ کامل، شکست الیاف در جهت‌های مختلف، ترک خوردگی ماتریس و ایجاد شکاف بزرگ در پشت نمونه به همراه بیرون زدگی قابل توجه الیاف مشاهده شد. این الگو نشان می‌دهد که مکانیزم اصلی تخریب، شکست الیاف در کشش و برش بوده و عدم وجود هسته منجر به تمرکز تنش و جذب انرژی پایین شده است. در نمونه LSPC1، ترکیبی از خرد شدن هسته چوب‌پنبه، شکست الیاف در رویه بالایی، ترک خوردگی و جدایش بین لایه‌ای مشاهده شد. بیرون زدگی و پارگی موضعی در پشت نمونه نیز رخ داد. جدایش بین لایه‌ای به عنوان یکی از مکانیزم‌های اصلی جذب انرژی، در این نمونه به وضوح فعال شده و به جذب انرژی نسبتاً بالای آن کمک کرده است. در نمونه SPDC3 (چوب‌پنبه خشک)، خرد شدن کامل هسته به همراه شکست الیاف و ترک خوردگی در رویه‌ها مشاهده شد. بیرون زدگی و پارگی در پشت نمونه نیز نشان‌دهنده نفوذ کامل است. در نمونه SPC3 (چوب‌پنبه با ذرات لاستیک)، خرد شدن هسته، شکست الیاف در رویه بالایی و پارگی موضعی در رویه پایینی به همراه بیرون زدگی هسته مشاهده شد. حضور پرکننده لاستیکی شدت خرد شدن هسته را کاهش داده و الگوی پارگی رویه پشتی را تغییر داده است. در مجموع، خرد شدن هسته مکانیزم اصلی جذب انرژی در هر دو نمونه SPDC3 و SPC3 بود.



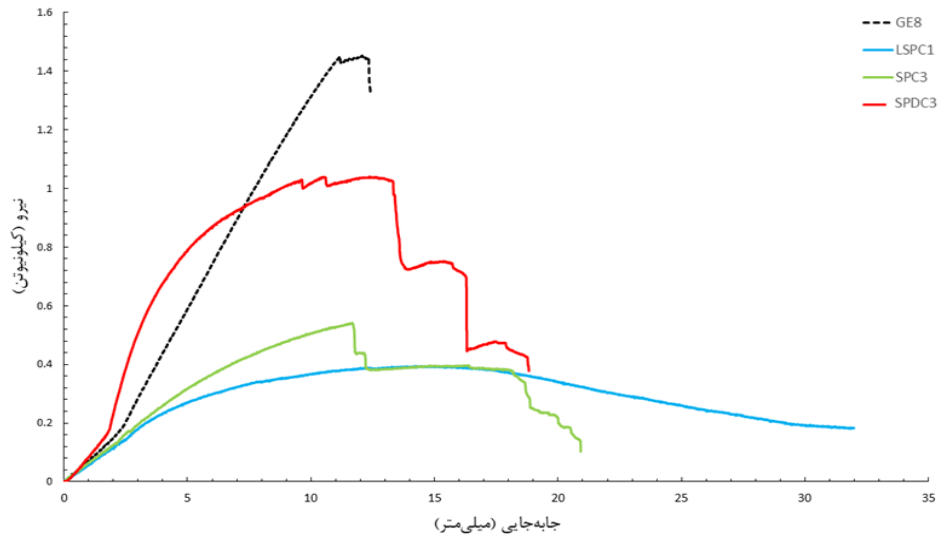
شکل ۸ تصاویر تمامی نمونه‌ها بعد از آزمون نفوذ شبه‌استاتیک (الف) GE8 (ب) SPDC3 (ج) LSPC1 (د) LSPC1 (ه) LSPC1 (و) LSPC1 (ز) LSPC1 (ح) LSPC1 (ط) LSPC1

### ۲-۳- نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای

#### ۳-۲-۱- بررسی رفتار کلی

نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای تمامی نمونه‌ها در شکل ۹ در قالب نمودارهای نیرو-جابجایی ارائه شده است. در این شکل، تغییر شیب اولیه در منحنی‌های نیرو-جابجایی در تمامی منحنی‌ها بیانگر شکست یا افزایش سفتی سازه‌ای نمونه نمی‌باشد که البته این نکته در نمونه‌های GE8 و SPDC3 بیشتر مشهود است. این ناحیه از منحنی مربوط به چند میلی‌متر ابتدایی جابجایی است که در آن، ایندنتور به تدریج روی سطح نمونه قرار گرفته و تماس کامل بین ایندنتور و رویه کامپوزیتی نمونه برقرار می‌شود. در این مرحله، آنچه غالب است نه رفتار مکانیکی کل سازه، بلکه پاسخ سفتی موضعی تماس بین ایندنتور و سطح نمونه است. در واقع، تطابق سطحی، تغییر شکل موضعی رویه، و فشردگی بسیار جزئی در ناحیه تماس، منجر به ایجاد شیب افزایشی در منحنی می‌شود. پس از این مرحله گذرا، ایندنتور به حالت پایدار نشست و از آن نقطه به بعد، تغییر شکل کلی سازه ساندویچی یا کامپوزیتی آغاز می‌شود و تحلیل خواص مکانیکی مانند سفتی خمشی، مقاومت و جذب انرژی معنا پیدا می‌کند.

همان‌طور که مشهود است، نمونه GE8 رفتار متمایزی از نمونه‌های ساندویچی دارد. منحنی نیرو-جابجایی GE8 نشان‌دهنده نیروی خمشی بالاتر این نمونه است. بطوری که نمونه GE8 در جابه‌جایی ۱۲/۴ میلی‌متر به حداکثر نیروی خود، ۱/۴۴ کیلو نیوتن می‌رسد و پس از آن، به دلیل شکست ترد، نیرو به سرعت آفت می‌کند. در مقابل، نمونه‌های ساندویچی رفتار نرم‌تری نشان می‌دهند، به طوری که حداکثر نیروی خمشی آن‌ها کمتر از نمونه GE8 بوده و آفت نیرو پس از رسیدن به بیشینه مقدار، به صورت تدریجی رخ می‌دهد. این آفت تدریجی ناشی از خرد شدن و متراکم شدن هسته است که باعث می‌شود نمونه همچنان بتواند انرژی قابل توجهی را پس از این مرحله جذب کند. در جدول ۲ بیشینه نیرو و مقادیر جذب انرژی برای تمامی نمونه تحت آزمون خمش سه نقطه ارائه شده است. با توجه به جدول ۲، جذب انرژی نمونه GE8 (۹/۴۳ ژول) به طور قابل توجهی کمتر از نمونه SPDC3 (۱۶/۵ ژول) است که نشان‌دهنده ظرفیت پایین‌تر این نمونه در جذب انرژی پیش از شکست کامل می‌باشد.



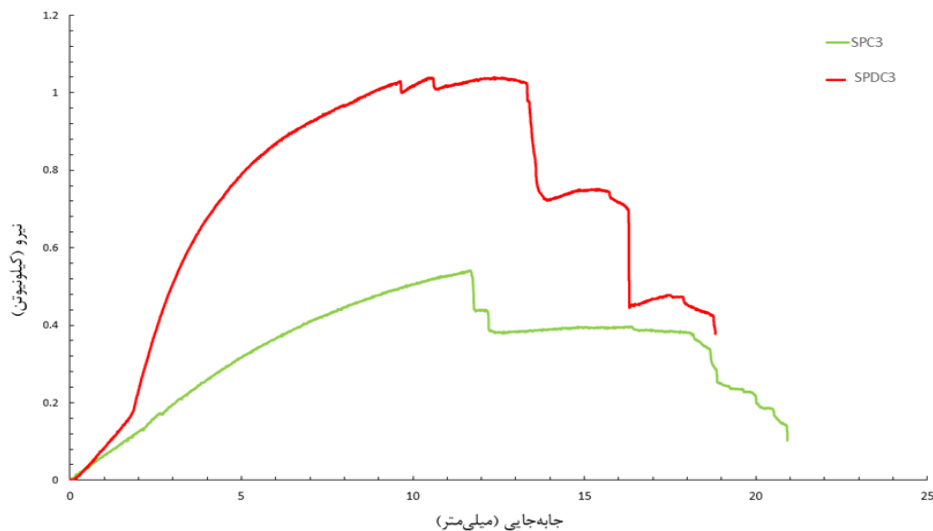
شکل ۹ منحنی نیرو-جاب‌جایی آزمون خمشی سه نقطه‌ای کل نمونه‌ها

جدول ۲ بیشینه نیرو و جذب انرژی برای تمامی نمونه‌ها در آزمون خمشی سه نقطه

نمونه	جذب انرژی (ژول)	بیشینه نیرو (نیوتن)	جاب‌جایی (میلی‌متر)
GE8	9.43	1442.3	12.4
SPC3	9.69	537.5	20.9
SPDC3	16.5	1035.9	18.8
LSPC1	9.13	396.2	31.9

### ۳-۲-۲- تأثیر نوع هسته بر رفتار خمشی

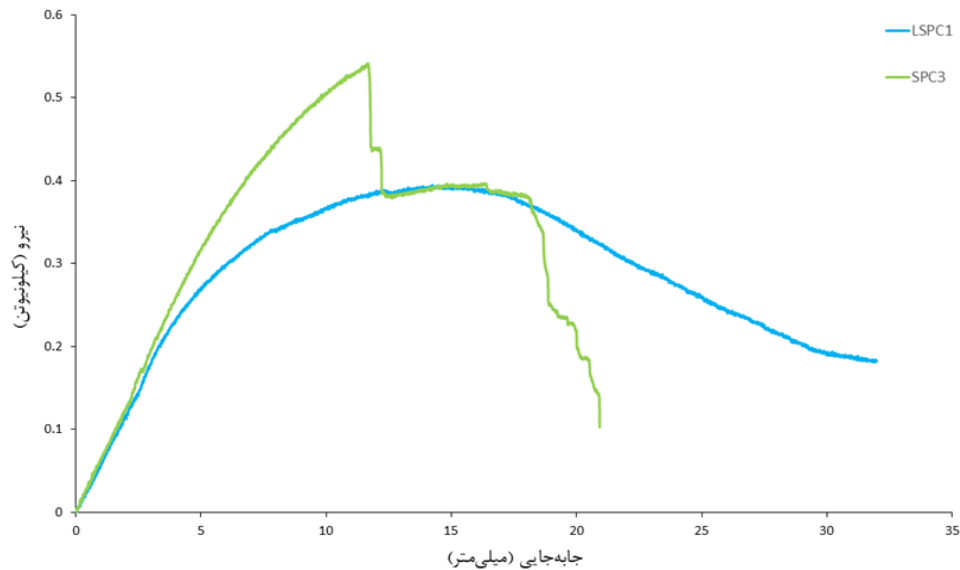
منحنی نیرو-جاب‌جایی نمونه‌های SPC3 و SPDC3 در شکل ۱۰ ارائه شده است. با مقایسه نمودار این دو نمونه به منظور بررسی تأثیر حضور پرکننده لاستیکی در هسته چوب‌پنبه، می‌توان دریافت که بیشینه نیروی تحمل‌شده در نمونه SPDC3 (چوب‌پنبه خشک) به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از نمونه SPC3 (چوب‌پنبه با پرکننده لاستیکی) است. حداکثر نیروی خمشی تحمل‌شده توسط این نمونه حدود ۱/۰۵ کیلو نیوتن است، در حالی که نمونه SPC3 (چوب‌پنبه حاوی پرکننده لاستیکی) حداکثر نیرویی معادل ۰/۵۵ کیلو نیوتن را تحمل می‌کند. همچنین با توجه به جدول ۲، جذب انرژی نمونه SPDC3 به‌مراتب بیشتر از نمونه SPC3 است (حدود ۱۶/۵ ژول در مقابل ۱۰ ژول). این نتایج نشان می‌دهد که در آزمون خمشی سه نقطه‌ای، حضور پرکننده لاستیکی تأثیر منفی بر استحکام خمشی و جذب انرژی ساندویچ پنل‌های چوب‌پنبه‌ای داشته است. این رفتار می‌تواند ناشی از کاهش چسبندگی میان ذرات چوب‌پنبه و لاستیک، شکل‌گیری ناپیوستگی و در نهایت ظرفیت کم تحمل تنش برشی در ساختار هسته باشد.



شکل ۱۰ نمودار نیرو-جاب‌جایی نمونه‌های SPC3-D و SPC3 در آزمون خمشی سه نقطه‌ای

### ۳-۲-۳- تأثیر ساختار ساندویچ پنل بر رفتار خمشی

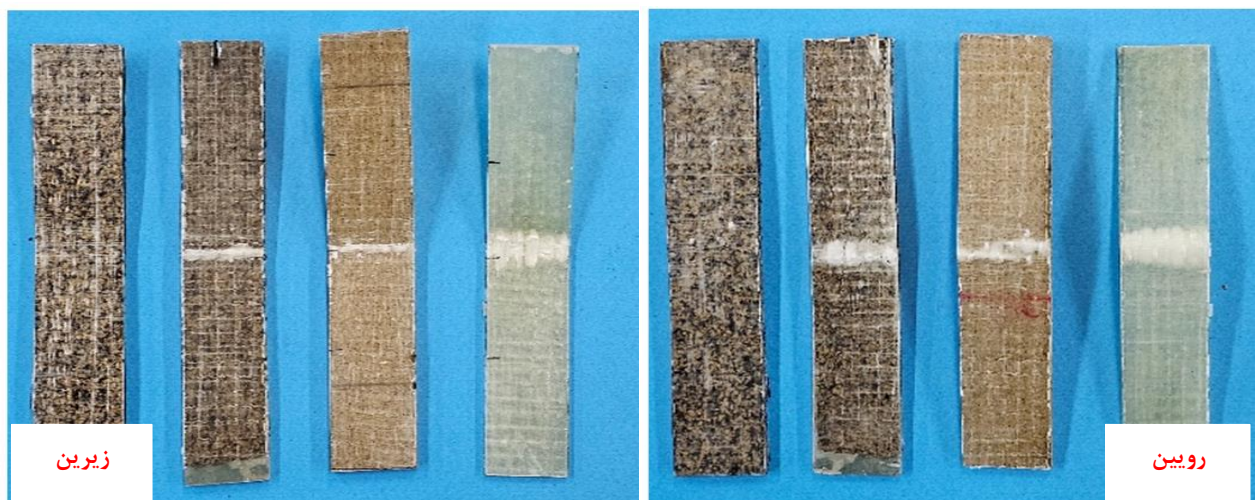
نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های LSPC1 و SPC3 در شکل ۱۱ ارائه شده است. مقایسه این دو نمونه که هر دو دارای پرکننده لاستیکی هستند، به منظور ارزیابی تأثیر ساختار ساندویچ پنل (لایه‌ای و یکپارچه) در رفتار خمشی آن‌ها انجام شده است. اگرچه نمونه LSPC1 حداکثر نیروی کمتری نسبت به SPC3 دارد، اما جابجایی آن به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر است (حدود ۳۲ میلی‌متر در مقابل ۱۹ میلی‌متر). این نتایج نشان می‌دهد که ساختار لایه‌ای، به تنهایی، تأثیر مثبتی بر افزایش استحکام خمشی نداشته، اما می‌تواند منجر به افزایش شکل پذیری و جابجایی نهایی نمونه، در کاربردهای مهندسی که نیاز به این رفتار باشد، شود. با این وجود، جذب انرژی نمونه‌های LSPC1 و SPC3 تقریباً برابر است.



شکل ۱۱ نمودار نیرو-جابجایی LSPC1 و SPC3 در آزمون خمشی سه نقطه‌ای

### ۳-۲-۴- آسیب نمونه‌ها در آزمون خمشی سه نقطه‌ای

در شکل ۱۲ تصاویر نمونه‌ها تحت آزمون خمشی سه نقطه‌ای (پس از آزمون) ارائه شده است. نتایج حاصل از این آزمون اطلاعات ارزشمندی در مورد مکانیزم‌های تخریب و جذب انرژی در هر نمونه ارائه می‌دهد.



شکل ۱۲ تصاویر نمونه‌ها پس از پایان آزمون خمشی سه نقطه‌ای، به ترتیب از راست به چپ نمونه GE8، SPC3، SPDC3 و LSPC1 (الف) نمای رویین (ب) نمای زیرین

زیرین

نمونه GE8 به دلیل عدم وجود هسته، رفتاری کاملاً ترد از خود نشان داد. شکل ۱۲ به وضوح شکست کامل این نمونه در وسط دهانه را نشان می‌دهند. شکست الیاف در کشش به همراه ترک خوردگی ماتریس، مکانیزم اصلی تخریب در این نمونه بوده است. بیرون زدگی الیاف در لبه‌های شکستگی به خوبی مشهود است. این رفتار ترد با اُفت ناگهانی نیرو در منحنی نیرو-جابجایی شکل ۹ و جذب انرژی پایین این نمونه (۹/۴۳ ژول، جدول ۲) هم‌خوانی دارد.

نمونه LSPC1 پیچیده‌ترین مکانیزم‌های تخریب را در بین نمونه‌های ساندویچی نشان می‌دهد. شکل ۱۲ شکست در رویه بالایی (تحت کشش) در نزدیکی محل اعمال بار و زاویه خمشی زیاد این نمونه را به‌نمایش می‌گذارد که حاکی از انعطاف‌پذیری بالای آن است. نکته حائز اهمیت در مورد این نمونه، بازگشت به حالت اولیه پس از باربرداری است که نشان می‌دهد شکست کامل در این نمونه رخ نداده است. همچنین جدایش بین‌لایه‌ای در نزدیکی محل شکست رویه بالایی مشهود می‌باشد. این جدایش بین‌لایه‌ای، به‌عنوان مکانیزمی کلیدی در جذب انرژی عمل کرده و از تمرکز تنش و شکست زودرس جلوگیری کرده است.

نمونه SPDC3 شکستی مشابه SPC3 در رویه بالایی (تحت کشش)، در نزدیکی محل اعمال بار نشان می‌دهد. آسیب لایه‌های رویین و زیرین در نمونه SPDC3 کمتر از LSPC1 می‌باشد. برش و رشد ترک در هسته، به موازات شکست رویه بالایی و زاویه خمشی بزرگ‌تر نسبت به SPC3 از دیگر ویژگی‌های بارز در این نمونه است. همچنین بررسی نمونه پس از آزمون خمشی سه نقطه‌ای، حاکی از برش و ترک خوردگی هسته چوب‌پنبه خشک و شکست رویه بالایی می‌باشد. برش و فشردگی هسته چوب‌پنبه خشک مکانیزم اصلی جذب انرژی در این نمونه بوده است. نمونه LSPC1 کمترین آسیب ظاهری را در مقایسه با سایر نمونه‌ها نشان می‌دهد. تغییر شکل قابل‌ملاحظه در ساختار سازه بدون هیچ‌گونه شکستگی واضح در رویه‌ها، از مشخصه‌های اصلی آسیب در این نمونه است. این رفتار مکانیزم جذب انرژی در این نمونه را توجیه می‌کند. همچنین زاویه خمشی نهایی کمتر نسبت به SPDC3 و LSPC1 می‌تواند به دلیل کاهش سفتی خمشی ناشی از حضور پرکننده لاستیکی می‌باشد.

#### ۴- نتیجه گیری

این پژوهش به بررسی رفتار مکانیکی ساندویچ پنل‌های نوآورانه با هسته چوب‌پنبه متراکم شده تحت آزمون‌های نفوذ شبه‌استاتیک و خمشی سه نقطه‌ای پرداخت. نتایج نشان داد که این ساندویچ پنل‌ها، به‌ویژه نمونه‌های با هسته چوب‌پنبه خشک و یکپارچه (SPDC3)، می‌توانند به‌عنوان جایگزینی کارآمد برای ساختارهای کامپوزیتی سنتی، به‌خصوص در کاربردهایی که نیازمند جذب انرژی بالا هستند، مورد استفاده قرار گیرند.

یافته‌های کلیدی این پژوهش به‌صورت زیر طبقه‌بندی می‌شوند:

- عملکرد برتر چوب‌پنبه خشک: نمونه SPDC3، با هسته چوب‌پنبه خشک و یکپارچه، در هر دو آزمون نفوذ و خمشی، بیشترین میزان جذب انرژی را در مقایسه با سایر نمونه‌های ساندویچی و حتی نمونه کامپوزیتی مرجع (GE8) نشان داد. این نمونه در آزمون نفوذ شبه‌استاتیک، انرژی جذب‌شده‌ای حدوداً ۷۶ درصد بیشتر از نمونه SPC3 (چوب‌پنبه با پرکننده لاستیکی) نشان داد. در آزمون خمشی سه نقطه‌ای نیز این نمونه حدود ۷۵ درصد انرژی بیشتر نسبت به نمونه GE8 و ۷۱ درصد بیشتر از نمونه SPC3 جذب کرده است. این نتایج به وضوح نشان‌دهنده برتری عملکردی این نمونه در جذب انرژی و امر پتانسیل بالای چوب‌پنبه خشک به‌عنوان یک هسته جاذب انرژی را به اثبات می‌رساند.
- تأثیر منفی پرکننده لاستیکی در بارگذاری شبه‌استاتیک: افزودن پرکننده لاستیکی به چوب‌پنبه (نمونه SPC3) در شرایط بارگذاری شبه‌استاتیک، تأثیر منفی بر استحکام و جذب انرژی داشت. استفاده از پرکننده لاستیکی در نمونه SPC3 باعث کاهش حدود ۳۷ درصدی در بیشینه نیروی قابل تحمل در آزمون نفوذ شبه‌استاتیک نسبت به SPDC3 گردید. همچنین در آزمون خمشی نیز این کاهش مقاومت حدوداً ۴۷ درصد بوده است. این امر نشان می‌دهد که مکانیزم‌های فعال‌شده در حضور پرکننده لاستیکی، در نرخ‌های بارگذاری پایین، کارایی لازم را ندارند.
- شکل‌پذیری قابل‌توجه ساختار لایه‌ای: نمونه لایه‌ای LSPC1 در آزمون خمشی سه نقطه‌ای، دارای بیشترین جابه‌جایی نهایی بوده که حدود ۵۳ درصد بیشتر از نمونه SPC3 است. با این حال، از نظر انرژی جذب‌شده تفاوت معناداری با نمونه SPC3 ندارد (کمتر از ۶ درصد تفاوت مشاهده شده است). این موضوع بیانگر آن است که ساختار لایه‌ای اگرچه جابه‌جایی نهایی را

بهبود می‌بخشد ولی تأثیر زیادی بر مقدار انرژی جذب‌شده نداشته است. اگرچه ساختار لایه‌ای (نمونه LSPC1) منجر به کاهش استحکام خمشی شد؛ اما شکل‌پذیری نمونه را به‌طور چشمگیری افزایش داد، به‌طوری که این نمونه پس از باربرداری به حالت اولیه خود بازگشت. این ویژگی می‌تواند در کاربردهایی که نیاز به انعطاف‌پذیری و حفظ یکپارچگی سازه پس از بارگذاری وجود دارد، بسیار مفید باشد.

• مکانیزم‌های جذب انرژی، نتایج آزمون‌ها و تحلیل آسیب‌ها نشان داد که خردشدن و فشردگی هسته چوب‌پنبه خشک در نمونه SPDC3، مکانیزم اصلی جذب انرژی بوده، در حالی که در نمونه LSPC1، جدایش بین‌لایه‌ای نقش مهمی در جذب انرژی ایفا کرده است.

## References

- [1] Steeves CA, Fleck NA. Material selection in sandwich beam construction. *Scripta materialia*. 2004 May 1;50(10):1335-9. doi: 10.1016/j.scriptamat.2004.02.015
- [2] Allen HG. Analysis and design of structural sandwich panels: the commonwealth and international library: structures and solid body mechanics division. Elsevier; 2013 Oct 22. doi: 10.1016/C2013-0-02134-2
- [3] Zenkert D. The handbook of sandwich construction. Engineering Materials Advisory Services; 1997.
- [4] Moreira RA, De Melo FJ, Dias Rodrigues JF. Static and dynamic characterization of composition cork for sandwich beam cores. *Journal of Materials Science*. 2010 Jun;45(12):3350-66. doi: 10.1007/s10853-010-4356-0
- [5] Gameiro CP, Cirne J, Gary G. Experimental study of the quasi-static and dynamic behaviour of cork under compressive loading. *Journal of Materials Science*. 2007 Jun;42(12):4316-24. doi: 10.1007/s10853-006-0675-6
- [6] Reis L, Silva A. Mechanical behavior of sandwich structures using natural cork agglomerates as core materials. *Journal of Sandwich Structures & Materials*. 2009 Nov;11(6):487-500. doi: 10.1177/1099636209104523
- [7] Kim S, Wallace D, editors. Designing and testing of cork composite core material. In: 9th International Conference on Sandwich Structures; 2010.
- [8] Silva JM, Devezas TC, Silva A, Gil L, Nunes C, Franco N. Exploring the use of cork based composites for aerospace applications. In: *Materials Science Forum 2010* Mar 10 (Vol. 636, pp. 260-265). Trans Tech Publications Ltd. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.636-637.260
- [9] Pereira H. Cork: biology, production and uses. Amsterdam: Elsevier; 2007. doi: 10.1016/B978-0-444-52967-1.X5000-6
- [10] Sergi C, Sarasini F, Tirillò J. The compressive behavior and crashworthiness of cork: A review. *Polymers*. 2021 Dec 30;14(1):134. doi: 10.3390/polym14010134
- [11] Castro O, Silva JM, Devezas T, Silva A, Gil L. Cork agglomerates as an ideal core material in lightweight structures. *Materials & Design*. 2010 Jan 1;31(1):425-32. doi: 10.1016/j.matdes.2009.05.039
- [12] Liu CX, Fu ZY, Li P, Qi G. Bending and environmental characteristics of an eco-friendly sandwich panel with cork stopper cores. *Developments in the Built Environment*. 2023 Oct 1;15:100206. doi: 10.1016/j.dibe.2023.100206
- [13] Hachemane B, Zitoune R, Bezzazi B, Bouvet C. Sandwich composites impact and indentation behaviour study. *Composites Part B: Engineering*. 2013 Aug 1;51:1-0. doi: 10.1016/j.compositesb.2013.02.014
- [14] Sutherland LS, Soares CG. Impact resistance of cork-skinned marine PVC/GRP sandwich laminates. *Thin-Walled Structures*. 2022 Nov 1;180:109830. doi: 10.1016/j.tws.2022.109830
- [15] Lakreb N, Bezzazi B, Pereira H. Mechanical strength properties of innovative sandwich panels with expanded cork agglomerates. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2015 Jul;73(4):465-73. doi: 10.1007/s00107-015-0908-y
- [16] Fernandes FA, Tavares JP, de Sousa RA, Pereira AB, Esteves JL. Manufacturing and testing composites based on natural materials. *Procedia Manufacturing*. 2017 Jan 1;13:227-34. doi: 10.1016/j.promfg.2017.09.055
- [17] Nóvoa PJ, Arteiro AJ, Marques AT. Modified expanded cork core sandwich structure with improved performance. In: *Proceedings of the ECCM 2018* Jun.
- [18] Correia JM, Serra GF, Alves de Sousa RJ, Pereira AB, Fernandes FA. Expanded (Black) cork for the development of an eco-friendly surfboard: environmental impact and mechanical properties. *Sustainability*. 2022 Jan 7;14(2):668. doi: 10.3390/su14020668