



## شبیه‌سازی عددی پاسخ خمشی ساندویچ پانل‌های زیست تخریب پذیر با اشکال و مواد مختلف هسته با روش المان محدود

سیدمحمد رضا خلیلی<sup>1\*</sup>، سعید حبیبی<sup>2</sup>، علی اکبر طاهری<sup>3</sup>

- 1- استاد، مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران  
 2- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران  
 3- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

\* تهران، صندوق پستی 19919-43344، khalili@kntu.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله:

ساندویچ پانل‌های زیست تخریب پذیر به عنوان نسل جدیدی از سازه‌های سازگار با محیط زیست، به دلیل قابلیت بازگشت به طبیعت پس از پایان عمر مفید، مورد توجه گسترده قرار گرفته‌اند. در این پژوهش، رفتار خمشی این نوع پانل‌ها به صورت عددی و با استفاده از روش اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفته است. ساختار پانل‌ها شامل پوسته‌هایی تقویت شده با الیاف کتان و هسته‌هایی با اشکال هندسی مختلف است که از مواد کامپوزیتی، چوبی و آلومینیومی ساخته شده‌اند. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از روش اجزای محدود و تحت شرایط بارگذاری یکسان انجام شده‌اند. هدف اصلی، ارزیابی و مقایسه عملکرد مکانیکی ترکیب‌های مختلف از نظر توزیع تنش و میزان جذب انرژی بوده است. نتایج نشان داد که نحوه ترکیب شکل و جنس هسته تأثیر قابل توجهی بر رفتار خمشی پانل‌ها دارد. به طور کلی، هسته‌های با هندسه‌های منحنی مانند هلالی و W عملکرد بهتری نسبت به سایر اشکال از خود نشان دادند، درحالی‌که هسته‌های با اشکال مربعی R و X عملکرد ضعیف‌تری داشتند. همچنین مشخص شد که اگرچه هسته‌های آلومینیومی توزیع تنش یکنواخت‌تری فراهم می‌کنند، اما نمونه‌های چوبی و کامپوزیتی از نظر جذب انرژی عملکرد بهتری دارند. این یافته‌ها می‌تواند به طراحی بهینه ساندویچ پانل‌های زیست تخریب پذیر در کاربردهای سازه‌ای کمک کند.

دریافت: 1404/03/09

پذیرش: 1404/06/15

### کلیدواژگان

کامپوزیت‌های زیست تخریب پذیر، ساندویچ پانل، الیاف KCCCK، هسته موجدار، استحکام خمشی، شبیه‌سازی عددی

## Numerical Simulation of the Bending Response of Biodegradable Sandwich Panels with Various Core Shapes and Materials by Finite Element Method

S. Mohammad Reza Khalili<sup>1\*</sup>, Saeed Habibi<sup>1</sup>, Ali Akbar Taheri<sup>1</sup>

1- Faculty of Mechanical Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran  
 \* P.O.B. 19919-43344, Tehran, Iran, khalili@kntu.ac.ir

### Keywords

Biodegradable Composite, sandwich panel, KCCCK Fiber, corrugated core, Bending strength, Numerical Simulation

### Abstract

Biodegradable sandwich panels, as a new generation of environmentally friendly structures, have attracted considerable attention due to their ability to return to nature at the end of their service life. In this study, the flexural behavior of such panels was numerically investigated using the finite element method. The panel structure consists of flax fiber-reinforced skins and cores with various geometric configurations made from composite, wooden, and aluminum materials. Simulations were performed under identical loading conditions. The main objective was to evaluate and compare the mechanical performance of different core configurations in terms of stress distribution and energy absorption capacity. The results indicated that the combination of core shape and material has a significant influence on the flexural behavior of the panels. Overall, cores with curved geometries such as C-shaped and W-shaped exhibited superior performance compared to other shapes, while R-shaped and X-shaped cores showed the weakest results. Furthermore, although aluminum cores provided more uniform stress distribution, wooden and composite cores demonstrated better energy absorption performance. These findings can serve as a basis for the optimal design of biodegradable sandwich panels in structural applications.

است. این مواد که دارای استحکام و سفتی بالا در کنار سایر خواص مطلوب مانند وزن کم هستند، به طور فزاینده‌ای مورد اقبال قرار گرفته‌اند. با این حال، نگرانی‌ها در مورد کاهش زیست تخریب پذیری مواد مورد استفاده در

### 1- مقدمه

توسعه و پیشرفت در صنایع مختلف به همراه نیاز به موادی که بتواند پاسخگوی این پیشرفت روزافزون باشد، اهمیت استفاده از مواد کامپوزیتی را برجسته کرده

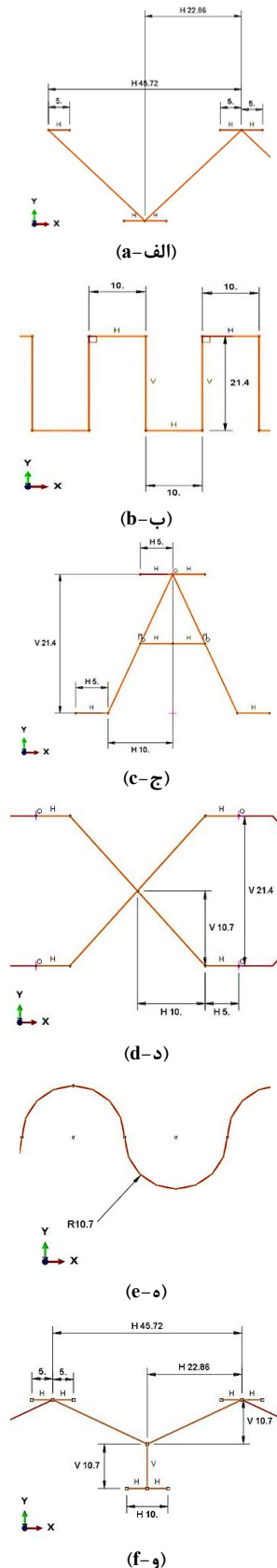
Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Khalili, S. M. R., Habibi, S., Taheri, A. A., "Numerical Simulation of the Bending Response of Biodegradable Sandwich Panels with Various Core Shapes and Materials by Finite Element Method," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 12, No. 1, pp. 2659-2668, 2025. <https://doi.org/10.22068/jstc.2025.2050700.1913>

و همکاران [8]، عملکرد مکانیکی پانل‌های ساندویچ کامپوزیتی با هسته‌های X، Y، A و W به‌صورت عددی و تحت بار فشاری بررسی شد. با استفاده از مدل آسیب انعطاف‌پذیر برای هسته فلزی و مدل تکامل آسیب خطی برای ورق‌های ییافی، رفتار شکست شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که هسته‌های جدید عملکرد بهتری نسبت به نوع W دارند و هسته A شکل با ضخامت کافی به‌عنوان گزینه‌ای مطلوب برای کاربردهای سازه‌ای معرفی شدند. حمیدین و همکاران [9]، ساخت سازه‌ای سبک و بادوام را با استفاده از روش‌های مختلف طراحی و ساخت با استفاده از مصالحی با وزن سبک و استحکام مناسب دنبال کردند. آن‌ها در کار خود، ساندویچ پانل‌ها را با هسته‌های موجدار هلالی، پر و پر نشده، از طریق خمش سه نقطه‌ای آزمایش کردند تا رفتار مکانیکی نمونه‌های ساخته شده را مقایسه کنند. نتایج نشان داد که استفاده از فوم پلی یورتان به طور قابل توجهی جذب انرژی و طول عمر سازه را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، انرژی جذب شده توسط نمونه‌های پر شده با فوم به ترتیب 2 و 2.5 برابر بیشتر از نمونه‌های پر نشده برای هسته‌های موجدار هلالی و مربع بود. در مطالعه جیانگ و همکاران [10]، پانل ساندویچی قابل بازیافت با روکش PLA/کنف و هسته فوم PET بازیافتی با استفاده از پرس گرم و فیلم چسب ترموپلاستیک ساخته شد و تحت آزمون خمش سه نقطه‌ای ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که این ساختار خواص خمشی مناسبی دارد، پیوند هسته و روکش قوی است و می‌تواند به‌عنوان سازه سبک و پایدار در صنایع خودروسازی مورد استفاده قرار گیرد، هرچند الیاف کتان موجب کاهش جزئی (~20٪) خواص مکانیکی شد. دستان و همکاران [11] یک کامپوزیت ساندویچی از الیاف جوت ساخته و آن را تحت بارهای مکانیکی قرار داد. نتایج آن‌ها نشان داد که این کامپوزیت‌های زیست تخریب‌پذیر پاسخ انتقال بار پایدار و جذب انرژی بهتری را در مقایسه با فوم‌های منفرد نشان می‌دهند و آن‌ها را برای استفاده در اجزای داخلی خودرو مناسب می‌سازد. در مطالعه یانگ و همکاران [12] ساندویچ BFRP-بامبو با قالب‌گیری فشاری ساخته و تحت آزمون کشش، فشار، خمش و برش بررسی شد. نتایج نشان داد که این ساختار خواص مکانیکی بامبو را به‌طور قابل توجهی افزایش داده و شکست عمدتاً به جدایش بین لایه‌ها مربوط است. تحلیل‌ها نشان می‌دهد که خواص آن قابل پیش‌بینی بوده و بهره‌وری مواد BFRP و بامبو را بهبود می‌بخشد. سازه‌های ساندویچی در کاربردهای مختلفی مانند صنایع هوافضا، خودروسازی، ورزش و صنایع دریایی استفاده می‌شود. در صنعت هوافضا، قطعاتی مانند باله‌های هواپیما که از سازه‌های ساندویچی ساخته می‌شوند، دائماً تحت بارهای مختلف به‌ویژه بارهای خمشی قرار می‌گیرند. از آنجایی که خواص خمشی نقش مهمی در طراحی سازه ایفا می‌کند، داشتن اطلاعات جامع در مورد رفتار خمشی این سازه‌ها ضروری است. به طور معمول، آزمایش‌های خمشی برای تعیین سفتی خمشی و برشی پانل‌های ساندویچ انجام می‌شود [6]. سازه‌های ساندویچی طبیعی نیز از این قاعده مستثنی نیستند و رفتار خمشی این نوع سازه‌ها به‌عنوان دسته‌ای از مصالح ساندویچی باید مورد بررسی قرار گیرد. مرور مطالعات پیشین پیرامون سازه‌های ساندویچی نشان می‌دهد که تمرکز عمده بر به‌کارگیری مواد و هسته‌های سنتی بوده و خلأ قابل توجهی در بررسی جامع هسته‌های زیست تخریب‌پذیر با هندسه‌های متنوع، به‌ویژه در مقایسه با نمونه‌های صنعتی، وجود دارد. نوآوری اصلی پژوهش حاضر، بهره‌گیری از هسته‌های زیست تخریب‌پذیر، ارزیابی عملکرد هندسه‌های مختلف هسته و مقایسه آن‌ها با کامپوزیت‌های صنعتی است؛ رویکردی که می‌تواند بینش‌های ارزشمندی برای طراحی و بهینه‌سازی سازه‌ها در کاربردهای مهندسی فراهم آورد. استفاده از کامپوزیت‌های زیست تخریب‌پذیر مزایای متعددی به همراه دارد که از جمله

کامپوزیت‌ها (مانند شیشه و کربن) موضوع استفاده از کامپوزیت‌های سبز را به بیش از پیش پر اهمیت نموده است. کامپوزیت‌های سبز به مواد کامپوزیتی اطلاق می‌شود که در آن‌ها الیاف، ماتریس یا هر دو از مواد طبیعی و مبتنی بر طبیعت مشتق شده‌اند و آن‌ها را زیست تخریب پذیر و سازگار با محیط‌زیست می‌کند [1]. ساندویچ پانل‌های کامپوزیتی دسته خاصی از مواد کامپوزیتی هستند که از اتصال دو پوسته نازک و سفت به یک هسته سبک و ضخیم ساخته می‌شوند. مواد هسته معمولاً دارای استحکام پایینی هستند، اما ضخامت بیشتر آن‌ها به کامپوزیت اجازه می‌دهد تا به سفتی بالایی (به ویژه در خمش) دست یابد و در عین حال چگالی کم را حفظ کند. بررسی رفتار مکانیکی این سازه‌ها به دلیل ضرورت استفاده از آن‌ها در صنعت، با توجه به مزایای قابل توجهی که دارند، ضروری است. یکی از روش‌های دقیق و به طور کلی مقرون به صرفه برای درک بهتر رفتار چنین مسائلی بدون آزمایش تجربی، مدل‌سازی عددی پدیده‌های فیزیکی بر اساس روش اجزای محدود است. این روش به کاربران اجازه می‌دهد تا رفتار مکانیکی پدیده‌های فیزیکی مختلف را درک کنند و در نتیجه رفتار آن‌ها را پیش‌بینی کنند. اسماردژفسکی و همکاران [2] یک ساختار ساندویچی ساخته شده از پوسته‌ها و هسته‌های منشوری شکل، که هر دو از چوب ساخته شده بودند، طراحی کرده و آن‌ها را تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که پانل‌های سه هسته‌ای در برابر خمش مقاوم‌تر هستند و رفتار انتقال بار بهتری را در مقایسه با پانل‌های تک هسته‌ای نشان می‌دهند. در کار اولیورا و همکاران [3] یک ساندویچ پانل با پوسته‌های کتان و با هسته‌های اپوکسی و بامبو و چسب پلیمری ساخته شد. از طریق آزمایش تجربی و مدل‌سازی عددی، آن‌ها نشان دادند که هسته‌های بامبو با قطر بزرگ‌تر رفتار خمشی و تحمل تنش مطلوبی را به دلیل اتصال چسب بهتر، ارائه می‌کند، در حالی که بامبو با قطر کوچک‌تر مدول برشی بهتری را به دلیل تعداد بیشتر عناصر در همان ناحیه ارائه می‌کند. سرور و همکاران [4] یک کامپوزیت هیبریدی ساندویچی متشکل از 12 لایه کتان/اپوکسی در سه پیکربندی مختلف را با 4 لایه کولار/اپوکسی (دو لایه در بالا و دو لایه در پایین) تقویت کرده و تحت آزمون‌های کشش، فشار، خمش سه نقطه‌ای، پیچش و جذب آب ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که افزودن کولار باعث بهبود قابل توجه استحکام و سفتی در کشش، فشار و پیچش و افزایش مقاومت شکست تا دو برابر می‌شود، هرچند در مدول خمش کاهش اندکی مشاهده شد. کودایر و همکاران [5] تأثیر چگالی هسته پلی‌ایزوسیانورات را بر 18 نمونه ساندویچ با سه لایه تقویت‌شده با الیاف کتان بررسی و با نمونه‌هایی با یک لایه الیاف شیشه مقایسه کردند. نمونه‌ها با مقطع 50×100 mm ساخته شده و تحت آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای و فشاری محوری قرار گرفتند. نتایج نشان داد که افزایش چگالی هسته، مقاومت خمشی را تا 82 درصد برای پانل‌های کتان و تا 212 درصد در مقایسه با الیاف شیشه بهبود می‌بخشد. بتس و همکاران [6] مقاومت خمشی پانل‌های ساندویچ ساخته شده از صفحات تقویت شده را با استفاده از آزمایش خمش سه نقطه‌ای بررسی کرده، نمونه‌ها تحت بارگذاری خمشی قرار گرفته و رفتار آن‌ها در شرایط مختلف رطوبت، کیفیت سطح و نوع اتصال بین مقوا و صفحات ارزیابی شد. یافته‌ها نشان داد که استحکام نهایی به شدت به این پارامترها وابسته است. در مطالعه بیگ پور و همکاران [7]، پانل‌های ساندویچی با روکش کامپوزیت PLA/کنف-پنبه و هسته‌های مقوایی شانه تخم‌مرغ در پنج پیکربندی مختلف ساخته و تحت آزمون خمش سه نقطه‌ای و شبیه‌سازی اجزای محدود بررسی شدند. نتایج نشان داد که نمونه‌های دارای دو هسته مقوایی تودرتو بیشترین مقاومت و سفتی را داشتند و افزایش ضخامت روکش موجب حداقل 50٪ افزایش ظرفیت باربری شد. در مطالعه‌ای توسط رن



**Fig. 1** Dimensions and cross-section of different core's shapes: (a) W-shape, (b) R-shape, (c) A-shape, (d) X-shape, (e) Arc-shape, (f) Y-shape  
**شکل 1** ابعاد و سطح مقطع اشکال مختلف هسته: (الف) شکل W (ب) شکل R (ج) شکل A (د) شکل X (ه) هلالی شکل Y (و) شکل A

می‌توان به هزینه پایین مواد اولیه، سادگی فرآیند ساخت و امکان تولید در شرایط کارگاهی، و سازگاری با محیط‌زیست از طریق کاهش پسماندهای غیرقابل بازیافت اشاره کرد. در این مطالعه، رفتار خمشی ساندویچ پانل‌های ساخته شده از مواد مختلف شامل چوب، آلومینیوم و کامپوزیت، با شش شکل متفاوت هسته شامل X، A، W، Y، مستطیل (R) و هلالی (S) تحت آزمون خمش سه نقطه‌ای شبیه‌سازی شد. مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود Abaqus و تحت شرایط بارگذاری یکسان انجام گرفت. پس از اتمام شبیه‌سازی، نتایج حاصل شامل توزیع تنش، جابه‌جایی و ظرفیت جذب انرژی در ترکیب‌های زیست‌تخریب‌پذیر با نمونه‌های صنعتی مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفت.

## 2- مواد زیست تخریب پذیر

مواد زیست تخریب پذیر به مواد مشتق شده از طبیعت اطلاق می‌شود که می‌توانند پس از استفاده یا در پایان چرخه عمر خود به محیط بازگردند و بازیافت شوند. این مواد به حوزه کامپوزیت‌ها نیز راه پیدا کرده‌اند و به دلیل خواص مطلوب، پتانسیل سفارشی‌سازی و مزایای دیگری مانند هزینه کم، بسیار مطلوب تلقی می‌شوند. در کامپوزیت‌ها، این مواد به دو گروه تقسیم می‌شوند: ماتریس‌های زیست تخریب پذیر، مانند پلی لاکتیک اسید، و تقویت‌کننده‌های زیست تخریب پذیر، مانند الیاف طبیعی مختلف (مانند کتان، نخل، جوت و غیره). علاوه بر این، در ساختارهای ساندویچی، دسته دیگری به نام هسته‌های زیست تخریب پذیر اضافه می‌شود که از مواد زیست تخریب پذیر مانند حلقه‌های بامبو، مقوا و سایر مواد قابل بازیافت به دست می‌آیند. همه این مواد دارای مزایایی مانند چگالی کم، انعطاف‌پذیری بالا و قابلیت بازیافت هستند که آن‌ها را به گزینه‌ای ایده‌آل برای استفاده در صنعت کامپوزیت تبدیل می‌کند.

## 3- مدل‌سازی نرم‌افزار

مدلسازی عددی در نرم‌افزار آباکوس شامل تعریف مدل هندسی، مشخصات مواد، شرایط مرزی و نوع بارگذاری است. در این پژوهش، جزئیات مربوط به ابعاد هندسی، خواص مواد، نحوه بارگذاری، شرایط مرزی و روش مش‌بندی در بخش‌های 1-3 تا 4-3 و جدول 1 ارائه شده است. نرم‌افزار آباکوس با قابلیت‌های پیشرفته خود در شبیه‌سازی رفتار تماسی بین اجزای مدل، امکان مدل‌سازی دقیق شرایط استاتیکی و دینامیکی، از جمله آزمون خمش سه نقطه‌ای، را فراهم می‌کند. علاوه بر این، وجود گزینه‌هایی برای مدلسازی تخصصی مواد کامپوزیتی در این نرم‌افزار، این امکان را ایجاد می‌کند که تمامی جزئیات مربوط به خواص مکانیکی در لایه‌ها به‌طور کامل تعریف شوند. این ویژگی‌ها، آباکوس را به ابزاری کارآمد برای تحلیل دقیق سازه‌های ساندویچی و ارزیابی پاسخ آن‌ها تحت شرایط بارگذاری مختلف تبدیل می‌کند.

### 1-3- ابعاد هندسی

در این مطالعه، تمامی پوسته‌ها از کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کتان ساخته شدند. برای هسته، از سه ماده مختلف چوب، آلومینیوم و کامپوزیت، در شش شکل مختلف هسته شامل X، A، W، Y، مستطیل (R) و هلالی (S) استفاده شد. تمامی پوسته‌ها دارای ابعاد  $460 \times 25 \times 25$  mm و شامل چهار لایه با ضخامت 0.5 mm برای هر لایه بودند. هسته‌ها نیز با ابعاد  $460 \times 25$  mm و ضخامت 5 mm طراحی شدند. معیار طراحی و انتخاب ابعاد بر اساس استاندارد ISME بوده و اشکال هندسی نیز با توجه به پرکاربردترین انواع هسته در صنعت و مطالعات پیشین انتخاب گردیدند (شکل 1).

جدول 1 مشخصات مواد مورد استفاده در مدلسازی عددی

Table 1 Material properties used in numerical modeling

$G_{23}$ [MPa]	$G_{13}$ [MPa]	$G_{12}$ [MPa]	$\nu_{23}$	$\nu_{13}$	$\nu_{12}$	$E_3$ [MPa]	$E_2$ [MPa]	$E_1$ [MPa]	تقویت کننده	الیاف	پوسته
4290	4290	4290	0.33	0.33	0.33	4350	4350	34890	PLA	پنبه	
376.75	376.75	376.75	*	*	0.4	*	1055	1055	PLA	KCCK <sup>1</sup>	
690	690	690	0.4	0.4	0.4	370	370	1100		چوب <sup>2</sup>	هسته
-	-	-	-	0.3	-	-	70000	-		آلومینیوم	

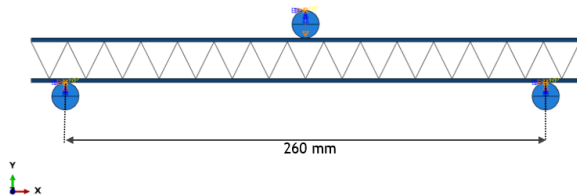
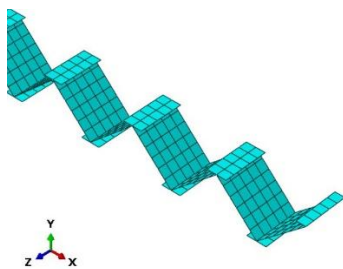


Fig. 3 View of boundary conditions in specimens

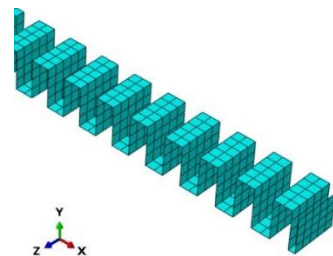
شکل 3 نمایشی از شرایط مرزی در نمونه‌ها

### 3-4- مشخصات تحلیل و مش‌بندی

تحلیل انجام شده از نوع استاتیکی با گام حل 0.1 می‌باشد. برای هسته‌های با سطح مقطع پوسته‌ای، از المان‌های S4R و برای پوسته‌های با سطح مقطع توپر از المان‌های C3D8R اعمال شد. برای دستیابی به نتایج با حداکثر دقت، استقلال از شبکه مش‌بندی نیز به کار گرفته شد که در نهایت برای هندسه‌ها، اندازه مش کلی 2 mm برای هسته‌ها و از اندازه مش کلی 5 mm برای هسته‌های جامد استفاده شد. مش‌بندی هر هندسه در شکل 4 نشان داده شده است.



(الف-ا)



(ب-ب)

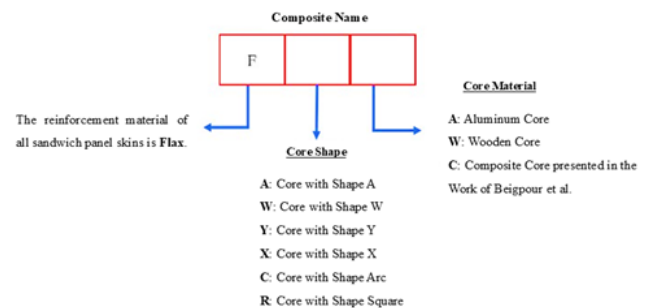


Fig. 2 Coding convention for sandwich panels

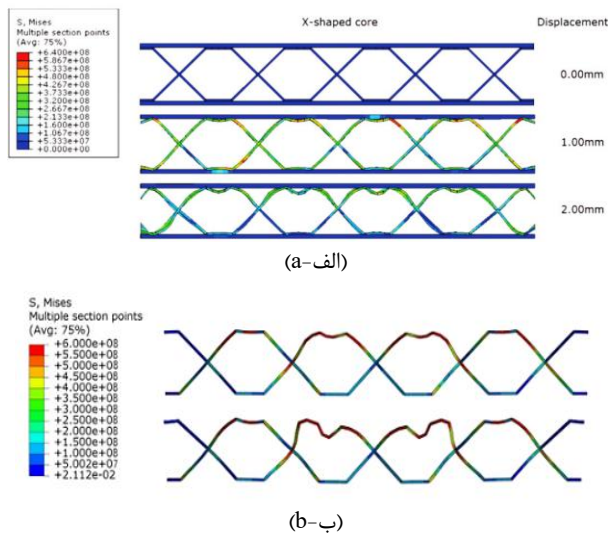
شکل 2 قرارداد نامگذاری ساندویچ‌ها

### 3-3- شرایط مرزی و بارگذاری مکانیکی

شرایط مرزی به گونه‌ای تعریف شد که دو تکیه‌گاه در زیر نمونه کامپوزیت قرار گرفته و یک بارگذار در مرکز بالای نمونه ایجاد گردید تا شرایط آزمون خمش سه‌نقطه‌ای ایجاد گردد. ضریب اصطکاک بین تکیه‌گاه‌ها و بارگذار با نمونه برابر 0.3 در نظر گرفته شد. حرکت بارگذار تنها در راستای عمودی مجاز بود، در حالی که تکیه‌گاه‌ها در تمام جهات به طور کامل مقید شده بودند. در این آزمایش، یک نیروی 1000 نیوتنی به سمت پایین توسط ابزار بارگذاری اعمال شده که منجر به ایجاد خمش در نمونه‌های ساندویچ گردید (شکل 3).

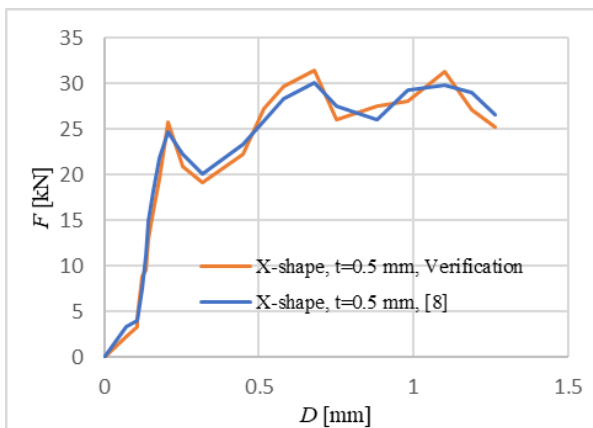
<sup>1</sup> کامپوزیت KCCK ترکیب ارائه شده در کار بیگ پور و همکاران [7] است که شامل 4 لایه کامپوزیت کنف-کتان-کتان-کنف می‌باشد.  
<sup>2</sup> به جای روکش چوب راش به اختصار از کلمه "چوب" استفاده شده است.

هسته در شکل‌های 5 و 6 ارائه شده است. در این تحقیق تحلیل عددی صرفاً تا نقطه شکست هسته‌ها پیش برده شد. از این‌رو، صحت‌سنجی نتایج نیز محدود به بازه‌ای نزدیک به شکست و اندکی پس از آن انجام گرفت، برخلاف مطالعات مراجع [8] و [13] که تحلیل را تا مراحل پس از شکست ادامه داده‌اند. در ادامه، برای اعتبارسنجی تکمیلی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی حاضر با داده‌های آزمایشگاهی گزارش شده در مرجع [13] مقایسه گردید. در این بخش، نمونه آزمایشگاهی پانل ساندویچی فلز با هسته موجدار و یکپارچه<sup>1</sup> مورد استفاده قرار گرفت (شکل 7-الف) و پاسخ عددی مدل توسعه‌یافته در این تحقیق با نتایج آزمون خمش سه‌نقطه‌ای ارائه شده در آن مطالعه تطبیق داده شد. این رویکرد ترکیبی، امکان ارزیابی همزمان صحت مدل در دو سطح عددی و تجربی را فراهم ساخت و اعتبار نتایج شبیه‌سازی حاضر را تقویت نمود.



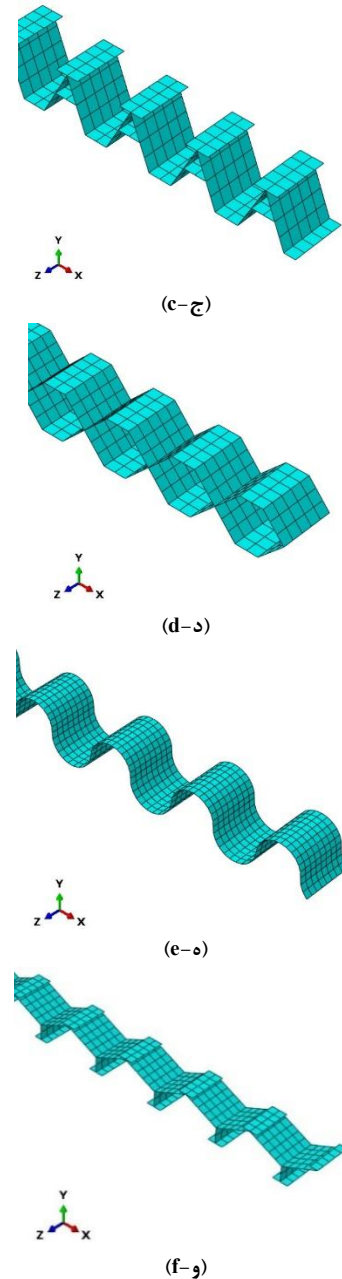
**Fig. 5** Stress contour of reference X-shaped core [8] and validation up to 2 mm displacement: (a) Core deformation up to 2 mm [8], (b) Core deformation up to 1.4 mm in validation

شکل 5 کانتور تنش شکل هسته X-شکل مرجع [8] و صحت سنجی انجام شده تا جابجایی 2 mm (الف) تغییر شکل هسته تا 2 mm [8]، (ب) تغییر شکل هسته تا 1.4 mm در صحت سنجی



**Fig. 6** Comparison of force-displacement curve for Ref. [8] with the numerical method used in this study

شکل 6 مقایسه نمودار نیرو-جابجایی مرجع [8] با روش عددی استفاده شده در این پژوهش



**Fig. 4** Meshing for each core geometry: (a) W-shape, (b) R-shape, (c) A-shape, (d) X-shape, (e) Arc-shape, (f) Y-shape

شکل 4 شبکه‌بندی برای هر هندسه: (الف) شکل W (ب) شکل R (ج) شکل A شکل (د) X شکل (ه) هلالی شکل (و) شکل Y

#### 4- اعتبارسنجی عددی

اعتبارسنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی، به طور معمول نیازمند انجام آزمایش‌های تجربی گسترده و زمان‌بر است که مستلزم آماده‌سازی و آزمون تعداد زیادی نمونه می‌باشد. در این پژوهش، به منظور ارزیابی دقت روش مدل‌سازی ارائه شده، از دو رویکرد مکمل بهره‌گیری شد. در گام نخست، بر اساس روش کار عددی گزارش شده در مرجع [8]، یک هندسه هسته انتخاب و صحت مدل حاضر با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی آن مطالعه مورد ارزیابی قرار گرفت. مقایسه کانتورهای تنش و منحنی‌های نیرو-جابجایی برای این

<sup>1</sup> CMC (Corrugated Monolithic Core)

صحت نسبی مدل ارائه شده است. این مقادیر نشان‌دهنده قابلیت اطمینان داشتن و قابل قبول بودن مدل در شبیه‌سازی رفتار ساختاری مورد مطالعه می‌باشد. انحرافات مشاهده شده عمدتاً می‌تواند ناشی از تفاوت در جزئیات مش‌بندی، شرایط مرزی یا داده‌هایی باشد که در مرجع نیز ذکر نشده است.

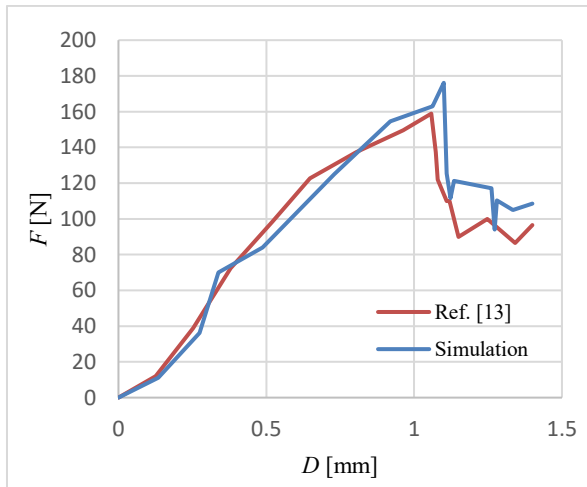


Fig. 8 Comparison of force-displacement curve for Ref. [13] with the numerical method used in this study

شکل 8 مقایسه نمودار نیرو-جابجایی مرجع [13] با روش عددی استفاده شده در این پژوهش

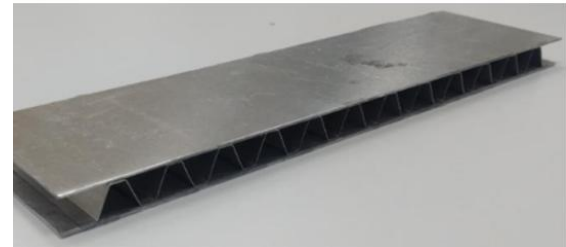
#### 5- نتایج و بحث

در این پژوهش، عملکرد مکانیکی 18 نمونه سازه ساندویچی با هسته‌ها و جنس‌های متفاوت، تحت آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای بررسی شد. در این سازه‌ها، هسته نقش توزیع تنش را بر عهده دارد و پوسته وظیفه مقاومت در برابر آن را ایفا می‌کند. ترکیب‌هایی که باعث تمرکز تنش می‌شوند، ضعیف محسوب می‌شوند، در حالی که ترکیب‌هایی با توزیع یکنواخت تنش و کاهش مقدار بیشینه آن، می‌توانند طول عمر سازه را افزایش دهند. بر این اساس، معیار انتخاب یک ترکیب مناسب، هم کاهش تنش در بخش‌های مختلف سازه و هم توزیع یکنواخت آن است. همچنین، توانایی جذب انرژی بیشتر می‌تواند یک عامل تعیین‌کننده برای برتری یک طراحی باشد، هرچند اهمیت آن بسته به کاربری سازه تغییر می‌کند؛ به‌طور مثال، در سازه‌های ضربه‌گیر، جذب انرژی از کاهش تنش مهم‌تر است.

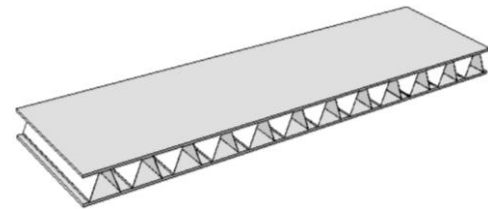
برای ارزیابی عملکرد هسته‌ها، سه شاخص اصلی در نظر گرفته شد: میزان تنش، جابجایی در راستای نیرو، و ظرفیت جذب انرژی. تمام آزمایش‌ها در شرایط یکسان انجام شدند تا نتایج قابل مقایسه باشند. نتایج نشان داد که از نظر توزیع تنش، نمونه FXA با ثبت کمترین تنش 100.95 MPa تحت بار 1000 نیوتن، بهترین عملکرد را داشت و کمترین تمرکز تنش را تجربه کرد (شکل 9-الف). این ویژگی برای سازه‌هایی که باید یکپارچگی خود را حفظ کنند ایده‌آل است. پس از آن، نمونه‌های FWA و FCA به ترتیب با تنش‌های 122.22 و 129.7 MPa در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. قابل توجه است که سه نمونه برتر از نظر کاهش تنش، همگی دارای هسته آلومینیومی بودند. در مقابل، بیشترین مقدار تنش به نمونه‌های FYC (323.06 MPa) و FRW (293.8 MPa) تعلق داشت که هر دو از مواد زیست‌تخریب‌پذیر ساخته شده بودند و این موضوع به توزیع نامناسب تنش و احتمال شکست سریع‌تر در آن‌ها اشاره دارد (شکل 9-ب).

شکل 7 نمایی کلی از فرآیند بررسی پانل ساندویچی فلزی با هسته موجدار را ارائه می‌دهد، ابتدا نمونه آزمایشگاهی واقعی (شکل 7-الف)، سپس مدل شبیه‌سازی شده آن در نرم‌افزار آباکوس (شکل 7-ب)، و در نهایت کانتور توزیع نیرو پس از اعمال بار تا جابجایی 1.4 mm (شکل 7-ج) توسط کار حاضر برای صحت سنجی نتایج نشان داده شده است.

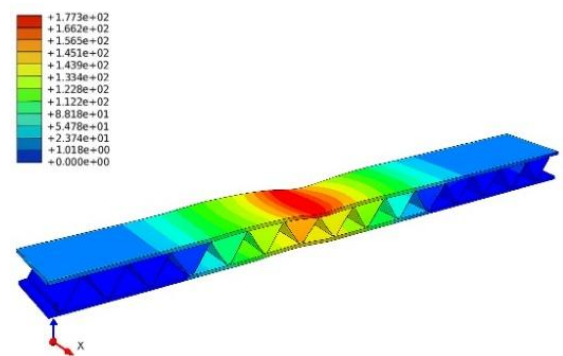
شکل 8 مقایسه نمودار نیرو-جابجایی ارائه شده در مرجع [13] با نتایج حاصل از روش عددی استفاده شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.



(الف-ا)



(ب-ب)



(ج-ج)

Fig. 7 (a) Experimental specimen of metallic sandwich panel with integrated corrugated core [13]; (b) Simulated model of metallic sandwich panel in Abaqus; (c) Force contour of specimen after loading up to 1.4 mm displacement

شکل 7 (الف) نمونه آزمایشگاهی پانل ساندویچی فلزی با هسته موجدار یکپارچه [13]؛ (ب) مدل شبیه‌سازی شده پانل ساندویچی فلزی در محیط آباکوس؛ (ج) کانتور نیرو نمونه پس از بارگذاری تا جابجایی 1.4 mm.

تحلیل مقایسه‌ای بین نمودارهای نیرو-جابجایی مرجع [8] و نتایج حاصل از مدل عددی نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی قادر است تغییر شکل و جابجایی را با دقت قابل قبول پیش‌بینی کند، هرچند در برخی نقاط انحرافات مشاهده می‌شود. بر اساس محاسبات روی مقادیر نیرو-جابجایی، خطای نسبی حدود 8٪ است، که بیانگر انحراف متوسط داده‌های صحت‌سنجی از مقادیر مرجع است. همچنین، مقایسه با نتایج ارائه شده نیرو-جابجایی در مقاله [13] نشان می‌دهد که خطای نسبی در این مورد حدود 9٪ است، که تأییدی بر

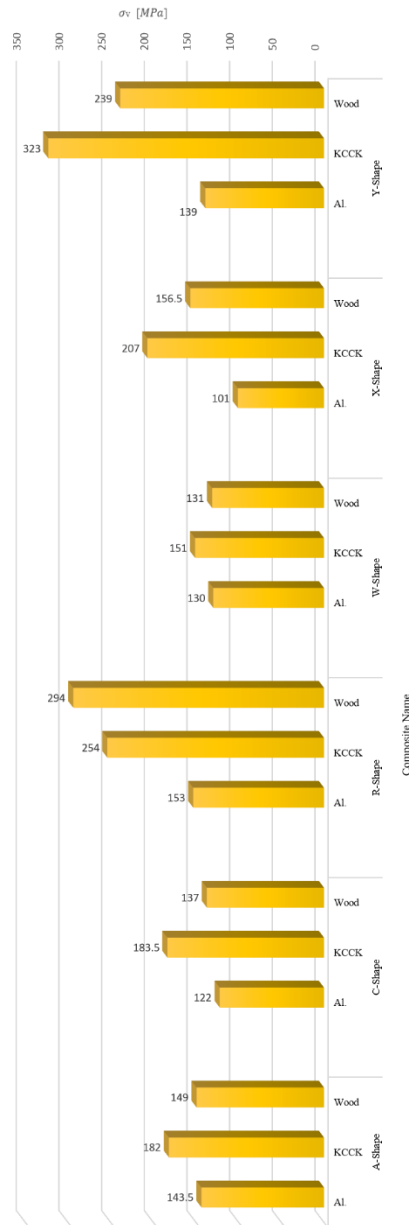


Fig. 10 Stresses generated in different core's shapes and materials  
شکل 10 تنش‌های ایجاد شده در شکل‌ها و مواد مختلف هسته‌ها

در مقابل، هسته‌های R شکل هلالی معمولاً جابجایی‌های زیادی نشان دادند، به طوری که دو ترکیب FRW و FRC با مقادیر 19.5 mm و 13.8 mm به ترتیب در رتبه‌های اول و سوم بیشترین جابجایی قرار گرفتند. همچنین هسته‌های Y شکل نیز جابجایی بالایی داشتند؛ به عنوان نمونه، ترکیب FYC با جابجایی 17.1 mm دومین مقدار بیشینه جابجایی را ثبت کرد. یکی از جنبه‌های مهم ارزیابی کامپوزیت‌ها، ظرفیت جذب انرژی آن‌هاست. این متغیر به صورت سطح زیر منحنی تنش-کرنش (نیرو-جابجایی) تعریف شده و به عنوان شاخصی برای جذب انرژی و مقاومت کلی سازه عمل می‌کند. در این پژوهش، ظرفیت جذب انرژی برای هر نمونه با استفاده از محاسبه مساحت زیر نمودارهای تنش-کرنش حاصل از داده‌های شبیه‌سازی شده به دست آمده است. مساحت زیر منحنی از طریق روش انتگرال‌گیری عددی محاسبه شده و مقایسه ظرفیت جذب انرژی بین ترکیب‌های مختلف انجام شده است.

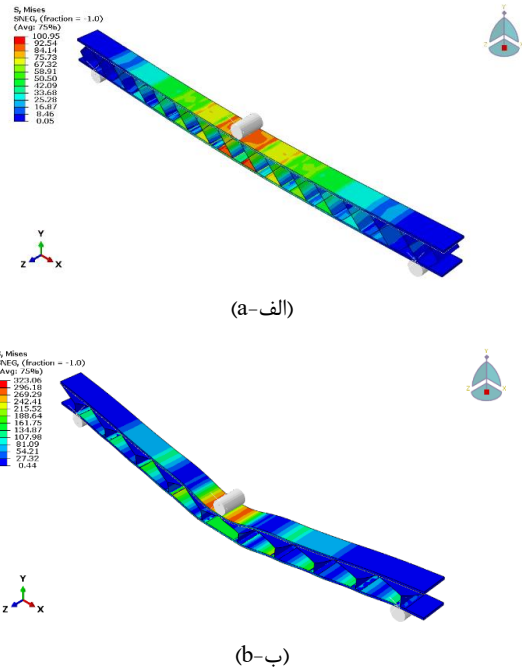


Fig. 9 Minimum and maximum stress levels in the investigated combinations: (a) FXA combination and (b) FYC combination

شکل 9 کمترین و بیشترین سطوح تنش در ترکیب‌های مورد بررسی (الف) ترکیب FYC و (ب) ترکیب FXA

شکل 10، مقادیر تنش فون میسز ( $\sigma_v$ ) به دست آمده برای مواد و اشکال مختلف هسته‌ها را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج جابجایی ثبت شده برای ساندویچ‌ها (شکل 11)، نمی‌توان کیفیت کامپوزیت‌های مختلف را صرفاً بر اساس بیشینه یا کمینه جابجایی ارزیابی کرد، زیرا رفتار خمشی مطلوب بسته به کاربرد مورد نظر می‌تواند متفاوت باشد. بیشترین جابجایی مربوط به ترکیب FRW با مقدار 19.5 mm بود. پس از آن، ترکیب FYC با جابجایی 17.1 mm در جایگاه دوم قرار گرفت. همچنین دو ترکیب FRC و FYW به ترتیب با مقادیر 13.8 mm و 13.68 mm تغییر شکل قابل توجهی نشان دادند. این چهار ترکیب به طور محسوسی جابجایی بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها داشتند، همان‌طور که در شکل 11 مشاهده می‌شود، کمترین جابجایی ثبت شده مربوط به FXA با مقدار 3.59 mm بود. پس از آن، دو ترکیب FRA و FAA هر دو با جابجایی 4.23 mm عملکرد مشابهی از نظر مقاومت در برابر خمش نشان دادند. نکته جالب این است که تمامی هسته‌های آلومینیومی (6 ترکیب) در بین شش جایگاه نخست کمترین جابجایی قرار گرفتند که نشان دهنده مقاومت بالای آن‌ها در برابر خمش است. در مقابل، هسته‌های ساخته شده از KCCCK همواره در رتبه‌های پایین تر جدول (با جابجایی‌های بیشتر) قرار داشتند. در مقایسه با نتایج توزیع تنش، ساندویچ‌های با اشکال مقطع مختلف حساسیت بیشتری نسبت به جنس ماده هسته نشان دادند؛ به گونه‌ای که عملکرد جابجایی آن‌ها با تغییر جنس هسته می‌توانست به طور قابل توجهی افزایش یا کاهش یابد. در میان اشکال مقطع، ساندویچ‌های دارای مقطع X شکل معمولاً جابجایی کمتری داشتند، به طوری که دو ترکیب FXA و FXW هر دو در نیمه بالایی جدول (کمترین جابجایی) قرار گرفتند. همچنین دو ترکیب A شکل یعنی FAA و FAW به ترتیب با مقادیر 4.23 mm و 5.29 mm نیز عملکرد مناسبی داشته و در نیمه بالایی جدول قرار گرفتند (جدول 2 و شکل 11 را مشاهده نمایید).

این نتایج نشان می‌دهد که هسته‌های ساخته شده از آلومینیوم در توزیع تنش عملکرد بهتری نسبت به هسته‌های زیست تخریب پذیر دارند، درحالی‌که هسته‌های زیست تخریب پذیر در جذب انرژی برتری قابل توجهی نشان می‌دهند. در شکل‌های 12 و 13 مقادیر جذب انرژی بر اساس جنس و شکل هسته به ترتیب نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل 12 مقایسه شده است، بیشترین جذب انرژی در ساندویچ‌ها بر اساس جنس هسته رخ داده است. به‌طور مشخص، ساندویچ FRW با هسته چوبی توانست 9750 mJ انرژی جذب کند، در حالی که ساندویچ FYC با هسته کامپوزیتی، 8550 mJ انرژی جذب کرد. این در حالی است که ترکیب دارای هسته آلومینیومی تنها 2335 mJ انرژی جذب کرده و اختلاف قابل توجهی با هسته‌های زیست تخریب پذیر دارد (شکل 12).

نکته بسیار امیدوارکننده این است که 12 ترکیب بالایی جدول از نظر بیشترین جذب انرژی، همگی از مواد زیست تخریب پذیر ساخته شده‌اند، در حالی که شش ترکیب پایینی جدول همگی دارای هسته آلومینیومی بودند. در این میان، ترکیب کمترین جذب انرژی را با مقدار 1795 mJ به خود اختصاص داد. بررسی نقش جنس هسته نشان داد که هسته‌های چوبی (W) مانند FRW و FYW جذب انرژی بالاتری دارند که این ویژگی به تافنس و قابلیت فشرده‌سازی چوب برمی‌گردد. هسته‌های آلومینیومی (A) مانند FXA و FCA تنش کمتری تولید می‌کنند و جابجایی محدودی دارند، بنابراین برای سازه‌های باربر مناسب‌تر هستند.

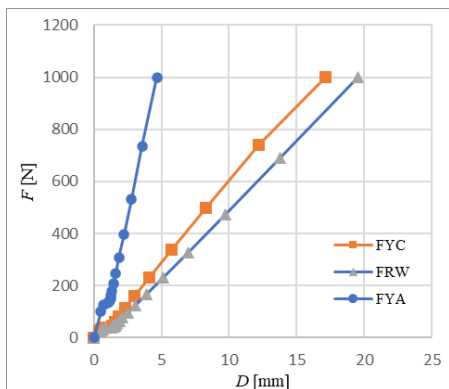


Fig. 12 Sandwich structures with the highest energy absorption based on the core materials

شکل 12 ساندویچ‌هایی با بالاترین جذب انرژی بر اساس مواد هسته

برای مقایسه ترکیبی هر دو معیار توزیع تنش و جذب انرژی با استفاده از روش نرمال‌سازی مین-مکس<sup>1</sup> و در نظر گرفتن وزن مساوی برای «کاهش تنش» و «افزایش جذب انرژی»، سه نمونه FRW، FCC و FYW به‌عنوان متعادل‌ترین گزینه‌ها خواهند بود. FRW به دلیل جذب انرژی بالا برای کاربردهای ضربه‌گیر مناسب است، هرچند باید به کاهش تمرکز تنش آن توجه شود. FCC با جذب انرژی متوسط (5145 mJ) و تنش نسبتاً پایین (183.5 MPa) تعادل خوبی میان سختی و انعطاف دارد. FYW نیز با جذب انرژی بالا (6835 mJ) و تنش متوسط (238.83 MPa) گزینه مناسبی برای سازه‌های مقاوم در برابر ضربه است. در مجموع، برای کاربردهایی که به استحکام بالا و حداقل تمرکز تنش نیاز دارند، FXA بهترین انتخاب است. برای سازه‌های ضربه‌گیر یا جذب انرژی، FRW مناسب‌ترین گزینه است و در مواردی که تعادل بین این دو ویژگی اهمیت دارد، می‌توان از FCC یا FYW استفاده کرد.

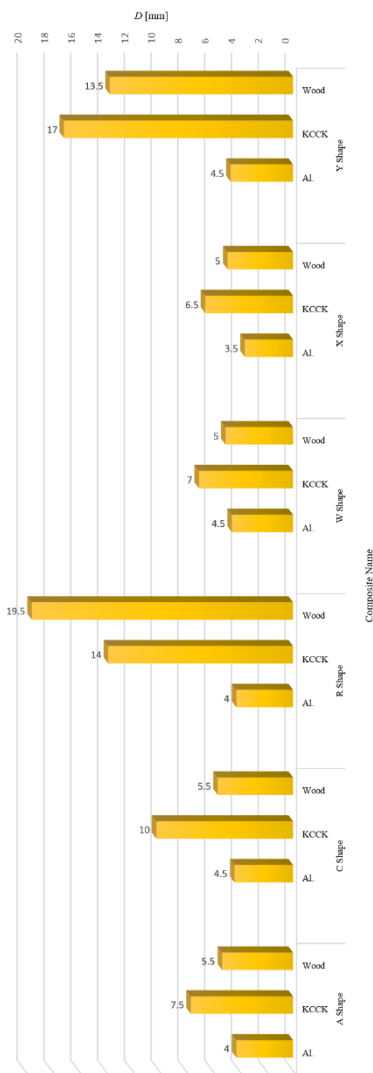


Fig. 11 Displacements generated in different core's shapes and materials

شکل 11 جابجایی‌های ایجاد شده در شکل‌ها و مواد مختلف هسته‌ها

از نظر جذب انرژی، FRW با بیشترین انرژی را جذب کرد که آن را برای کاربردهایی مانند ضربه ایده‌آل می‌کند. با این حال، این نمونه تنش بالایی داشت و تغییر شکل زیادی (جابجایی 19.5 mm) تجربه کرد که نشان‌دهنده رفتار نرم و انعطاف پذیر آن است. پس از آن، ترکیب‌های FYC و FRC به ترتیب با مقادیر 8550 mJ و 6940 mJ در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. در نقطه مقابل، FXA با جذب انرژی 1795 mJ ضعیف‌ترین عملکرد را از این نظر داشت و برای ضربه‌گیری مناسب نیست (جدول 2).

همان‌طور که در جدول 2 نشان داده شده است، کمترین مقدار جذب انرژی مربوط به ترکیب FXA با 1759 mJ بود که به عنوان سطح پایه نیز در نظر گرفته شد. نکته مهم این تحلیل آن است که دو ترکیب برتر از نظر جذب انرژی (FRW و FYC) هر دو از مواد زیست تخریب پذیر ساخته شده‌اند و به ترتیب 443 و 376 درصد عملکرد بهتری نسبت به ترکیب پایه FXA داشتند. در میان ساندویچ‌های با هسته آلومینیومی، بیشترین جذب انرژی مربوط به ترکیب FYA با مقدار 2325 mJ بود که تنها حدود 30 درصد بیشتر از سطح پایه است (جدول 2).

<sup>1</sup> Min–Max normalization

## 6- نتیجه‌گیری

این تجزیه و تحلیل با هدف بهینه سازی مواد زیست تخریب پذیر با کاوش در اشکال مختلف هسته، منجر به مدلی شد که نشان می‌دهد ساندویچ‌های زیست تخریب پذیر می‌توانند به طور موثر جایگزین مواد صنعتی شوند. نتایج تجزیه و تحلیل نشان داد که ساندویچ‌های ساخته شده از چوب و هسته‌های کامپوزیت در زمینه جذب انرژی عملکرد خوبی داشته و عملکرد بهتری نسبت به مواد آلومینیومی دارند. هرچند هسته‌های آلومینیومی در توزیع تنش برتری نشان دادند. با این حال، برخی ترکیبات زیست‌تخریب‌پذیر، به‌ویژه با هسته کامپوزیتی، نتایجی نزدیک به نمونه‌های آلومینیومی ارائه کردند. از نظر ایجاد تعادل میان کاهش تنش و افزایش جذب انرژی، ترکیب FCW بهترین عملکرد را با تنش 137.2 MPa و جذب انرژی 2810 mJ داشت. پس از آن، دو نمونه کاملاً زیست‌تخریب‌پذیر FWC و FWW به ترتیب با تنش‌های 131.1 و 151.1 MPa و جذب انرژی‌های 2515 mJ و 3510 mJ در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. در مقابل، ترکیب FRA ضعیف‌ترین عملکرد را با تنش نسبتاً بالا (153.3 MPa) و جذب انرژی پایین (2115 mJ) نشان داد. در میان شکل‌های مختلف هسته، هسته‌های C و W موفق‌ترین بودند زیرا مطلوب‌ترین ترکیب‌ها را با مواد مختلف ایجاد کردند. در حالی که اشکال X و R به ترتیب ضعیف‌ترین نتایج (ترکیب جذب انرژی کم و توزیع تنش بالا نسبت به سایر اشکال مورد بررسی) را در اکثر ترکیب‌ها نشان دادند. این یافته‌ها پتانسیل مواد زیست تخریب پذیر را به عنوان یک جایگزین قابل اعتماد برای ساندویچ‌های صنعتی افزایش داده و اثربخشی آن‌ها را تایید می‌کند. با این حال، برای افزایش قابلیت اطمینان این مطالعات و درک بهتر ساندویچ‌های زیست تخریب پذیر، بهینه سازی تنظیمات طراحی برای افزایش خواص مکانیکی و پایداری برای اجرای موفق در صنایع مختلف ضروری است. پرداختن به این شکاف‌های تحقیقاتی به توسعه پانل‌های ساندویچ زیست تخریب پذیر و کاربرد آن‌ها در شیشه‌های مهندسی پایدار کمک می‌کند.

## 7- مراجع

- [1] Shrivastava, A., Dondapati, S., "Biodegradable composites based on biopolymers and natural bast fibres: A review," *Materials Today: Proceedings*, Vol. 46, pp. 1420–1428, 2021.
- [2] Smardzewski, J., "Wooden sandwich panels with prismatic core – Energy absorbing capabilities," *Composite Structures*, Vol. 230, p. 111535, 2019.
- [3] Ávila De Oliveira, L., Coura, G. L. C., PassaiaTonatto, M. L., Panzera, T. H., Placet, V., Scarpa, F., "A novel sandwich panel made of prepreg flax skins and bamboo core," *Composites Part C: Open Access*, Vol. 3, p. 100048, 2020.
- [4] Sarwar, A., Mahboob, Z., Zdero, R., Bougherara, H., "Mechanical characterization of a new Kevlar/Flax/epoxy hybrid composite in a sandwich structure," *Polymer Testing*, Vol. 90, p. 106680, 2020.
- [5] CoDyre, L., Mak, K., Fam, A., "Flexural and axial behaviour of sandwich panels with bio-based flax fibre-reinforced polymer skins and various foam core densities," *Jnl of Sandwich Structures & Materials*, Vol. 20, No. 5, pp. 595–616, 2018.
- [6] Betts, D., Sadeghian, P., Fam, A., "Structural behavior of sandwich beams with flax fiber-reinforced polymer faces and cardboard cores under monotonic and impact loads," *J. Archit. Eng.*, Vol. 26, No. 2, p. 04020013, 2020.
- [7] Beigpour, R., Khalili, S. M. R., Shokrollahi, H., "Lightweight biodegradable hybrid composite sandwich panel under three-point bending loads—Experimental and numerical," *Polymer Composites*, Vol. 43, No. 11, pp. 8007–8029, 2022.
- [8] Ren, Y., Wang, N., Jiang, H., Liu, Z., "Numerical evaluation of planar compression performances of composite sandwich panel with X-, Y-,

جدول 2 نتایج شبیه‌سازی تحت بارگذاری یکنواخت روی 18 نمونه

Table 2 Simulation results under uniform loading on 18 samples

شماره	نام	جابجایی [mm]	استرس [Mpa]	جذب انرژی [mJ]	جذب انرژی بهتر از FXA [%]
1	FXA	3.59	100.95	1795	-
2	FCA	4.37	122.2	2185	21.727
3	FWA	4.56	129.7	1975	10.028
4	FWW	5.04	131.1	2515	40.111
5	FCW	5.62	137.2	2810	56.546
6	FYA	4.65	139.06	2325	29.526
7	FAA	4.23	143.63	2120	18.106
8	FAW	5.29	149.3	2645	47.354
9	FWC	7.02	151.1	3510	95.543
10	FRA	4.23	153.2	2115	17.827
11	FXW	4.88	156.72	2435	35.655
12	FAC	7.63	181.7	3815	112.53
13	FCC	10.2	183.5	5145	186.63
14	FXC	6.55	206.89	3275	82.451
15	FYW	13.68	238.83	6835	51.603
16	FRC	13.8	253.8	6940	286.63
17	FRW	19.5	293.8	9750	443.18
18	FYC	17.1	323.06	8550	376.32

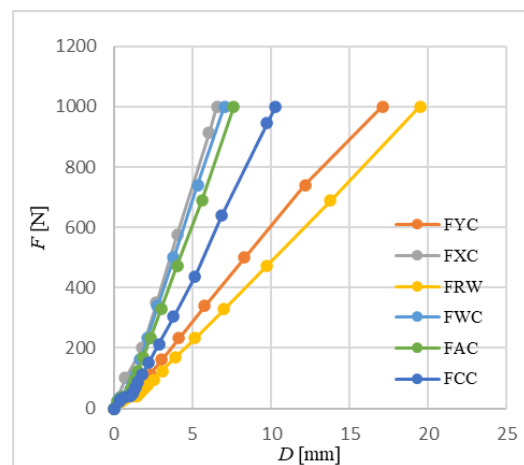


Fig. 13 Sandwich structures with the highest energy absorption based on the core shape

شکل 13 ساندویچ‌هایی با بالاترین جذب انرژی بر اساس شکل هسته

- and A-shaped core,” *Journal of Composite Materials*, Vol. 55, No. 13, pp. 1835–1849, 2021.
- [9] Hamidin, F., Farrokhhabadi, A., Ahmadi, H., “The effect of core shape on the bending response of sandwich panels with filled and unfilled sine and square corrugated cores,” *J Fail. Anal. and Preven.*, Vol. 21, No. 2, pp. 537–546, 2021.
- [10] Jiang, Q., Chen, G., Kumar, A., Mills, A., Jani, K., Rajamohan, V., Venugopal, B., Rahatekar, S., “Sustainable sandwich composites manufactured from recycled carbon fibers, flax fibers/pp skins, and recycled pet core,” *J. Compos. Sci.*, Vol. 5, No. 1, p. 2, 2020.
- [11] Dastan, T., Safian, A., Sheikhzadeh, M., “The crashworthiness performance of integrally woven sandwich composite panels made using natural and glass fibers,” *Journal of Composite Materials*, Vol. 55, No. 9, pp. 1279–1292, 2021.
- [12] Yang, Y., Fahmy, M.F., Pan, Z., Zhan, Y., Wang, R., Wang, B., Feng, B., “Experimental study on basic mechanical properties of new BFRP-bamboo sandwich structure,” *Construction and Building Materials*, Vol. 264, p. 120642, 2020.
- [13] Zumaci, E., Gokkaya, H., Nalbant, M., Sur, G., “Three-point bending response of corrugated core metallic sandwich panels having different core configurations – an experimental study,” *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, Vol. 9, No. 2, pp. 3981–3984, 2019.