



## بررسی تجربی آسیب در ساندویچ پانل چندلایه موج دار تحت خمش سه نقطه شبه استاتیکی

ریحانه شاهواری<sup>۱</sup>، امین فرخ آبادی<sup>۲\*</sup>، محمد سجاد گازر<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳- دانش آموخته دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: amin-farrokh@modares.ac.ir

## چکیده

## اطلاعات مقاله

## مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۲ آبان ۱۴۰۲

پذیرش: ۲۷ اسفند ۱۴۰۲

## کلیدواژگان:

خمش سه نقطه

ساندویچ پانل کامپوزیتی

مکانیسم آسیب

آزمون تجربی

امروزه مواد کامپوزیتی و ساختارهای ساندویچی به دلیل خواص منحصر به فردی مثل استحکام به وزن بالا، مقاومت در برابر خوردگی، توانایی جذب انرژی و صدا مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. یکی از مهم‌ترین کاربردهای کامپوزیت‌های لایه‌ای، استفاده از آن‌ها در ساخت سازه‌های ساندویچی است. اخیراً پانل‌های ساندویچی به صورت وسیعی در سازه‌های مهندسی به واسطه خواص مکانیکی که از خود نشان می‌دهند، در زمینه‌های مختلف همچون رفتار خمشی، برشی، پاسخ به ضربه و بارگذاری‌های دینامیکی، خستگی و شبه استاتیکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در همین راستا، این تحقیق رفتار مکانیکی ساندویچ پانل کامپوزیتی با هسته موج دار چندلایه را در معرض خمش سه نقطه شبه استاتیکی به صورت تجربی بررسی کرده است. پارامترهایی مانند سفتی خمشی و حداکثر بار خمشی تحملی برای هندسه‌های هسته موج دار (مربعی و پروانه‌ای) در طول فرایند بارگذاری و شکست با تغییر هسته از مربعی به پروانه‌ای و افزودن فوم پلی‌اورتان مورد مطالعه قرار گرفتند. هدف از افزودن کامپوزیت موج دار به داخل هسته، تقویت آن و در نتیجه تقویت سازه ساندویچی در برابر بارهای خمشی بدون افزایش چشم‌گیر وزن سازه است. صفحات کامپوزیت و هسته‌های موج دار با تکنیک انتقال رزین به کمک خلأ و با استفاده از پارچه شیشه بافته شده و رزین اپوکسی ام‌۵۰۶ با ۱۵٪ سخت‌کننده ساخته شده‌اند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که ساندویچ پانل‌های کامپوزیتی چندلایه ساختار را در فرایند خمشی سه نقطه شبه استاتیکی تقویت می‌کنند. مکانیسم‌های اصلی آسیب و شکست نمونه‌های ساندویچ پانل در طول فرایند تحمل بار عبارتند از: ترک خوردگی ماتریس، شکستن الیاف، لایه‌لایه شدن، فرورفتگی موضعی، خمش سراسری، خرد شدن و کمانش دیواره‌های سلولی و رویه‌ها.

## Experimental investigation of damage in corrugated multilayer sandwich panel under quasi-static three-point bending

Reyhaneh Shahvari<sup>1</sup>, Amin Farrokhhabadi<sup>2\*</sup>, Mohammad Sajjad Gazor<sup>3</sup>

1- MSc Student, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3- PhD Graduate, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

\* Corresponding Author's Email: amin-farrokh@modares.ac.ir

## Article Information

## Original Research Paper

Received: 3 November 2023

Accepted: 17 March 2024

## Keywords:

Three Point Bending

Composite Sandwich Panel

Damage Mechanism

Experimental Test

## Abstract

Today, composite materials and sandwich structures have been studied due to their unique properties such as strength to high weight, corrosion resistance, ability to absorb energy and sound. One of the most important applications of layered composites is their use in the construction of sandwich structures. Recently, sandwich panels have been widely used in engineering structures due to the mechanical properties they show in various fields such as bending behavior, shear, impact response and dynamic loads. Fatigue and quasi-static have been used. In this regard, this research has experimentally investigated the mechanical behavior of composite sandwich panel with multi-layer corrugated core subjected to quasi-static three-point bending. Parameters such as bending stiffness and maximum bending load tolerance for corrugated core geometries (square and trapezoidal) by changing the core from square to propeller and also the effect of adding polyurethane foam were studied. The purpose of adding corrugated composite inside the core is to strengthen it and, as a result, strengthen the sandwich structure against bending loads without significantly increasing the weight of the structure. Composite plates and corrugated cores are made by vacuum resin transfer technique and using E-glass woven fabric and ML506 epoxy resin with 15% hardener. The experimental results show that the multilayer composite sandwich panels strengthen the structure in the quasi-static three-point bending process. The main damage and failure mechanisms of sandwich panel samples during the load bearing process are: matrix cracking, fiber breakage, delamination, local indentation, global bending, crushing and buckling of cell walls and skins.

## Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Shahvari R, Farrokhhabadi A, Cazor MS. Experimental investigation of damage in corrugated multilayer sandwich panel under quasi-static three-point bending. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Feb 20;10(12):39-52. doi: 10.22034/IJME.2024.419337.1849 [In Persian]

## ۱- مقدمه

ساندویچ پانل‌های کامپوزیتی با ویژگی‌هایی مثل نسبت سختی به وزن بالا، مقاومت در برابر خوردگی، توانایی جذب انرژی و صدا بیشتر در سازه‌های حمل و نقل، هوافضا و دریایی استفاده می‌شود. نسبت استحکام به وزن بالای یک قطعه علاوه بر جنس مواد تشکیل‌دهنده آن به شکل هندسی نیز ارتباط دارد. پانل‌های ساندویچی از جمله محصولات هستند که زمانی به کار برده می‌شوند که نسبت استحکام به وزن بالا اهمیت زیادی دارد. سازه‌های ساندویچی به سازه‌هایی گفته می‌شود که از دو رویه نازک با خواص مکانیکی بالا و یک هسته ضخیم ولی نسبتاً ضعیف و سبک تشکیل شده‌اند که در نهایت سازه‌های سبک و مستحکم را ایجاد می‌کنند [۱]. ساندویچ پانل‌ها با هسته‌های گوناگونی تولید می‌شوند که یک نوع از این هسته‌ها، هسته موج‌دار است. ساختار ساندویچی با هسته موج‌دار، ساختاری است که از یک ورق موج‌دار بین دو ورق سطحی نازک تشکیل شده است. در اینجا نسبت استحکام به وزن بالا مشخصه اصلی است. نقش اصلی هسته موج‌دار جدا نگه داشتن لایه‌های رویه و مقاومت کل سازه در برابر تغییر شکل‌های عمودی مانند یک صفحه است. علاوه بر این، بر خلاف سایر اشکال هسته (مانند هسته‌های لانه‌زنبوری)، یک هسته موج‌دار بارهای خمشی و پیچشی و همچنین برش را تحمل می‌کند [۲]. در سال ۱۸۳۰ نخستین تیرهای ساندویچی از ورق‌های آهنی که به دو طرف یک هسته چوبی متصل شده بودند، برای کاهش وزن در لکوموتیوهای برادران استفنسون استفاده شده‌اند که موقعیت اقتصادی خوبی برای آن‌ها به همراه داشت. اما استفاده گسترده از سازه‌های ساندویچی به جنگ جهانی دوم برمی‌گردد که نخستین بار در هواپیمای موسکویت استفاده شد، به طوری که رویه‌ها از جنس چوب چندلا و هسته از چوب بالسا ساخته شده بود. در سال ۱۹۱۵ هاگو جانکر ساختار لانه‌زنبوری را با استفاده از دو ورق فولادی متصل به دو طرف یک شبکه سلولی شش‌ضلعی برای به‌کارگیری در هواپیماها ارائه داد که در سال ۱۹۱۹ برای نخستین بار در هواپیمای جنگنده F-13 آلمانی استفاده شد. تیرهای ساندویچی در قاب‌های ساختمانی، پل‌ها، جرثقیل‌ها، بدنه کشتی‌ها، فضاپیماها و زیرساخت‌های صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد و کاربرد فراوانی در سیستم‌های حمل و نقل دارند. این سازه‌ها توانایی تحمل محدوده گسترده‌ای از بارگذاری‌های دینامیکی، ضربه‌ای، انفجاری و نیروی ناشی از امواج دریا و بادها دارند [۳].

های و همکاران [۴] رفتار خمشی سازه‌های ساندویچی اسفنجی ساخته‌شده به روش نفوذ رزین را به‌صورت تجربی و عددی بررسی کردند. فینگ و ایمریچ [۵] شبیه‌سازی پاسخ ساختاری و آسیب کامپوزیت‌های ساندویچی مبتنی بر فوم در معرض ضربه با سرعت کم را نشان دادند. آن‌ها شروع و رشد حالت‌های آسیب معمولی که در پوسته‌های کامپوزیتی رخ می‌دهند، مانند شکستگی الیاف، ترک خوردگی ماتریس و لایه‌برداری را با استفاده از مدل‌های آسیب سه‌بعدی و قوانین منسجم سطحی شبیه‌سازی کردند. کارهان و همکاران [۶] تأثیر ضخامت و چگالی فوم در کامپوزیت‌های ساندویچی بافته‌شده یکپارچه سه‌بعدی را بر خواص مکانیکی شبه استاتیک تحت خمش سه‌نقطه مورد بررسی قرار دادند. زو و همکاران [۷] آزمایش خمش استاتیک سه‌نقطه بر روی ساندویچ فوم آلومینیومی با پانل فولادی چسبانده شده را انجام دادند. تغییر شکل و شکست سازه ساندویچی با ضخامت‌های مختلف پانل و هسته فوم را مورد بررسی قرار دادند. جداری سلامی و همکاران [۸] اثرات افزودن یک‌لایه اضافی در یک ساندویچ پانل و دو نوع آرایش هسته مختلف در هسته‌های بالا و پایین بر بارگذاری ضربه‌ای با سرعت کم را به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. یان و همکاران [۹] به مطالعه عددی و تجربی ساندویچ پانل آلومینیومی با هسته موج‌دار مثلثی تحت بارگذاری فشاری و برون صفحه‌ای پرداختند. ژانگ و همکاران [۱۰] استحکام خمشی، سفتی و جذب انرژی ساختار کامپوزیت ساندویچی موج‌دار برای ارائه طرح‌های جدید سازه‌های باربر سبک که قادر به جذب انرژی در وسایل نقلیه حمل‌ونقل هستند، مورد بررسی قرار دادند. رحمانی و همکاران [۳] به مطالعه تجربی و عددی رفتار خمشی نوع جدیدی از ساختارهای ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی از جنس شیشه-پوکسی و هسته‌ای ترکیبی از اسفنج پی‌وی‌سی و کامپوزیت موج‌دار پرداختند. ده آبادی و همکاران [۱۱] رفتار ساختارهای ساندویچی با رویه‌هایی از جنس کامپوزیت و هسته‌ای متشکل از فوم و چندلایه کامپوزیتی موج‌دار با سه شکل موج هندسی مربعی، دوزنقه‌ای و مثلثی تحت بارمحوری فشاری به‌صورت تجربی بررسی کرده‌اند. شیروارو و همکاران [۱۲] مطالعه‌ای از سفتی خمشی و استحکام ساندویچ پانل با هسته‌ای از جنس چوب نخل روغنی<sup>۱</sup> که با روکش چوب کائوچو پوشانده شده و تحت خمش نقطه مرکزی قرار گرفته است، ارائه دادند. استادزینسکی و همکاران [۱۳] به مطالعه تجربی و عددی ساندویچ پانل تشکیل‌شده از روکش‌های فولادی خارجی و یک هسته که از فوم پلی‌اورتان و پشم

<sup>۱</sup> OPW

معدنی یا ترکیبی از این دو ماده ساخته شده است، پرداختند و آن را تحت خمش چهار نقطه قراردادند. آرباوی و همکاران [۱۴] رفتار یک ساندویچ پانل چندلایه ساده و خلاقانه با هسته لانه‌زنبوری پلی‌پروپیلین را به صورت تئوری و تجربی بررسی کردند. آن‌ها آزمایش خمش چهارنقطه برای تشخیص ویژگی‌های مکانیکی هسته چندلایه انجام دادند. نتایج تجربی بر استحکام بهتر ساختار چندلایه در مقایسه با ضعف نشان داده شده توسط پیکربندی تک لایه تأکید می‌کند. فرخ آبادی و همکاران [۲] در تحقیق خود رفتار مکانیکی ساندویچ پانل کامپوزیتی چندلایه با هسته موج‌دار چندلایه که در معرض خمش سه‌نقطه شبه استاتیکی قرار گرفته است، به صورت تجربی و عددی بررسی کرده‌اند. صیاح لطیفی و همکاران [۱۵، ۱۶] به بررسی تجربی و عددی اثر قرارداد یک کامپوزیت موج‌دار در ساختار ساندویچی معمولی هسته بالسا تحت خمش چهارنقطه و سه‌نقطه پرداختند. ساختار ساندویچی پیشنهادی آن‌ها از ورقه‌های آلومینیومی، چوب بالسا با تراکم متوسط ۱۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب و پارچه شیشه بافته شده تشکیل شده است. یافته‌های آن‌ها نشان داد که هسته هیبریدی پیشنهادی نه تنها از شکست فاجعه‌بار جلوگیری می‌کند و باعث کاهش تدریجی ظرفیت باربری شده است، بلکه در نمونه‌ای که تحت خمش چهارنقطه قرار گرفته است، استحکام ویژه وزن را تا  $38/4\%$  درصد بالا برده و همچنین در خمش سه‌نقطه نسبت چگالی مقاومت به جرم و سختی به جرم را به ترتیب  $34/7\%$  و  $28/2\%$  درصد افزایش می‌دهد. تقی‌زاده و همکاران [۱۷] در تحقیق خود اثر چندلایه‌سازی در سازه‌های ساندویچ پانل کامپوزیتی با پیکربندی‌های مختلف هسته‌های موج‌دار (مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی) تحت اثر بارگذاری فرورفتگی شبه استاتیکی به صورت تجربی و عددی مطالعه کردند. آن‌ها رفتار ساختار کامپوزیت در مورد مکانیسم‌های جذب انرژی، نیروی تماس و شکست برای هسته‌های ساخته شده را بررسی کردند و همچنین تجزیه و تحلیل آسیب پیش‌رونده نمونه‌های کامپوزیتی را با استفاده از معیارهای شناخته شده شکست سه‌بعدی توسعه یافته در نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قراردادند. نتایج تجربی نشان داد که چندلایه بودن ساندویچ پانل‌های کامپوزیتی نه تنها باعث افزایش استحکام ساختاری در فرایند فرورفتگی شبه استاتیکی می‌شود، بلکه با افزایش بار پیک، نیروی لحظه‌ای و جابجایی جابجایی تا نفوذ کامل، جذب انرژی نمونه‌ها را نیز افزایش می‌دهد. نارسه و همکاران [۱۸] دو پیکربندی ساندویچی، بر اساس یک صفحه اپوکسی تقویت شده با فیبر کربن و یک هسته لانه‌زنبوری نومکس تی‌ام<sup>۱</sup> ساختند و خواص آن‌ها را در خمش و فشرده‌سازی ارزیابی کردند. مینگ و همکاران [۱۹] در تحقیقشان از روش تجربی و اجزای محدود<sup>۲</sup> برای بررسی مکانیسم‌های شکست ساختارهای ساندویچی موج‌دار الهام گرفته از طبیعت<sup>۳</sup> ساخته شده توسط همجوشی بستر پودر لیزری<sup>۴</sup> تحت خمش سه‌نقطه استفاده کردند. رن و همکاران [۲۰] هسته‌های مقاوم برای بهبود جذب انرژی خمشی سازه‌های ساندویچی مشبک طراحی نمودند. آن‌ها با در نظر گرفتن پارامترهایی از قبیل ارتفاع هسته، عرض پایین و بالای هسته دوزنقه‌ای، زاویه ریب‌ها و ریب عمودی به عنوان مستحکم‌کننده اضافی، به این نتیجه رسیدند که ساندویچ پانل‌های مرکبی با هسته مشبک با ریب عمودی مستحکم‌کننده تا  $54/48\%$  درصد در جذب انرژی مخصوص نسبت به معمولی آن عملکرد بهتری دارند. فرخ‌آبادی و ویسی [۲۱] خواص مکانیکی معادل را با روش تحلیلی مورد مطالعه قراردادند. نتایج آن‌ها نشان داد هسته با زاویه بسته ۶۵ درجه دارای ضریب پواسون منفی است. دنگ و همکاران [۲۲] ساندویچ پانل‌های موج‌دار چندلایه با هسته‌ای یکپارچه در اشکال مختلف هسته موج‌دار (مثلثی، دوزنقه‌ای و مستطیلی) و تعداد لایه‌های مختلف هسته را ساخته و رفتار مکانیکی این قطعات را تحت خمش سه‌نقطه شبه استاتیکی مورد بررسی قراردادند. خالدی و رستمیان [۲۳] به صورت تجربی و عددی رفتار مکانیکی ساندویچ پانل کامپوزیتی با هسته شبکه‌ای جدید ام‌شکل، ساخته شده از الیاف کربن را تحت بارهای خمشی و فشاری سه‌نقطه مورد بررسی قراردادند. آن‌ها فوم پلی‌اورتان را برای پر کردن ساندویچ پانل به کار بردند. نتایج نشان داد که قطعات، نسبت به وزن خود از مقاومت مکانیکی قابل توجهی برخوردارند. یوان و همکاران [۲۴] رفتار شکست تیر ساندویچی فوم فلزی دولایه را تحت خمش سه‌نقطه به صورت تجربی و تحلیلی بررسی کردند. آن‌ها سه حالت شکست اصلی مشاهده کردند، یعنی فرورفتگی، تسلیم رویه و برش هسته. وکیلی فرد و همکاران [۲۵] خواص خمشی ساندویچ پانل‌های پنج لایه با هسته سه لایه موج‌دار به دو صورت عددی و تجربی بررسی کردند. نتایج نشان داد که اختلاف فاز هسته خارجی تأثیر قابل توجهی بر رفتار پانل ندارد. ژانگ و همکاران [۲۶] رفتار شکست و

1 Nomex™

2 FEM

3 BCSS

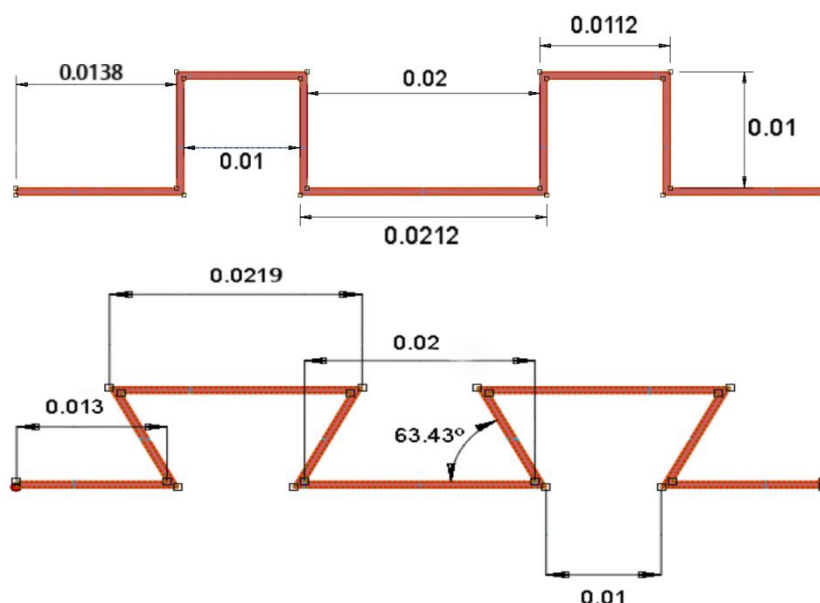
4 LPBF

عملکرد جذب انرژی تیرهای ساندویچی لانه‌زنبوری آلومینیومی با ورق‌های اپوکسی/آلومینیوم تقویت‌شده با الیاف شیشه<sup>۱</sup> تحت خمش سه‌نقطه به صورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار دادند.

تحقیقات ذکرشده نتایج خوبی در بهبود سازه‌های ساندویچ پانل در زمینه‌هایی مثل آرایش شکل هسته، نوع مواد به کاررفته در ساخت این سازه‌ها، راه‌هایی برای کاهش میزان آسیب و خرابی در ساختار سازه و غیره را نشان داده است. در همین راستا این مطالعه به بررسی میزان رفتار خمشی و آسیب ساندویچ پانل چندلایه با هسته موج‌دار (مربعی و پروانه‌ای) تحت خمش سه‌نقطه پرداخته است. برای این منظور دو نوع نمونه بدون فوم و با فوم ساخته شده است. هدف اصلی این مقاله بررسی تأثیر وجود و عدم وجود فوم و همچنین تأثیر شکل هسته بر میزان آسیب است. هسته پروانه‌ای به دلیل داشتن ضریب پواسون منفی و سفتی خمشی بالا، تحمل خوبی در برابر بارهای واردشده دارد. این دو نوع آرایش هسته تاکنون برای ساخت ساندویچ پانل به کاربرده نشده و تحت بارگذاری و آزمایش قرار نگرفته است. تلاش شده است تا با مقایسه تجربی و عددی این دو نوع آرایش هسته، ظرفیت‌های این دو نوع آرایش هسته بررسی شده و ساختاری مطلوب و نو برای ساخت سازه‌های ساندویچ پانل ارائه شود.

## ۲- طراحی و ساخت

ساندویچ پانل‌های چندلایه کامپوزیتی موج‌دار مورد استفاده در این تحقیق از الیاف شیشه بافته‌شده و رزین اپوکسی IM ۵۰۶ با افزودن ۱۵ درصد سخت‌کننده به عنوان مواد ماتریس تشکیل شده است. برای شکل‌دهی به هسته نیز از قطعات پلی‌اتیلن استفاده شده که به شکل مربعی و پروانه‌ای در ابعاد مورد نیاز برش داده شده و پس از فرایند تزریق رزین به کمک خلأ از نمونه‌ها خارج شده است. در مرحله تزریق از پمپ خلأ پالما مدل وی ای ۲۰۸ با قدرت یک اسب بخار و ظرفیت روغن ۵۶۰ میلی‌لیتر استفاده شد. برای تزریق فوم به نمونه‌ها نیز فوم پلی‌اورتان به کار برده شد. جدول ۱ ابعاد هندسی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. شکل ۱ هندسه هسته مربعی و پروانه‌ای را نشان داده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، ساندویچ پانل‌ها با دو نوع هسته مربعی و پروانه‌ای با فوم و بدون فوم پلی‌اورتان ساخته شده و برای آزمایش خمش سه‌نقطه شبه استاتیکی در نظر گرفته شده‌اند. نمونه‌های دارای هسته مربعی و پروانه‌ای بدون فوم به ترتیب M1، M2، P1 و P2 و نمونه‌های مربعی و پروانه‌ای با فوم، MF1، MF2، PF1 و PF2 نام‌گذاری شده است.

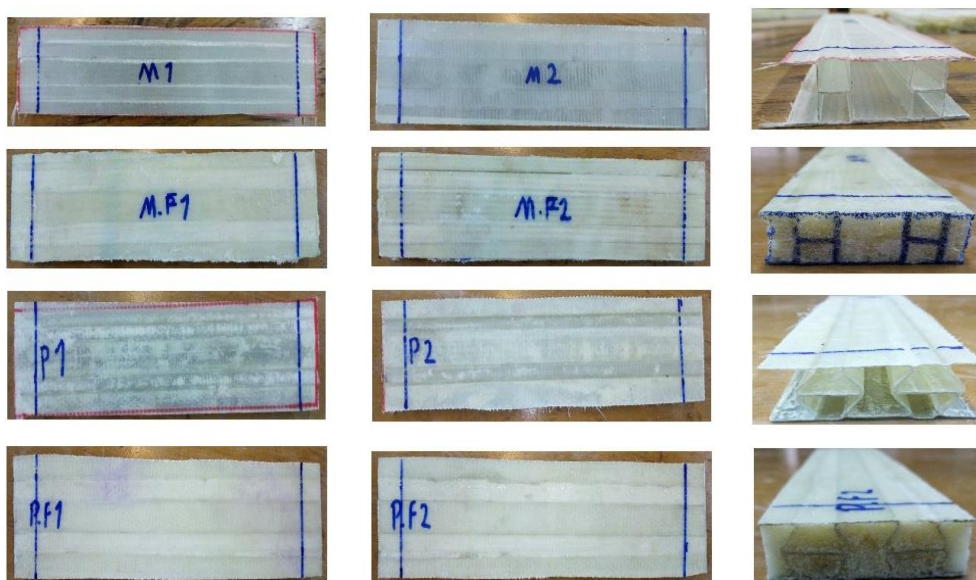


شکل ۱ هندسه هسته‌های موج‌دار مربعی و پروانه‌ای (ابعاد بر حسب میلی‌متر است)

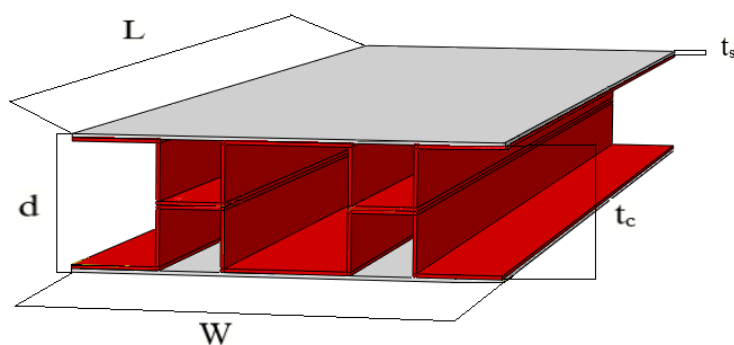
نمونه‌ها پس از اتصال رویه‌ها به هسته به روش تزریق رزین به کمک خلأ و درآوردن نمونه‌ها از پوشش خلأ به وسیله اره برش ۱۲ اینچی اینپل مدل IS بی ۳۰۵-یو آر تی با ابعاد ذکرشده برش زده شدند. پس از ساخت نمونه‌ها و برش آن‌ها، آزمون خمش سه‌نقطه

<sup>۱</sup> GLARE

روی نمونه‌ها طبق استاندارد ای‌اس‌تی ام<sup>۱</sup> انجام شد. ابعاد نمونه‌ها  $۳۰۰ \times ۷۰ \times ۲۲/۴$  میلی‌متر بوده که با توجه به قطر  $۲۱/۲$  میلی‌متری ضخامت هسته، ضخامت رویه‌های بالایی و پایینی قطعه  $۰/۶$  میلی‌متر است. جدول ۱ ابعاد هندسی قطعات و شکل ۳ ابعاد را در نمونه مربعی را نشان می‌دهد. از هر حالت با توجه به پیشنهاد استاندارد ای‌اس‌تی ام دو نمونه مورد آزمون قرار گرفت. شرایط آزمون برای همه نمونه‌ها یکسان بود. دستگاه آزمون کششی - فشاری شی‌جین با سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه دارای دو نگاه‌دارنده برای آزمون خمش نمونه‌های ساندویچ پانل مورد استفاده قرار گرفت. فاصله بین دو تکیه‌گاه ۲۶ سانتی‌متر و قطر پین تکیه‌گاه‌ها و دماغه فک بالایی ۴ سانتی‌متر است.



شکل ۲ ساندویچ پانل با هسته‌های موج‌دار (مربعی و پروانه‌ای) با فوم و بدون فوم



شکل ۳ نمایی از نمونه مربعی

جدول ۱ ابعاد قطعات

مقدار (mm)	نماد	کمیت
300	L	طول
70	W	عرض
22.4	d	ضخامت
21.2	t <sub>c</sub>	ضخامت هسته
0.6	t <sub>s</sub>	ضخامت رویه‌ها

<sup>۱</sup> ASTM

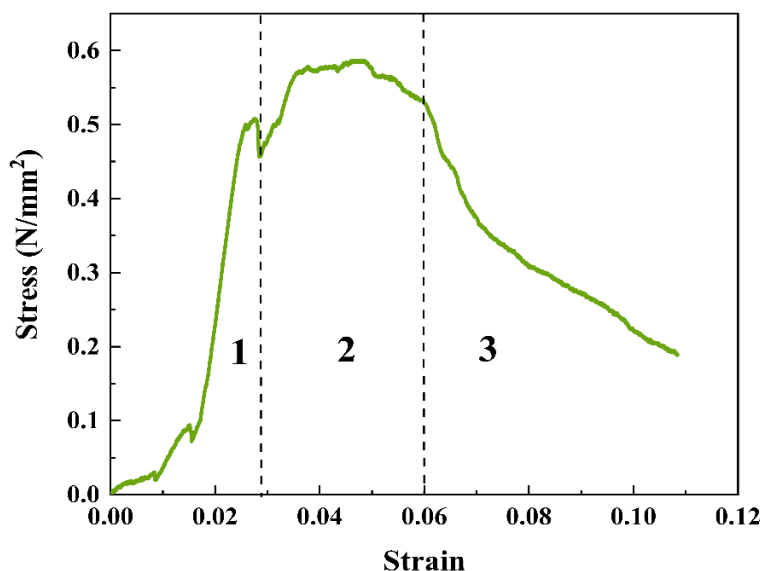
### ۳- نتایج و بحث

سازه‌های ساندویچی چندلایه با هسته موج‌دار با دو شکل مربعی و پروانه‌ای، تحت خمش سه‌نقطه قرار گرفته و تأثیر تغییر شکل هسته و وجود فوم بر روی خواص مکانیکی سازه به‌صورت تجربی مورد بحث قرار گرفته است. سفتی خمشی مربوط به هر نمونه با استفاده از مقادیر نیرو در ناحیه کشسان و جابه‌جایی متناظر با آن به‌دست آمده است. با توجه به غالب بودن اثر خمش در نمونه‌های بلند نسبت به اثر برش، مقدار دقیق سفتی خمشی نمونه‌ها از معادله ۱ به‌دست می‌آید.

$$D = EI = \frac{PL^3}{48\delta} \quad (1)$$

E مدول الاستیسیته، I ممان اینرسی، P نیرو در نقطه مورد نظر، L طول قطعه و  $\delta$  جابه‌جایی متناظر با نیرو است. نمودار تنش- کرنش به‌طور مستقیم از داده‌های تجربی حاصل از آزمون خمش سه‌نقطه به دست می‌آید. منحنی تنش-کرنش که در شکل ۴ نشان داده شده را می‌توان به سه ناحیه مجزا تقسیم‌بندی کرد:

ناحیه اول: نیرو به شکل خطی افزایش می‌یابد و نمونه رفتاری شبیه به ماده ای کشسان نشان می‌دهد. پس از این که نیرو در انتهای این ناحیه به بیشترین مقدار رسید، معمولاً شکست در رویه بالایی و در اثر تنش‌های فشاری رخ می‌دهد؛ چراکه در کامپوزیت‌ها به‌طور معمول استحکام فشاری کمتر از استحکام کششی است؛ سپس، نیرو به‌طور ناگهانی کاهش یافته و از مقدار تحمل بار نمونه به‌طور زیادی کم می‌شود. ناحیه دوم: نیرو پس از کاهش پیشین افزایش یافته و در ادامه تقریباً ثابت می‌ماند. در واقع پس از شکست رویه بالایی، دیگر باری به‌وسیله رویه بالایی تحمل نمی‌شود و بار وارد بر نمونه به هسته منتقل می‌شود. اما، با توجه به وجود هسته موج‌دار، بخش‌های بالایی این چندلایه که در مجاورت رویه بالایی قرار دارد، خود نقش رویه‌ای جدید را ایفا می‌کند. بنابراین، نمودار با خیزی دوباره مقداری بار تحمل کرده تا زمانی که این رویه نیز دچار شکست شود. ناحیه سوم: با ادامه بارگذاری پس از شکست بخش‌های بالایی لایه کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته، بار به هسته و در ادامه به بخش پایینی لایه کامپوزیتی موج‌دار و در نهایت به رویه پایینی منتقل می‌شود. هسته در اثر فشار و پوسته پایینی در اثر کشش تخریب شده و باربرداری نمونه به سمت مقدار صفر میل می‌کند [۳]. در نمونه‌های دارای فوم، وجود فوم باعث می‌شود تا قسمت‌های خالی هسته پُر شده و استحکام قطعه و تحمل بار فشاری آن نیز افزایش یابد و مانع از افت ناگهانی بار شود.

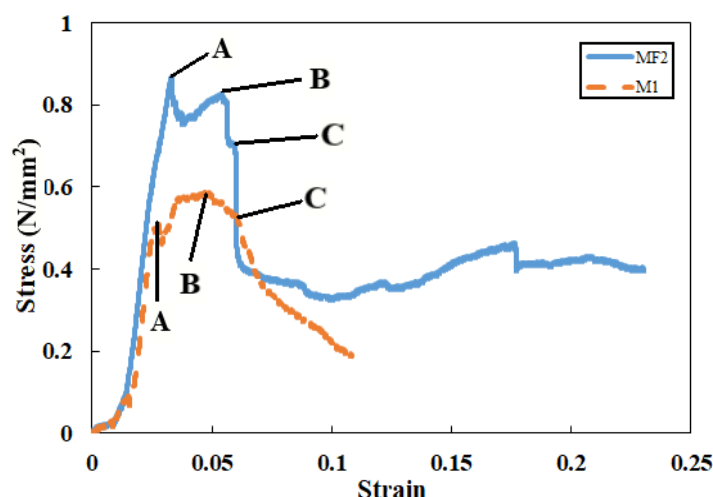


شکل ۴ نمودار تنش-کرنش نمونه M1

شکل ۵، ۷، ۹ و ۱۱ منحنی تنش-کرنش نمونه‌های ساندویچ پانل را به‌صورت تجربی نشان می‌دهد. نقاطی روی نمودارها در نظر گرفته شده تا رفتار قطعات تحت بارگذاری مورد بررسی قرار گیرد.

### ۳-۱- مقایسه نمونه‌های مربعی با فوم و بدون فوم

در شکل ۵ و ۶، نقطه A در دو حالت بدون فوم و با فوم، مربوط به زمانی است که بارگذاری بر روی رویه بالایی نمونه وارد می‌شود. هر دو منحنی پس از شکست رویه بالایی دچار افت بار شده و بارگذاری بر قسمت بالایی هسته بیشتر شده است. عمده‌ی بارگذاری در قطعه M1، توسط هسته تحمل شده است. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است اولین ترک در دیواره بیرونی هسته، حدفصل بین دونیمه هسته، به وجود آمده است. این درحالی است که در نمونه MF2 بیشترین بار وارده به قطعه، توسط رویه بالایی تحمل شده و وجود فوم و هسته موج‌دار در کنار هم یک ساختار منسجم به وجود آورده است، به طوری که با اعمال بارگذاری، آسیب زیادی را در فوم مشاهده نمی‌شود. با وجود این که فوم از وزن سبکی برخوردار است اما زمانی که داخل هسته تزریق می‌شود تحمل بار فشاری وارد بر سازه را به شکل قابل توجهی افزایش می‌دهد. در نقطه C بیشترین بار به قسمت میانی هسته و نیمه پایینی دو نمونه وارد شده که باعث ایجاد ترکی جدید در کنار ترک قبلی در نمونه M1 و خمش بیشتر فوم در MF2 شده است. اختلاف بیشینه نیرو از نقطه B در نمونه M1 و نقطه A در نمونه MF2 به دست آمده است. سفتی خمشی این دو نمونه از نقطه A به دست آمده که مقادیر آن به همراه بیشینه بار و بار شکست در جدول ۲ و ۳ و ۴ آورده شده است. نقطه A تسلیم اولیه نمونه بر اثر فشار و ایجاد اولین ترک در نمونه است. بار شکست از آخرین نقطه‌ای که نیرو بر نمونه اعمال شده، به دست آمده است. نتایج نشان‌دهنده تحمل بالاتر نمونه MF2 در برابر بار خمشی و سفتی خمشی و بار شکست بیشتر آن به دلیل وجود فوم است.



شکل ۵ مقایسه نمودار تنش- کرنش ساندویچ پانل با هسته مربعی بدون فوم و با فوم پلی‌اورتان

آسیب در نمونه M1 شامل فرورفتگی موضعی، ترک افقی در حدفصل بین دو هسته و ترک عمودی در نیمه پایینی هسته است. آسیب نمونه MF2 شامل فرورفتگی موضعی، شکست و لایه‌لایه شدن رویه بالایی است.

جدول ۲ اختلاف بیشینه نیرو بین MF2 و M1

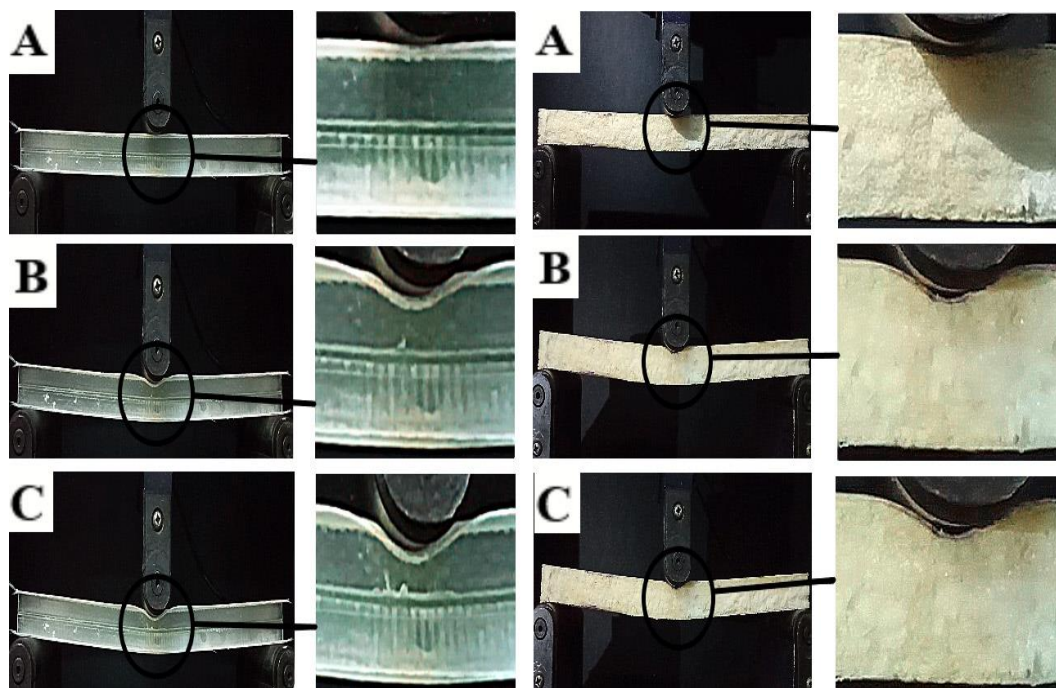
مقدار اختلاف	بیشینه نیرو MF2	بیشینه نیرو M1
47.3 %	1356 (N)	920.4 (N)

جدول ۳ اختلاف سفتی خمشی بین MF2 و M1

مقدار اختلاف	سفتی خمشی MF2	سفتی خمشی M1
41.4 %	76.65 (N.m²)	54.18 (N.m²)

جدول ۴ اختلاف بار شکست بین MF2 و M1

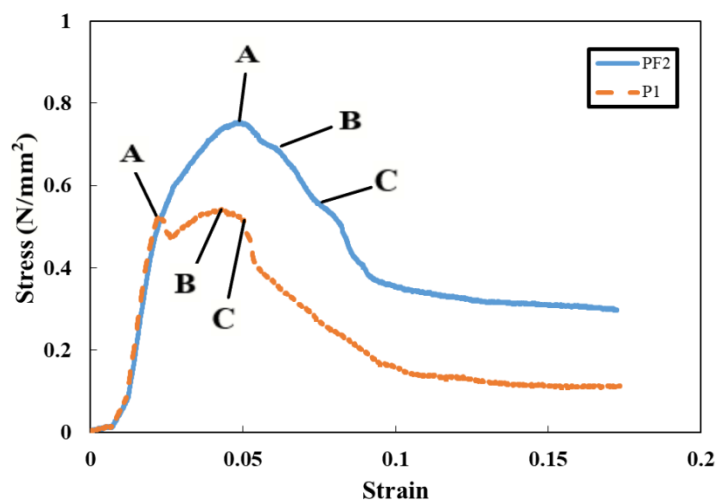
مقدار اختلاف	بار شکست MF2	بار شکست M1
111.9 %	626.4 (N)	295.5 (N)



شکل ۶ مقایسه رفتار نمونه ساندویچ پانل با هسته مربعی بدون فوم (چپ) و با فوم پلی‌اورتان (راست) حین خمش سه‌نقطه

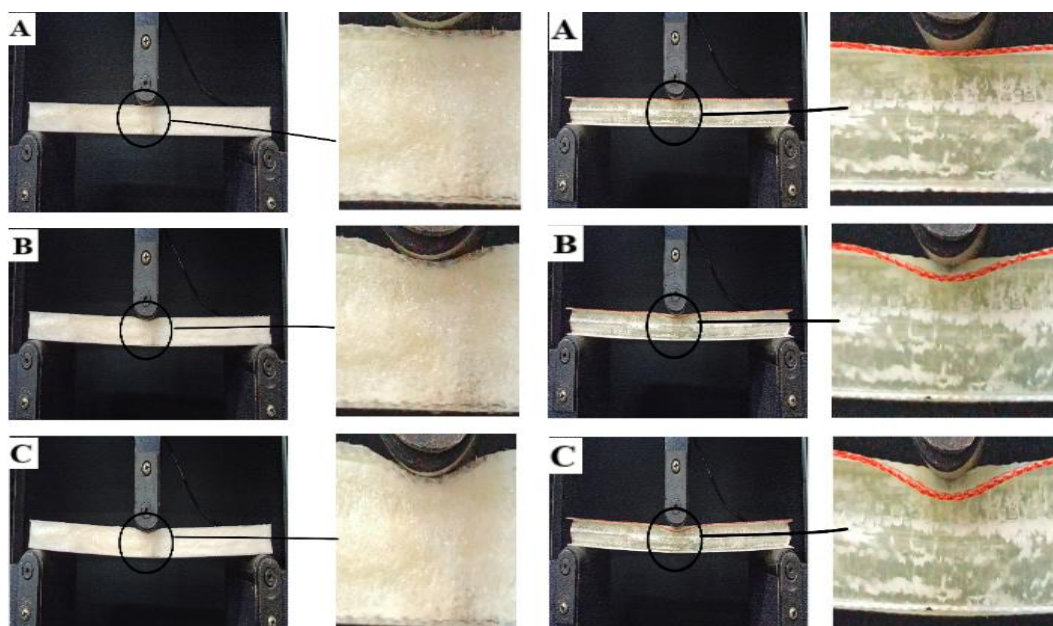
### ۳-۲- مقایسه نمونه‌های پروانه‌ای با فوم و بدون فوم

همان‌طور که در شکل‌های ۷ و ۸ مشخص شده است، در قطعه P1 پس از نقطه A که تنش تسلیم در آن اتفاق افتاده است، افت بار مشاهده شد، در حالی که در PF2 پس از بارگذاری بر رویه بالایی، به دلیل وجود فوم، بار تحملی افزایش یافته است. فوم پلی‌اورتان با پر کردن قسمت‌های خالی نمونه‌ها و در برگرفتن هسته موج‌دار، باعث استحکام هسته و رویه‌ها شده و قطعات را تقریباً به صورت یکپارچه درآورده و مانع از افت بار در طی روند بارگذاری شده است. نقطه B، در نمونه P1 و نقطه A در PF2 نشان‌دهنده بیشترین بار تحملی توسط دو نمونه است؛ سپس شیب کاهش یافته و نقطه C نیز بیشترین بار تحملی توسط قسمت پایینی هسته و رویه زیرین قطعه است. در مقایسه با P1، به دلیل داشتن فوم، از سفتی خمشی و بار تحملی و بار شکست بیشتری برخوردار است. بیشینه نیرو در PF2 از نقطه A و در نمونه P1 از نقطه B به دست آمده است. سفتی خمشی نیز از نقاط تسلیم اولیه و بار شکست نیز از آخرین نقطه هر نمودار به دست آمد. در جدول‌های ۵ تا ۷ نتایج مقایسه بیشینه نیرو و سفتی خمشی و بار شکست آورده شده است.



شکل ۷ مقایسه نمودار تنش-کرنش ساندویچ پانل با هسته پروانه‌ای بدون فوم و با فوم پلی‌اورتان

آسیب در نمونه PF2 شامل فرورفتگی موضعی و شکست و لایه لایه شدن رویه بالایی است. آسیب نمونه P1 شامل لایه لایه شدن رویه بالایی، ترک عمودی در نیمه بالایی هسته و ترک افقی و عمودی در نیمه پایینی هسته است.



شکل ۸ مقایسه رفتار نمونه ساندویچ پانل با هسته پروانه‌ای با فوم (چپ) و بدون فوم پلی‌اورتان (راست) حین خمش سه نقطه

جدول ۵ اختلاف بیشینه نیرو بین PF2 و P1

مقدار اختلاف	بیشینه نیرو PF2	بیشینه نیرو P1
39.5 %	1182 (N)	847.2 (N)

جدول ۶ اختلاف سفتی خمشی بین PF2 و P1

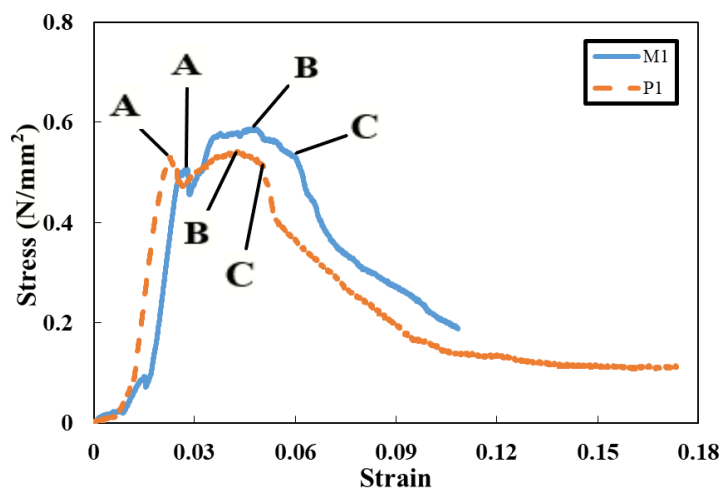
مقدار اختلاف	سفتی خمشی PF2	سفتی خمشی P1
6.8 %	63.7 (N.m <sup>2</sup> )	68.36 (N.m <sup>2</sup> )

جدول ۷ اختلاف بار شکست بین PF2 و P1

مقدار اختلاف	بار شکست PF2	بار شکست P1
164.6 %	466.8 (N)	176.4 (N)

### ۳-۳- مقایسه نمونه‌های مربعی و پروانه‌ای بدون فوم

در شکل‌های ۹ و ۱۰، پس از تنش تسلیم (نقطه A)، عمده‌ی بارگذاری در قطعه M1، توسط هسته تحمل شده است و نقطه B مربوط به زمانی است که هسته M1 بیشترین بار را تحمل کرده است و همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، اولین ترک در دیواره بیرونی هسته، حفاصل بین دو نیمه هسته، به وجود آمده است. در قطعه P1 نقطه B بیشترین بار تحملی توسط قسمت بالایی هسته را نشان داده است. در نقطه C فشار بیشتری به قسمت میانی هسته و نیمه پایینی دو نمونه وارد شده است. با تغییر شکل آرایش هسته از مربعی به پروانه‌ای، به دلیل شکل هندسی هسته پروانه‌ای و ضریب پواسون منفی آن، نمونه پروانه‌ای سفتی خمشی بیشتری نسبت به نمونه مربعی دارد و این اختلاف حدود ۲۶/۱ درصد است. اختلاف بین بیشینه بار در نقطه B، ۷/۹ درصد و اختلاف بین بار شکست نیز ۲۶/۴ درصد محاسبه شده است. با وجود این که نمونه پروانه‌ای سفتی خمشی بالاتری دارد اما نمونه مربعی به دلیل داشتن ریب‌های عمودی که عملکردی ستون‌مانند دارند، بار بیشتری را تحمل کرده و دارای بار شکست بیشتری است. در جدول ۸ و ۹ و ۱۰ این اطلاعات ذکر شده است.



شکل ۹ مقایسه نمودار تنش- کرنش ساندویچ پانل با هسته مربعی و پروانه‌ای بدون فوم پلی‌اورتان

جدول ۸ اختلاف بیشینه نیرو بین M1 و P1

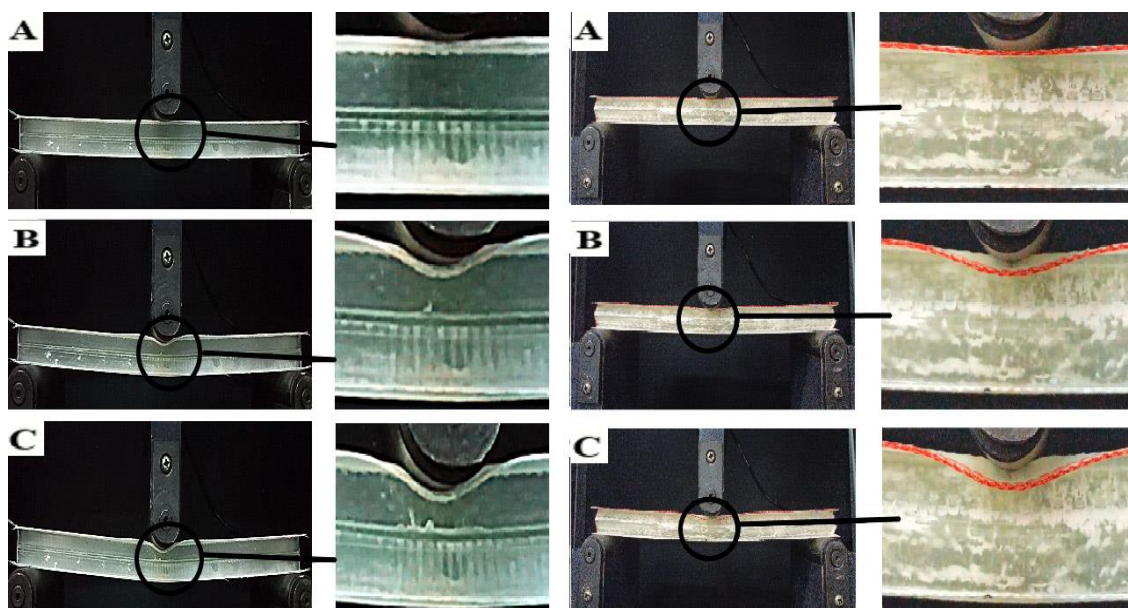
مقدار اختلاف	بیشینه نیرو P1	بیشینه نیرو M1
7.9 %	847.2 (N)	920.4 (N)

جدول ۹ اختلاف سفتی خمشی بین M1 و P1

مقدار اختلاف	سفتی خمشی P1	سفتی خمشی M1
26.1 %	68.36 (N.m²)	54.18 (N.m²)

جدول ۱۰ اختلاف بار شکست بین M1 و P1

مقدار اختلاف	بار شکست P1	بار شکست M1
40.3 %	176.4 (N)	295.5 (N)

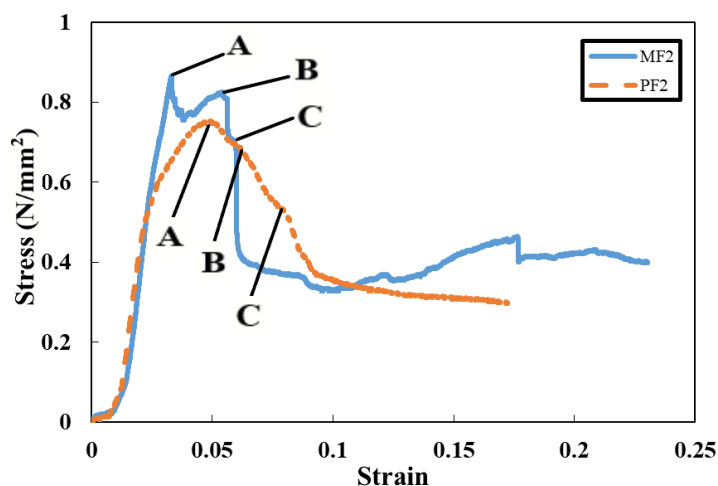


شکل ۱۰ مقایسه رفتار نمونه ساندویچ پانل با هسته مربعی (چپ) و پروانه‌ای (راست) بدون فوم پلی‌اورتان حین خمش سه نقطه

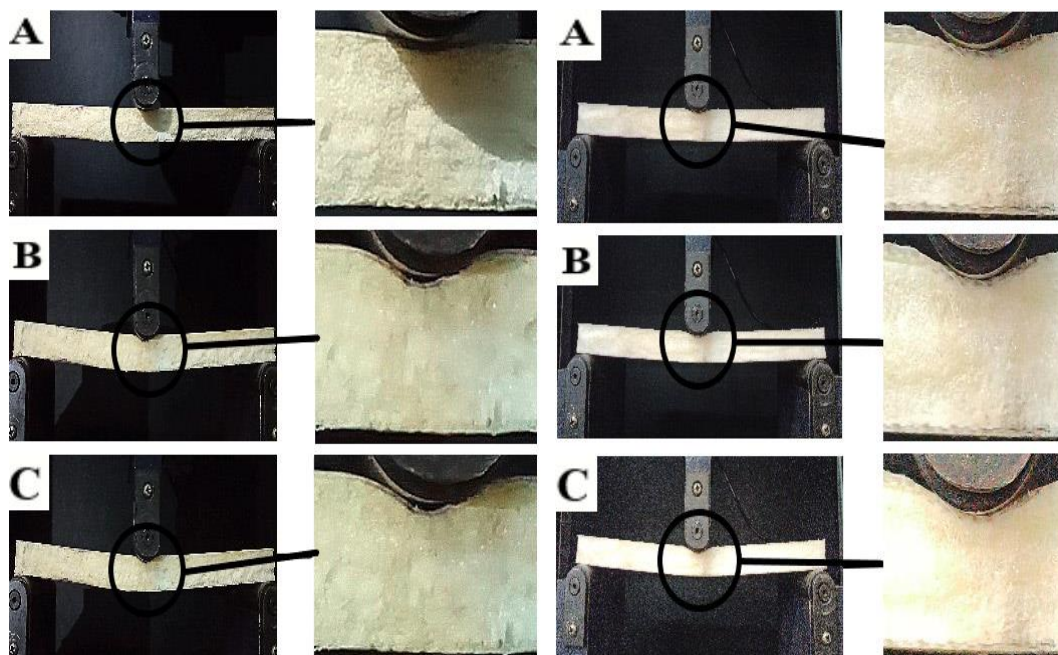
### ۳-۴- مقایسه نمونه‌های مربعی و پروانه‌ای با فوم

با توجه به شکل ۱۲ دو نمونه MF2 و PF2 به دلیل داشتن فوم و تأثیر آن بر افزایش مقاومت قطعه در برابر نیروی وارده بر اثر خمش، از بیشینه نیروی بالایی برخوردار هستند. همان‌طور که پیشتر گفته شد تفاوت در آن‌جا است که هندسه هسته پروانه‌ای و داشتن پواسون منفی و همچنین وجود فوم باعث شده تا پس از نقطه تسلیم در نمونه پروانه‌ای افت بار رخ ندهد. به‌طور کلی نمونه مربعی به دلیل داشتن ریب‌های عمودی که در قطعه مانند ستون عمل می‌کنند، بار بیشتری را نسبت به پروانه‌ای تحمل کرده است. در نقطه B نیز بارگذاری به قسمت بالایی هسته نمونه MF2 وارد شده که در نمونه PF2 این نقطه متناظر با نقطه A است. نقطه C نیز بیشترین بار تحمیلی توسط قسمت پایینی هسته و رویه زیرین قطعه است. می‌توان اختلاف موجود در نمودار MF2 را در عیوب اولیه سازه مانند وجود حفره‌های هوا در فوم یا استحکام قطعه به هنگام ساخت دانست، زیرا در حالی که روند افت نمونه پروانه‌ای تدریجی است در نمونه مربعی این روند سریع‌تر رخ می‌دهد. شکل ۱۲ نیز روند خمش قطعات در این نقاط را نشان داده است.

با توجه به جدول ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ بیشینه نیرو، سفتی خمشی و بار شکست در نمونه MF2 نسبت به PF2 بیشتر است. سفتی خمشی نمونه‌ها، اختلاف بین بیشینه بار در نقطه A و همچنین بار شکست، به ترتیب ۱۶/۹، ۱۲/۸ و ۲۵/۴ درصد است.



شکل ۱۱ مقایسه نمودار تنش- کرنش ساندویچ پانل با هسته مربعی و پروانه‌ای با فوم پلی‌اورتان



شکل ۱۲ مقایسه رفتار نمونه ساندویچ پانل با هسته مربعی (چپ) و پروانه‌ای (راست) با فوم پلی‌اورتان حین خمش سه‌نقطه

جدول ۱۱ اختلاف بیشینه نیرو بین MF2 و PF2

مقدار اختلاف	بیشینه نیرو PF2	بیشینه نیرو MF2
12.8 %	1182 (N)	1356 (N)

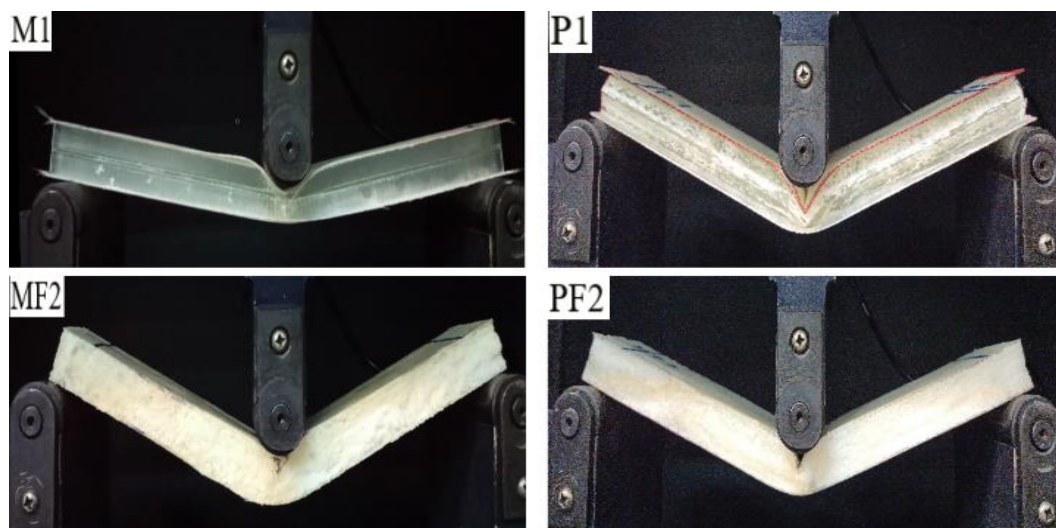
جدول ۱۲ اختلاف سفتی خمشی بین MF2 و PF2

مقدار اختلاف	سفتی خمشی PF2	سفتی خمشی MF2
16.9 %	63.7 (N.m <sup>2</sup> )	76.65 (N.m <sup>2</sup> )

جدول ۱۳ اختلاف بار شکست بین MF2 و PF2

مقدار اختلاف	بار شکست PF2	بار شکست MF2
25.4 %	466.8 (N)	626.4 (N)

در شکل ۱۳ مرحله پایانی بارگذاری در نمونه‌ها مشاهده شده است. آسیب در دو آرایش هسته شامل: ترک خوردگی ماتریس، شکستن الیاف، لایه لایه شدن، فرورفتگی موضعی، خمش سراسری، خرد شدن و کمانش دیواره‌های سلولی و رویه‌ها است.



شکل ۱۳ قطعات در مرحله آخر بارگذاری

#### ۴- نتیجه‌گیری

این تحقیق به بررسی رفتار خمشی و آسیب دو آرایش جدید هسته موج دار (مربعی و پروانه‌ای) که به دو صورت بدون فوم پلی‌اورتان و با فوم و با استفاده از روش تزریق رزین به کمک خلأ ساخته شده، تحت خمش سه نقطه پرداخته است. سفتی خمشی و بیشینه نیرو در هر نمونه به دست آمده و تأثیر تغییر آرایش از مربعی به پروانه‌ای و همچنین وجود فوم پلی‌اورتان در نمونه‌ها بررسی شده است.

در ادامه نتایج به دست آمده از این تحقیق ذکر شده است:

- ۱- با تغییر شکل آرایش هسته از مربعی به پروانه‌ای اختلاف بیشینه نیرو و سفتی خمشی و بار شکست بین نمونه مربعی و پروانه‌ای بدون فوم به ترتیب ۷/۹ و ۲۶/۱ و ۴۰/۳ درصد و در نمونه‌های با فوم ۱۲/۸ و ۱۶/۹ و ۲۵/۴ درصد است.
- ۲- هسته پروانه‌ای با توجه به ساختار هندسی که دارد نسبت به هسته مربعی دارای مقاومت بالاتری است و به دلیل داشتن ضریب پواسون منفی می‌تواند بار زیادی را تحمل کند و همچنین سفتی خمشی بالاتری نیز دارد اما نمونه مربعی به دلیل ریب‌های عمودی خود که مانند ستون رفتار می‌کند، بار بیشتری را تحمل کرده و بار شکست بیشتری نیز دارد.

- ۳- با مقایسه بین نمونه‌های با فوم و بدون فوم در آرایش‌های مربعی و پروانه‌ای بیشینه نیرو نمونه‌ها اختلاف محسوسی دارد و میزان سفتی خمشی و بار شکست افزایش پیدا کرده است. در مقایسه بین نمونه مربعی با فوم و بدون فوم، این اختلاف ۴۷/۴ و ۴۱/۴ و ۱۱۱/۹ درصد و در نمونه‌های پروانه‌ای ۳۹/۵ و ۶/۸ و ۱۶۴/۶ درصد است.
- ۴- از آنجا که تزریق فوم به نمونه‌ها موجب می‌شود که فضای خالی بین دو نیمه هسته پر شده و قطعات به صورت یک پارچه دربیایند و استحکام قطعه و تحمل بار فشاری آن نیز افزایش یابد و مانع از افت بار ناگهانی شود، تأثیر فوم بر افزایش بیشینه نیرو از تغییر آرایش هسته بیشتر است.
- ۵- آسیب در دو آرایش هسته شامل: ترک خوردگی ماتریس، شکستن الیاف، لایه لایه شدن، فرورفتگی موضعی، خمش سراسری، خرد شدن و کمانش دیواره‌های سلولی و رویه‌ها است.

### فهرست علائم

$D$	سفتی خمشی ( $N.m^2$ )
$d$	ضخامت کل نمونه (m)
$E$	ثابت کشسانی کششی (Pa)
$I$	گشتاور اینرسی سطح ( $m^4$ )
$L$	طول کل نمونه (m)
$P$	بار خمشی (N)
$t_c$	ضخامت هسته (m)
$t_s$	ضخامت رویه در نمونه خمش (m)

### علائم یونانی

$\delta$	جابه‌جایی متناظر با نیرو در ناحیه کشسان (m)
$\rho$	چگالی ( $kgm^{-3}$ )
$\nu$	ضریب پواسون

### References

- [1] Foroghina MH, Sotoudeh A. Experimental study of energy absorption of composite sandwich panel with sinusoidal corrugated core and filled with foam. 16th International Conference of Iranian Aerospace Associations. 2015. [In Persian]
- [2] Farrokhabadi A, Taghizadeh SA, Madadi H, Norouzi H, Ataei A. Experimental and numerical analysis of novel multi-layer sandwich panels under three point bending load. Composite Structures. 2020 Oct 15;250:112631. doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112631
- [3] Rahmani RA, Rahimi G, Seyed Hosseini S. Flexural behavior of sandwich structures consisting of corrugated composite core with different geometries. Iranian Journal of Polymer Science and Technology. 2015:175-87. doi: 10.22063/jipst.2015.1254
- [4] Hai F, Weiqing L, Weidong L, Li W. Flexural Properties of Grooved Perforation Sandwich Composites. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed. 2010;25(4):583-7. doi: 10.1007/s11595-010-0048-5
- [5] Feng D, Aymerich F. Damage prediction in composite sandwich panels subjected to low-velocity impact. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2013 Sep 1;52:12-22. doi: 10.1016/j.compositesa.2013.04.010
- [6] Karahan M, Gul H, Karahan N, Ivens J. Static behavior of three-dimensional integrated core sandwich composites subjected to three-point bending. Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2013 May;32(9):664-78. doi: 10.1177/0731684412474857
- [7] Zu GY, Lu RH, Li XB, Zhong ZY, HAN MB, YAO GC. Three-point bending behavior of aluminum foam sandwich with steel panel. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2013 Sep 1;23(9):2491-5. doi: 10.1016/S1003-6326(13)62759-4

- [8] Jedari Salami S, Sadighi M, Shakeri M, Moeinfar M. An investigation on Low Velocity Impact Response of Multilayer Sandwich Composite Structures. Hindawi Publishing Corporation the Scientific World Journal. 2013. doi: 10.1155/2013/175090
- [9] Yan LL, Yu B, Han B, Chen CQ, Zhang QC, Lu CT. Compressive strength and energy absorption of sandwich panels with aluminum foam-filled corrugated cores. Composites Science and Technology. 2013;86:142-8. doi: 10.1016/j.compscitech.2013.07.011
- [10] Zhang J, Supernak P, Mueller-Alander S, Wang Chun H. Improving the bending strength and energy absorption of corrugated sandwich composite structure. Materials and Design. 2013;52:767-73. doi: 10.1016/j.matdes.2013.05.018
- [11] Mohammadi Dehabadi A, Rahimi Gh H, Rahmani R. Experimental investigation on core shape effect on compressive properties of sandwich structures with composite skins. Corrugated composite core and foam. Modares Mechanical Engineering. 2015;15(4):51-7. [In Persian]
- [12] Srivaro S, Matan N, Lam F. Stiffness and strength of oil palm wood core sandwich panel under center point bending. Materials and Design. 2015;84:154-62. doi: 10.1016/j.matdes.2015.06.097
- [13] Studzin'ski R, Pozorski Z. Experimental and numerical analysis of sandwich panels with hybrid core. Journal of Sandwich Structures and Materials. 2016:1-16. doi: 10.1177/1099636216646789
- [14] Arbaoui J, Moustabchir H, Pruncu CI, Schmitt Y. Modeling and experimental analysis of polypropylene honeycomb multi-layer sandwich composites under four-point bending. Journal of Sandwich Structures and Materials. 2016:1-19. doi: 10.1177/1099636216659779
- [15] Sayahlatifi S, Rahimi Gh H, Bokaei A. The quasi-static behavior of hybrid corrugated composite/balsa core sandwich structures in four-point bending: Experimental study and numerical simulation. Engineering Structures. 2020 May 1;210,110361. doi: 10.1016/j.engstruct.2020.110361
- [16] Sayahlatifi S, Rahimi Gh H, Bokaei A. Experimental and numerical investigation of sandwich structures with balsa core and hybrid corrugated composite/balsa core under three-point bending using digital image correlation. Journal of Sandwich Structures & Materials. 2021 Jan;23(1):94-131. doi: 10.1177/1099636218822333
- [17] Taghizadeh SA, Naghdinasb M, Madadi H, Farrokhabadi A. Investigation of novel multi-layer sandwich panels under quasi-static indentation loading using experimental and numerical analyses. Thin-Walled Structures. 2021 Mar;160,107326. doi: 10.1016/j.tws.2020.107326
- [18] Naresh K, Cantwell WJ, Khan KA, Umer R. Single and multi-layer core designs for Pseudo-Ductile failure in honeycomb sandwich structures. Composite Structures. 2021;256. doi: 10.1016/j.compstruct.2020.113059
- [19] Meng L, Lan X, Zhao J, Li H, Wang Z, Gao L. Failure analysis of bio-inspired corrugated sandwich structures fabricated by laser powder bed fusion under three-point bending. Composite Structures. 2021 May 1;263,113724. doi: 10.1016/j.compstruct.2021.113724
- [20] Ren Y, Deng Y, Jiang H. Core reinforcement design for improving flexural energy-absorption of corrugated sandwich composite structure. Chinese Journal of Aeronautics. 2021;34(5):510-22. doi: 10.1016/j.cja.2020.10.002
- [21] Veisi H, Farrokhabadi A. Investigation of the equivalent material properties and failure stress of the re-entrant composite lattice structures using an analytical model. Composite Structures. 2021;257,113161. doi: 10.1016/j.compstruct.2020.113161
- [22] Dang W, Liu X, Sun B. Bending Analysis of Integrated Multilayer Corrugated Sandwich Panel Based on 3D Printing. Preprints. 2022,2022080060. doi: 10.20944/preprints202208.0060.v1
- [23] Khaledi H, Rostamiyan Y. Experimental and numerical investigation on bending and compressive behavior of carbon-epoxy sandwich panel with novel M-shaped core. Journal of Thermoplastic Composite Materials. 2023 Apr;36(4):1504-28. doi: 10.1177/08927057211046653
- [24] Yuan H, Zhang J, Sun H. The failure behavior of double-layer metal foam sandwich beams under three-point bending. Thin-Walled Structures. 2022 Nov 1;180:109801. doi: 10.1016/j.tws.2022.109801
- [25] Vakilifard A, Mazaheri H, Shaban M. Bending behavior and geometrical optimization of five-layered corrugated sandwich panels with equal in-plane principal stiffness. Journal of Composite Materials. 2022 Jul;56(17):2739-53. doi: 10.1177/00219983221082236
- [26] Zhang J, Zhu Y, Yuan H, Huang W. Failure behavior of sandwich beams with glass fiber-reinforced epoxy/aluminum laminates face-sheets and aluminum honeycomb core under three-point bending. Thin-Walled Structures. 2022 Aug 1;177:109476. doi: 10.1016/j.tws.2022.109476