



بررسی تجربی و عددی خواص مکانیکی رفتار خمش و فشار ساندویچ پانل الیاف کربن / اپوکسی با هسته جدید M شکل

همین خالدی^۱ و یاسر رستمیان^{۲*}

^۱ دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، علی‌آباد کتول، ایران

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۳۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۲/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۷

چکیده

مقاله حاضر با رویکرد تجربی و عددی رفتار مکانیکی ساندویچ پانل کامپوزیتی با هسته جدید مشبک M شکل را بررسی کرده است که تحت بارهای خمشی سه‌نقطه‌ای و فشاری قرار دارد. برای این منظور، در این آزمایش یک ساندویچ پانل کامپوزیتی با هسته M شکل از الیاف کربن ساخته شده است. برای ساخت ساندویچ پانل‌ها، از روش قالب انتقال رزین به کمک خلا (VARTM) برای دستیابی به یک ورقه (لمینیت) عاری از هرگونه نقصی استفاده شده است. پس از آن، فوم پلی‌اورتان با چگالی ۸۰ کیلوگرم بر متر مکعب به هسته ساندویچ پانل تزریق شده است. سپس، یک طراحی منحصر به فرد برای هسته‌های ساندویچ پانل ارائه شده است. مطالعه منحنی‌های نیرو برحسب جابجایی به دست آمده از آزمون‌های فشار و خمش سه نقطه‌ای بر ساندویچ پانل نشان داد که ساندویچ پانل درحالی که سبک است، از یک مقاومت مکانیکی مطلوب برخوردار است. لازم به ذکر است که داده‌های تجربی با نتایج شبیه‌سازی عددی در نرم افزار آباکوس مقایسه گردید و مشخص شد که نتایج عددی با نتایج تجربی مطابقت خوبی دارند؛ لذا امکان استفاده از شبیه‌سازی عددی به جای روش‌های تجربی وقت‌گیر را برای طراحی و تجزیه و تحلیل فراهم می‌کند.

کلمات کلیدی: ساندویچ پانل؛ الیاف کربن؛ هسته مشبک M شکل؛ بارخمش سه‌نقطه‌ای؛ بارفشاری؛ آباکوس.

Experimental and Numerical Investigation on Mechanical Properties of Bending and Compressive Behaviour of Carbon-Epoxy Sandwich Panel with Novel M-Shaped Core

H. Khaledi¹, Y. Rostamiyan^{2,*}

¹ Ph.D. Student, Department of Mechanical engineering, Islamic Azad University, Aliabad-e-Katul, Iran.

² Assistant Professor, Department of Mechanical engineering, Islamic Azad University, Sari, Iran.

Abstract

Present paper has experimentally and numerically investigated the mechanical behaviour of composite sandwich panel with novel M-shaped lattice core subjected to three-point bending and compressive loads. For this purpose, a composite sandwich panel with M-shaped core made of carbon fiber has been fabricated in this experiment. In order to fabricate the sandwich panels, the vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) has been used to achieve a laminate without any fault. Afterward, polyurethane foam with density of 80 Kg/m³ has been injected into the core of the sandwich panel. Then, a unique design was presented to sandwich panel cores. The study of force-displacement curves obtained from sandwich panel compression and three-point bending tests, showed that an optimum mechanical strength with a considerable lightweight. It should be noted that the experimental data was compared to numerical simulation in ABAQUS software and it turned out that numerical results are in good agreement with experimental ones and make it possible to use simulation instead of time-consuming experimental procedures for design and analysis.

Keywords: Sandwich Panel; M-Shaped Lattice Core; Three-Point Bending Load; Compressive Load; ABAQUS.

۱- مقدمه

ساندویچ پانل‌ها از دو صفحه در بالا و پایین با یک هسته مشبک ساخته شده‌اند که معمولاً هر دو از مواد کامپوزیتی تشکیل می‌شوند. نسبت مقاومت به وزن بالا مشخصه اصلی در ساندویچ پانل‌ها است. نقش اصلی هسته مشبک این است که ورق‌های سطح را جدا نگه دارد و باعث شود، کل صفحه مانند یک جسم در برابر تغییر شکل‌های عمودی مقاومت کند. ساندویچ پانل‌های کامپوزیتی با هسته‌های مشبک به دلیل وزن کم و مقاومت بالایی که دارند، کاربردهای گسترده‌ای در صنایع حمل و نقل، خودروسازی، هوافضا و همچنین سازه‌های دریایی دارند. هندسه هسته شبکه تأثیر زیادی در توزیع بار دارد. تحقیقات زیادی در مورد خصوصیات مکانیکی ساندویچ پانل‌های کامپوزیتی مانند، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی سه نقطه و مقاومت خمشی خاص انجام شده است.

خواص مکانیکی ساندویچ پانل کامپوزیت چند لایه با هسته راه راه تحت خمشی شبه استاتیک سه نقطه‌ای به صورت تجربی و همچنین به صورت عددی توسط فرخ آبادی و همکاران [۱] بررسی شده است. جن و تانگ [۲]، آزمایشات خمشی چهار نقطه‌ای را روی تیر ساندویچ با ترکیبات شیشه/پلی پروپیلن و هسته‌های فوم آلومینیومی انجام دادند و به طور آزمایشی اثرات ضخامت لمینیت، ارتفاع هسته و جهت زاویه را بر مقاومت خمشی و خرابی بررسی کردند. اخمت و همکاران [۳]، به تجزیه و تحلیل عملکرد ساختارهای ساندویچ هسته موجدار چسب دار با استفاده از روش منطقه منسجم پرداختند. سایالتیفی و همکاران [۴]، با رویکرد عددی و تجربی رفتار نیمه استاتیک سازه‌های ترکیبی موجدار هسته (بالسا موج‌دار) در خمشی چهار نقطه‌ای را مطالعه کرد. فلورانس و دیگران [۵]، اثر مواد جاذب انرژی را بر رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های هسته ساندویچ لانه زنبوری تقویت شده با الیاف فیبر مطالعه کردند که تحت خمشی سه نقطه‌ای، فشار و ضربه شاری بودند. ما و همکاران [۶]، آزمایش خستگی خمشی ساندویچ پانل‌های لانه زنبوری را با استفاده از یک تست خمشی سه نقطه‌ای بهبود یافته انجام دادند. جوزف و همکاران [۷]، به صورت تحلیلی و تجربی نتایج رفتار خمشی ساندویچ پانل‌های بتنی را ارائه دادند که تحت

فشار و خمشی چهار نقطه قرار داشتند. ژو و همکاران [۸]، یک روش جایگزین با هزینه کم برای ارزیابی مقاومت فشاری پسماند ساندویچ پانل تحت خمشی چهار نقطه ایجاد کرد. وانگ و زیونگ [۹]، از روش تست‌های خمشی سه نقطه‌ای، عملکرد مقاومت در برابر خمشی ساندویچ پانل لانه زنبوری دارای روکش کاشی و سرامیک بررسی کردند. شی و همکاران [۱۰]، روش سفت شدن الیاف کولار کوتاه را برای خمشی سه نقطه‌ای و رفتار فشرده‌سازی درون صفحه‌ای ساندویچ پانل‌های الیاف کربن / آلومینیوم - لانه زنبوری ارائه دادند. فورمیسانو و همکاران [۱۱]، رفتار مکانیکی و مکانیسم‌های خرابی ساندویچ پانل‌های مبتنی بر فوم آلومینیومی را که در معرض خمشی سه نقطه قرار دارند، مطالعه کردند. سان و همکاران [۱۲]، برای بررسی رفتارهای خردکردن ساندویچ‌های لانه زنبوری، آزمایش خمشی سه نقطه‌ای و فشرده‌سازی درون پانلی را روی ساندویچ پانل‌های لانه زنبوری آلومینیومی انجام دادند. وانگ و زیونگ [۱۳] مطالعه عددی در مورد رفتار خمشی سه نقطه‌ای ساندویچ پانل لانه زنبوری با ترکیب کاشی و سرامیک ارائه دادند. روپ و همکاران [۱۴]، بر حالت و مودهای خرابی ساندویچ پانل تحت بار خمشی متمرکز شده‌اند که با استفاده از یک فرآیند پاشش پلی‌اورتان تولید شده‌اند. سینار [۱۵] ساندویچ پانل‌ها را با هسته فوم تقویت شده با لوله کامپوزیت در معرض خمشی و فشرده‌سازی تخت ارزیابی کرد. شاه و کاپانیا [۱۶]، رفتار ساندویچ پانل‌های هسته لانه زنبوری شش ضلعی و مثلثی را که در معرض بارهای خمشی سه نقطه‌ای، بارگذاری فشاری درون صفحه‌ای و بارگذاری عرضی برشی قرار داشتند را با استفاده از روش اجزای محدود تحلیل کردند. دجاما و همکاران [۱۷]، یک ساندویچ پانل ساخته شده از پوسته‌های ترکیبی و هسته خرابایی پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه را با استفاده از یک روش ساخت جدید تهیه کردند و در نهایت تجزیه و تحلیل رفتار مکانیکی پانل ساندویچ را انجام دادند. گائو و همکاران [۱۸]، به طور آزمایشی رفتار خمشی ساختارهای ساندویچی لانه زنبوری را مطالعه کردند که توسط لیتوگرافی ترنو پردازش دیجیتال تهیه شده است. اوزی و همکاران [۱۹]، رفتار مکانیکی سازه‌های ساندویچی با هشت پیکربندی مختلف با الیاف و هسته‌های فومی با

پلی‌اورتان بر رفتار مکانیکی ساندویچ پانل تحت بار خمشی و فشاری.

۲- مواد و روش

در این پژوهش از رزین اپوکسی EC 130 LV استفاده شده است که مشخصات رزین اپوکسی در جدول ۱ نشان داده شده است. برای ساخت لمینیت از الیاف کربن با چگالی ۱۷۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب، بافته شده (دو جهته) با مشخصات نشان داده شده در جدول ۲ استفاده شده است؛ همچنین از نانوذرات سیلیکا کروی، با قطر متوسط ۵۰ نانومتر به عنوان تقویت کننده استفاده شده است.

۳- مراحل طراحی و ساخت

ساخت نمونه‌ها در دو مرحله انجام گرفته است: مرحله اول ساخت لمینیت از روش انتقال رزین تحت خلاء (VARTM) انجام می‌شود. فضایی محصور، توسط خمیر سیلانت، روی شیشه ایجاد می‌کنیم و داخل فضای ایجاد شده را با ریلیزواکس (واکس اتومبیل) آغشته می‌کنیم. لوله‌هایی به قطر ۰/۵ میلیمتر را به حالت اسپیرال (مارپیچ) برش زده و

جدول ۱- خواص رزین اپوکسی [۲۱]

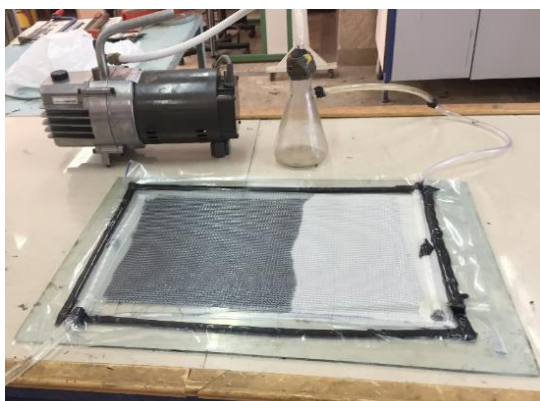
W340	EC 130 LV	نام تجاری
سخت‌کننده	رزین	
۰/۹۲- ۰/۹۴	۱/۱۴- ۱/۱۶	چگالی $25^{\circ}C$ (kg/m^3)
-	۹۵-۱۱۷	مدت زمان سخت شدن (min)
-	۵۰۰-۸۰۰	ویسکوزیته اولیه مخلوط $25^{\circ}C$ ($mPas$)
۴۵-۵۵	۱۲۰۰-۱۶۰۰	ویسکوزیته ($25^{\circ}C$) ($mPas$)

جدول ۲- خواص الیاف کربن دوجته [۲۱]

مقدار	خواص
۱/۷۶	چگالی (gr/cm^3)
۳۵۰۰	مقاومت کششی (MPa)
۲۳۰	مدول کششی (GPa)
۱/۵	کرنش

تراکم بسیار کم را ارائه دادند که تحت بار خمشی سه نقطه‌ای بود. وانگ و همکاران [۲۰] اثرات ضخامت و تراکم هسته بر مقاومت، سختی و مقاومت لایه‌برداری ساندویچ پانل‌های کامپوزیتی تقویت شده با فیبرکربن را بررسی کردند. نوروزی و رستمیان [۲۱]، با مطالعه تجربی و عددی رفتار فشاری بر ساندویچ پانل کامپوزیت فیبرکربن با هسته‌های مشبک جدید را بررسی کردند. عارفی و نجفی‌تبار [۲۲] به تجزیه و تحلیل کماتش و ارتعاش آزاد یک تیر ساندویچی ساخته شده از یک هسته نرم با ورق‌های از جنس کامپوزیت تقویت شده با استفاده از روش ریتز پرداختند. عارفی و همکاران [۲۳]، به تجزیه و تحلیل مگنتو الکترو حرارتی سه‌بعدی نانو ورق لایه‌ای شامل نانو ورق هسته متخلخل و صفحات پیزومغناطیسی پرداختند. عارفی و همکاران [۲۴] با استفاده از نظریه گرادیان کرنش غیرمحملی پاسخ ارتعاش مغناطیسی-الکترو الاستیک یک نانو ورق ساندویچی با هسته مدرج تابعی متخلخل با ورق‌های پیزومغناطیسی بررسی کردند که روی یک پایه الاستیک قرار گرفته‌اند. عارفی و همکاران [۲۵]، ارتعاش آزاد صفحه نانو ساندویچی شامل هسته مدرج تابعی و ورق‌های پیزوالکتریک با در نظر گرفتن سطح خنثی فیزیکی را تجزیه و تحلیل نمودند. بیدگلی و همکاران [۲۶]، ارتعاش آزاد پوسته منحنی شکل لانه زنبوری با لایه‌های پیزوالکتریک تقویت شده با نانولوله‌های کربنی را تجزیه و تحلیل کردند.

با مرور ادبیات پیشین، می‌توان فهمید که هیچ مطالعه‌ای در زمینه بررسی و تجزیه و تحلیل آسیب در ساندویچ پانل‌های کامپوزیتی با هسته مشبک جدید M شکل وجود ندارد که در معرض بار خمشی سه نقطه‌ای و بار فشاری قرار دارد. این مقاله به صورت تجربی و عددی رفتار مکانیکی ساندویچ پانل‌های کامپوزیتی با هسته مشبک M شکل متشکل از الیاف کربن و رزین اپوکسی را نشان می‌دهد که تحت بار خمشی سه نقطه‌ای و بار فشاری قرار دارد. تمام نمونه‌ها در آزمایشگاه ساخته شده و همچنین در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی و مدل‌سازی شده‌اند. اهداف اصلی مقاله عبارتند از: الف) ابداع یک هندسه و طرح نوآورانه برای هسته خرابی به منظور دستیابی به سطح بالایی از مقاومت مکانیکی با رعایت استانداردهای مهندسی. ب) بررسی تأثیر فوم



شکل ۱- دستگاه Vacuum Bag برای ایجاد فضای خلاء روی نمونه

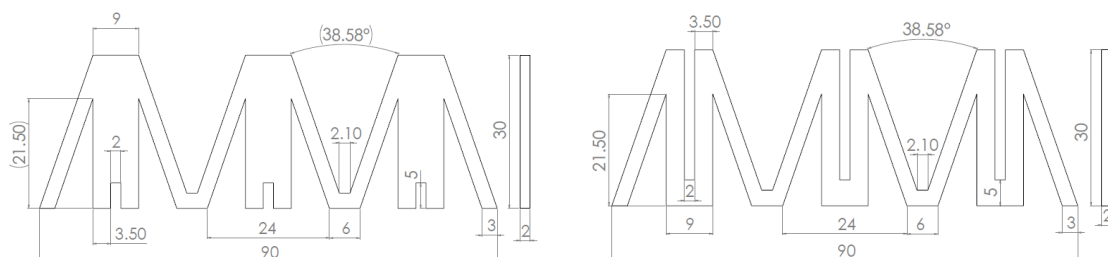
سپس الگوهای بدست آمده، طبق نقشه روی هم قرار می‌گیرند و در آخر، هسته‌ها به صورت قسمت مادگی (شکل ۳-الف) و قسمت نری (شکل ۳-ب) مونتاژ شده و هسته تشکیل می‌شود (شکل ۳-ج). سپس لمینیت بالا و پایین را با رزین اپوکسی روی هسته جانمایی می‌کنیم. برای متصل کردن لمینیت به هسته، ساندویچ پنل‌ها را به مدت ۹ ساعت

به منظور ورود و خروج رزین روی شیشه جا نمایی می‌شود. لایه های الیاف برش خورده را داخل فضای محصور قرار داده و سپس به دنبال آن پارچه سفید رنگی به نام داک رون (کمی بزرگتر از نمونه) برای نجسبیدن لایه توزیع به نمونه روی آن قرار می‌دهیم. لایه توزیع (آبی رنگ که باید از نمونه کمی کوچکتر باشد) که باعث عبور رزین می‌شود را روی نمونه قرار می‌دهیم، سپس کیسه خلاء را برای ایجاد فضای خلاء روی نمونه می‌کشیم (شکل ۱). لمینیت بدست آمده شامل ۸ لایه الیاف کربن بافته شده با رزین اپوکسی است. نمونه‌های بدست آمده را در حالت وکیوم به مدت ۱۲ ساعت در دمای اتاق قرار داده تا کاملا خشک شوند. سپس نمونه‌ها را به مدت ۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد داخل آون قرار می‌دهیم. تمامی نمونه‌ها ضخامتی برابر با ۱/۸ میلی‌متر دارند.

مرحله دوم ساخت هسته خریای M شکل است. روی لمینیت بدست آمده توسط دستگاه واتر جت عملیات برش انجام می‌شود (شکل ۲-الف). ابعاد و اندازه‌های قسمت نری و مادگی هسته در شکل ۲-ب و جدول ۳ نشان داده شده است.

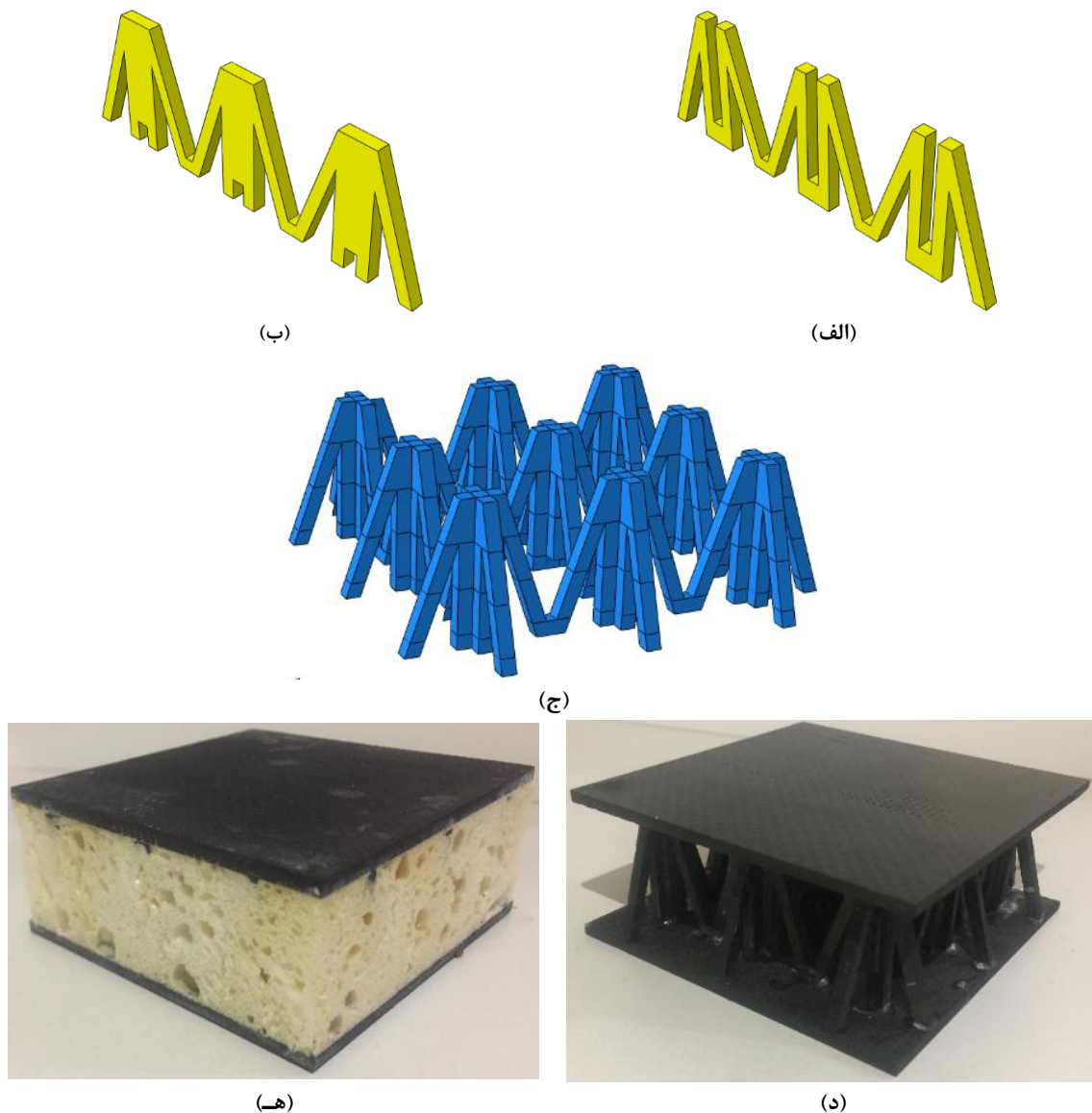


(الف)



(ب)

شکل ۲- الف) عملیات برش لمینیت توسط دستگاه واتر جت و ب) نقشه ابعاد و اندازه‌های هسته



شکل ۳- مراحل مونتاژ ساندویچ پانل: الف) خرابای مادگی، ب) خرابای نری، ج) هسته M شکل، د) ساندویچ پانل بدون فوم و ه) ساندویچ پانل همراه با فوم

۴- آزمایش‌های تجربی

تمام آزمایشات مکانیکی در تحقیق حاضر توسط دستگاه تست سنتام با عملگرهای محوری انجام شده است. ظرفیت استاتیکی دستگاه برابر با ۵۰ کیلونیوتون با حداکثر جابجایی ۳۰۰ میلی‌متر است. در تمامی تست‌ها نرخ سرعت حرکت قسمت کلگی دستگاه برابر با ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه است.

در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد داخل آن قرار می‌دهیم. تمامی ساندویچ پنل‌های ساخته شده دارای هندسه مربعی با اضلاع ۹۰×۹۰ میلی‌متر می‌باشند (شکل ۳-د). سپس از فوم پلی‌یورتان با چگالی ۸۰ کیلوگرم در متر مکعب برای پر کردن فضای خالی بین هسته نوع M و سطوح ساندویچ پانل استفاده شده است که با ترکیب دو ماده پلی‌آل و ایزوسیانات بدست می‌آید. در انتها، ساندویچ پانل با فوم همانطور ساخته می‌شود که در شکل ۳-ه نشان داده شده است.

۱-۴- آزمایش کشش

به منظور تعیین خواص مکانیکی لمینیت‌ها، از تست کشش، تحت استاندارد ASTM D-3039 استفاده شده است. نرخ حرکت کلگی با ثابت 0.5 میلی‌متر بر دقیقه است (شکل ۴). لازم به ذکر است، نمونه تست شده مستطیلی شکل بوده و دارای ابعاد طول 250 میلی‌متر، عرض 25 میلی‌متر و ضخامت 2 میلی‌متر بوده که دارای مدول الاستیسیته 5600 مگاپاسکال است. همچنین ضریب پواسون در تمام نمونه‌ها صفر است که بیانگر دو جهته بودن الیاف‌هاست (شکل ۵).

۲-۴- آزمایش خمش سه نقطه‌ای

به منظور تعیین رفتار مکانیکی ساندویچ پانل کامپوزیت، تست خمش سه نقطه‌ای با استفاده از یک میله استوانه‌ای شکل با شعاع 9 میلی‌متر انجام شده است. و سپس منحنی تنش-کرنش ساندویچ پانل بدست می‌آید. لازم به ذکر است که آزمون‌های خمشی سه نقطه‌ای در مطالعه حاضر توسط دستگاه تست SANTAM STM-150 با عملگرهای محوری انجام شده است. شکل ۶ نمونه سوار شده روی دستگاه تست و مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس را نشان می‌دهد.

۳-۴- آزمایش فشار مکانیکی

به منظور تعیین رفتار فشرده‌سازی ساندویچ پانل کامپوزیتی، در این آزمایش بار فشاری یکنواخت روی صفحات ساندویچ پانل اعمال شده است. آزمایش‌های فشاری تخت به صورت یکنواخت روی پانل‌های هسته M شکل مطابق با آزمون استاندارد برای ساندویچ پانل‌ها انجام شد. آزمایش‌های فشار یکنواخت مطابق با استاندارد آزمون ASTM C365 انجام شد [۳۸]. برای آزمایش مذکور، نمونه‌ای از ساندویچ پانل با مساحت 90×90 میلی‌متر روی یک بلوک کروی خودتنظیم قرار داده شد. شکل ۷ نمونه سوار شده روی دستگاه تست و مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس را نشان می‌دهد.

۵- حل عددی

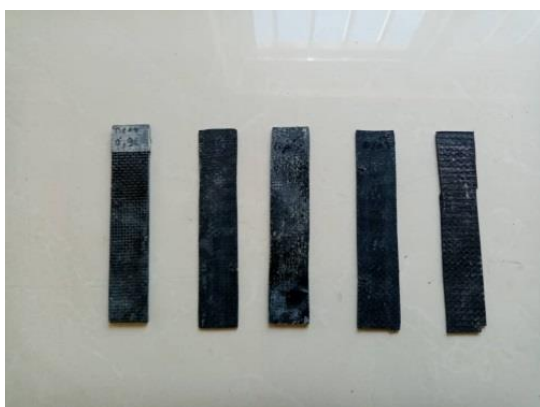
به منظور بررسی صحت نتایج تجربی در آزمایش‌های کشش، خمش سه نقطه‌ای و فشار شبیه‌سازی المان محدود توسط نرم‌افزار آباکوس صورت گرفته است که در ادامه برخی از مراحل مختلف آن به اختصار توضیح داده خواهد شد.

۵-۱- مدل‌سازی هندسی

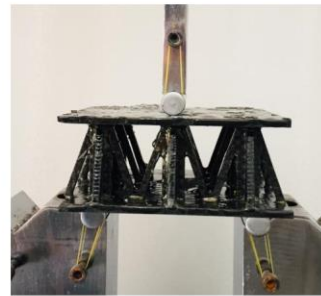
در حل عددی اولین قدم تعریف هندسه و مدل‌سازی ساندویچ پانل با هسته M شکل با توجه به مدل آزمایشی آن است (شکل ۳-د). به منظور مدل‌سازی ساندویچ پانل‌ها برای انجام آزمایش خمش و فشار سه نقطه‌ای، یک قطعه سه‌بعدی، جامد و تغییر شکل‌پذیر در نرم‌افزار تعریف شده است. ابعاد ساندویچ پانل در شکل ۲-ب بیان شد.



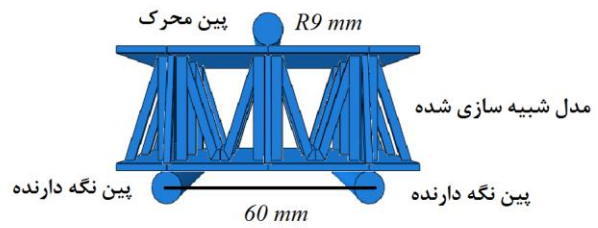
شکل ۴- دستگاه سنتام تست کشش



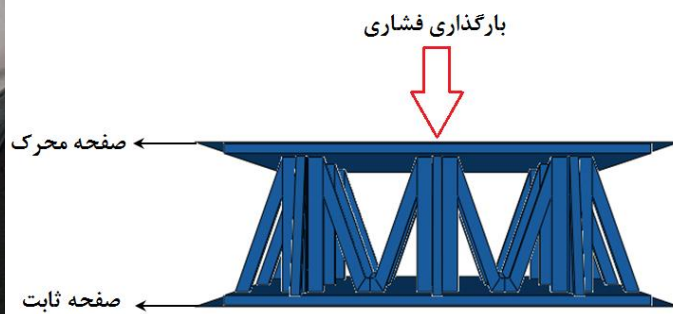
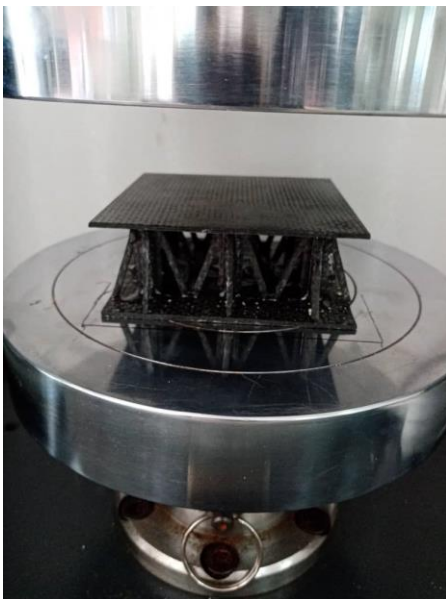
شکل ۵- نمونه لمینت‌های الیاف کربن در تست کشش



مدل تجربی



شکل ۶- ساندویچ پانل با هسته M شکل تحت بارگذاری خمش سه نقطه‌ای



شکل ۷- ساندویچ پانل با هسته M شکل تحت بارگذاری فشاری

آسیب الیاف کربن در نرم افزار مطابق جدول ۱ تعریف شده است. همچنین رفتار پین‌ها در تست خمش و رفتار صفحات ثابت و متحرک در تست فشار به دلیل تغییر شکل ناچیز، صلب در نظر گرفته شده است. در رفتار تماسی بین نمونه‌ها از

۵-۲- خواص و مواد

پس از مدل سازی ساندویچ پانل ساخته شده، لازم است خواص مکانیکی به نمونه‌ها اختصاص یابد. برای این منظور چگالی، خواص الاستیسیته، خواص پلاستیسیته و رفتار

صورت گرفته است. به منظور بهینه‌سازی حل و دقت محاسبات، کل المان‌های نمونه ریز گشته‌اند. لازم به ذکر است، تعداد بهینه کل المان‌ها برای این مساله ۷۸۷۶۶ است. نمونه المان‌بندی شده ساندویچ پانل در شکل ۸ ملاحظه می‌شود.

جدول ۳- خواص مواد اعمال شده در شبیه‌سازی

جایابی در لحظه شکست (mm)	کرنش در لحظه شکست	کرنش پلاستیک	تنش تسلیم (MPa)
۲	۰/۰۰۷	۰/۲۱۹	۳۸۶۷۶۲

جدول ۴- مطالعه همگرایی اندازه مش

اندازه المان (mm)	بیشترین نیرو در آزمایش فشار (N)	بیشترین نیرو در آزمایش خمش (N)
۱	۵۴۶۷۶/۹۸	۶۴۴۰/۱۱
۰/۷۵	۵۴۶۷۶/۳۴	۶۴۳۹/۰۲
۰/۵	۵۴۶۷۵/۱۲	۶۴۳۸/۹۲۱
۰/۲	۵۴۶۷۵/۱	۶۴۳۸/۹۲

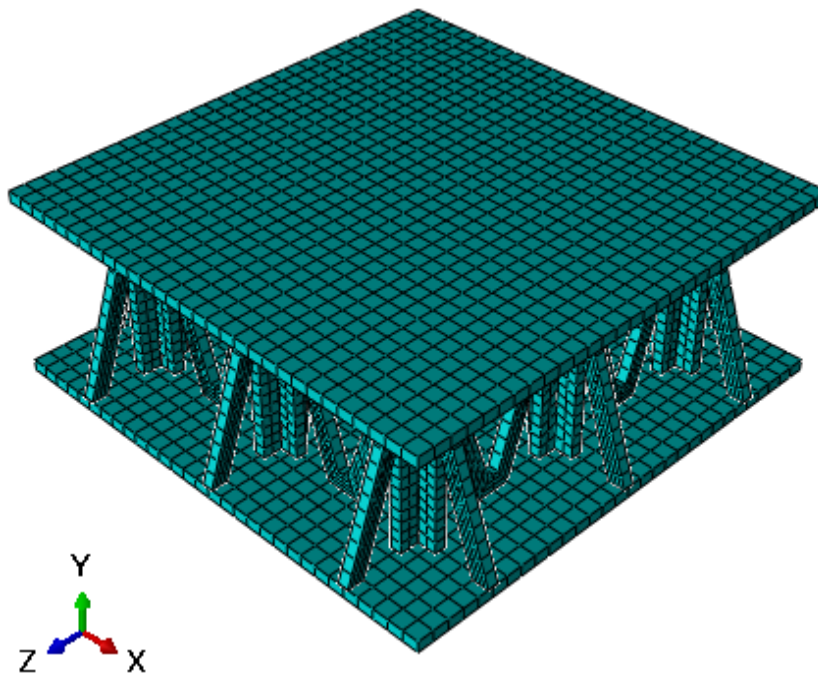
ماژول Interaction گزینه General contact ضریب اصطحاک ۰/۳ تعریف شده است. در این تحقیق برای پی‌بردن به شروع خسارت نمونه‌ها در قالب شبیه‌سازی‌های عددی، از معیار آسیب برای مواد ترد Ductile damage در نرم افزار آباکوس استفاده می‌شود که در آن تنش Triaxiality و نرخ کرنش هر دو صفر در نظر گرفته شدند. خواص مواد و پارامترهای آسیب برای نمونه‌های مختلف در جدول ۳ ارائه شده است.

۵-۳- مطالعه همگرایی

در این قسمت یک تحلیل و مطالعه همگرایی اندازه مش به منظور دقت نتایج و محاسبات انجام شده است. بر اساس جدول ۴ بیشترین نیرو در هر دو آزمایش خمش و فشار برای اندازه‌های مختلف مش محاسبه شده است. بر اساس این نتایج، اندازه مش ۰/۲ میلی‌متر در شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است.

۵-۴- مش‌ریزی و المان‌بندی نمونه

در این تحلیل برای مش‌ریزی نمونه‌های کامپوزیتی از المان هشت‌وجهی C3D8R استفاده شده است. برای اطمینان پیدا کردن از سایز مناسب مش برای تحلیل، آنالیز همگرایی حل



شکل ۸- مش‌بندی ساندویچ پانل با هسته M شکل

۵-۵- بارگذاری و شرایط مرزی

در آزمون خمش، پین‌های نگهدارنده پایین سازه در همه جهات ثابت شده‌اند و پین متحرک بالای سازه نیز در همه جهات به غیر از جهت عرضی محدود شده است؛ یعنی در آن جهت y حرکت آزاد است. به علاوه، برای اعمال بار خمشی، جابجایی ۱۴ میلی‌متر در جهت محور y روی پین صلب متحرک اعمال می‌شود. لازم به ذکر است که جابجایی عرضی تا لحظه خرابی قطعه انجام می‌شود (شکل ۶). همچنین در تست فشار مکانیکی یکنواخت، صفحه صلب پایین سازه در همه جهات ثابت شده و صفحه صلب متحرک بالای سازه نیز در همه جهات به جز جهت عرضی که در آن جهت y حرکت آزاد است، محدود شده است. به علاوه، برای اعمال بار فشاری بر سازه، جابجایی ۱۰ میلی‌متر در جهت محور y به صفحه صلب متحرک اعمال می‌شود (شکل ۷). لازم به ذکر است که جابجایی عرضی تا لحظه خرابی قطعه انجام می‌شود.

آسیب که خواص ماده تنزل پیدا می‌کنند، هرگز دچار مشکل عدم همگرایی حل نمی‌شود.

۶- نتایج و بحث

در این مطالعه، ساندویچ پانل‌های ساخته شده با و بدون فوم پلی‌اورتان تحت بارهای خمشی سه نقطه‌ای و همچنین بار فشاری در شرایط مشابه برای هر ساندویچ پانل قرار گرفته‌اند. رفتارهای مکانیکی آنها به صورت تجربی و همچنین عددی بررسی شده است که در ادامه ارائه می‌گردند.

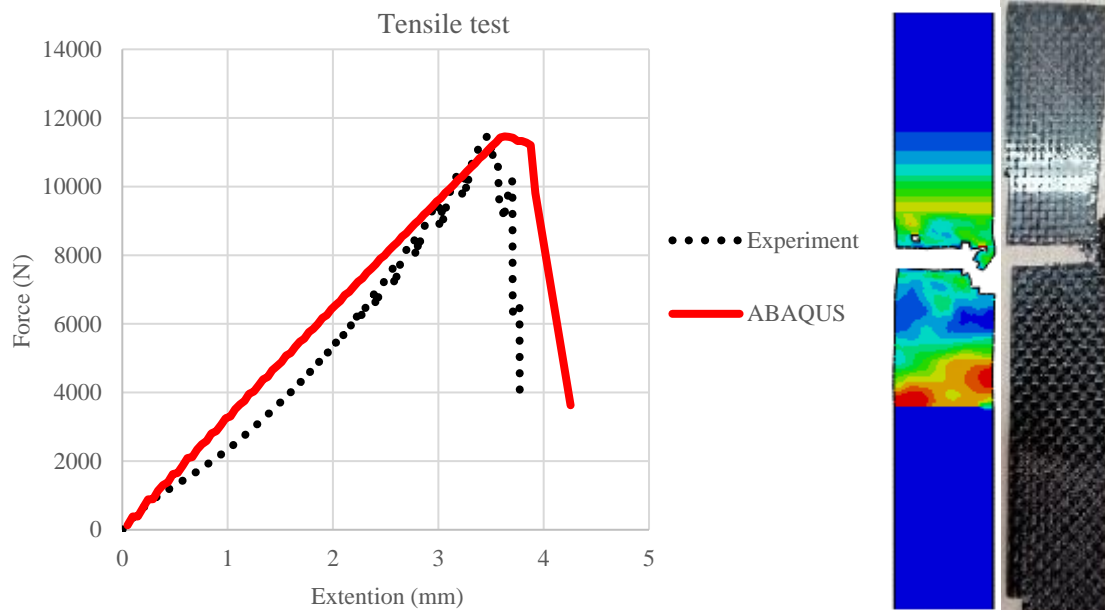
۶-۱- نتایج آزمایش کشش

شکل ۹ نمودار نیرو برحسب جابجایی را نشان می‌دهد که از داده‌های آزمون کششی در شبیه‌سازی عددی و آزمایش تجربی برای مواد الیاف کربن بدست آمده است. همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، نتایج بدست آمده از آزمایش تجربی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی توافقی بسیار خوبی دارند.

۵-۶- حلگر مساله

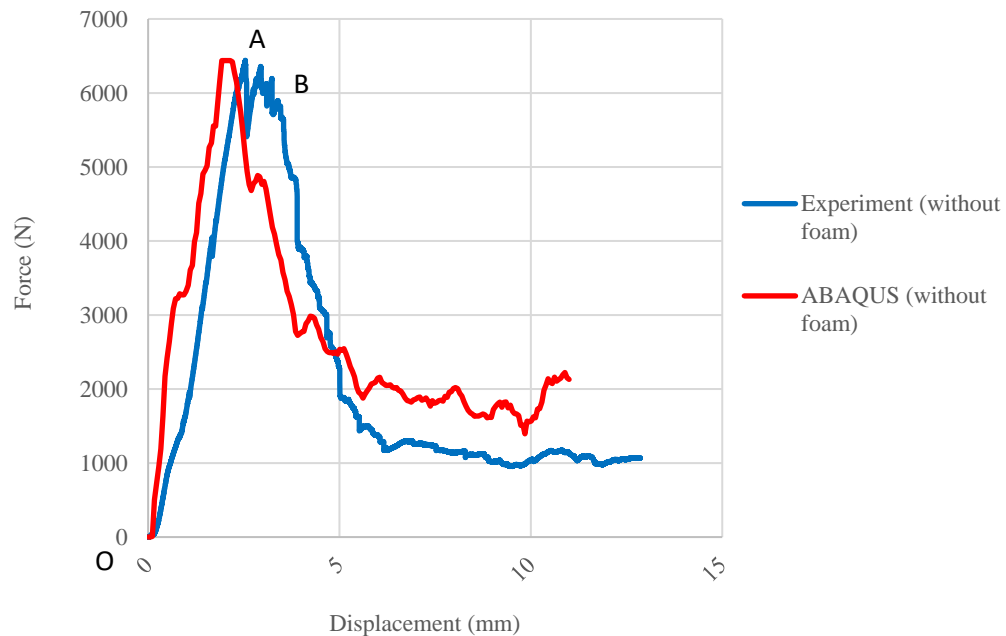
در این تحقیق برای تحلیل عددی رفتار کششی نمونه‌ها از تحلیلگر "صریح دینامیکی" استفاده شده است. لازم به ذکر است که تحلیلگر صریح برخلاف تحلیلگر ضمنی، پس از وقوع

شکل ۱۰ نمونه لمینیت فیبرکربن تحت کشش در آزمایش تجربی و شبیه سازی آباکوس پس از شکست را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، شباهت‌های زیادی بین نتایج این دو آزمون وجود دارد.



شکل ۹- نمودار نیرو برحسب جابجایی نمونه تحت کشش در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی

Three-point bending test



شکل ۱۰- نمودار نیرو - جابجایی ساندویچ پانل با هسته M شکل تحت خمش سه نقطه‌ای در آزمایش تجربی و عددی

تجربی به خوبی پیش‌بینی می‌کند و روند کلی حل عددی به طور کلی با روند تجربی مطابقت دارد. علاوه بر این، همانطور که از این شکل دیده می‌شود، منطقه الاستیک از نقطه O شروع شده و در حوالی نقطه A به پایان می‌رسد و پس از آن، منطقه پلاستیک شروع می‌شود و سپس، در نقطه B، منطقه پلاستیک پایان می‌یابد و سپس شکست به طور ناگهانی اتفاق می‌افتد. واضح است که هیچ نقصی در منطقه پاسخ الاستیک در نمونه‌ها وجود ندارد (شکل ۱۱-الف). صداهای پیچ به طور مداوم پس از حداکثر بار با آسیب گسترده به دلیل خرد شدن بعد از حوالی نقطه A مشاهده می‌شود، عکس نمونه در شکل ۱۱-ب و شکل ۱۱-ج نشان داده شده است تا حالت‌های خرابی مشاهده شده بصورت بصری را نشان دهد.

شکل ۱۲ نتایج مکانیسم آسیب و خرابی نمونه‌های ساندویچ پانل با هسته M شکل در تحلیل عددی را با نتایج تجربی مقایسه می‌کند. لازم است توجه داشته باشید که این نتایج متعلق به مکانیسم‌های آسیب در آخرین مرحله بارگذاری است. همانطور که در شکل نشان داده شده است، کانتور عددی تغییر شکل و خرابی موجود در نمونه را به خوبی ارائه می‌دهد.

همچنین از شکل ۹ مشخص است که با افزایش نیروی کششی منحنی در ناحیه الاستیک باقی می‌ماند. از مقایسه بیشترین نیروی کششی در آزمایش تجربی (۱۱۴۶۶/۷ نیوتون) و عددی (۱۱۴۶۱/۹۸) می‌توان فهمید، تفاوت بین آنها تقریباً کمتر از ۱ درصد است.

۲-۶- نتایج آزمایش خمش سه نقطه‌ای

در این بخش، نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای روی ساندویچ پانل با هسته M شکل ارائه شده است. شکل ۱۰ نمودار نیرو برحسب جابجایی ساندویچ پانل کامپوزیت با هسته M شکل را که در معرض بار خمشی سه نقطه‌ای است، به صورت آزمایشی و همچنین عددی نشان می‌دهد. همانطور که این شکل نشان می‌دهد، شبیه‌سازی عددی به خوبی قادر به پیش‌بینی رفتار خم شدن ساندویچ پانل‌ها است و یک تطابق بسیار خوب بین نتایج تجربی و عددی وجود دارد؛ به طوری که اختلاف بین حداکثر تنش در فرآیند بارگذاری کمتر از ۲ درصد است. از طرف دیگر، علی‌رغم خطاهای اجتناب‌ناپذیر، مدل عددی توسعه یافته پیک بارهای نمونه‌ها را در تست

۳-۶- نتایج آزمایش فشار یکنواخت

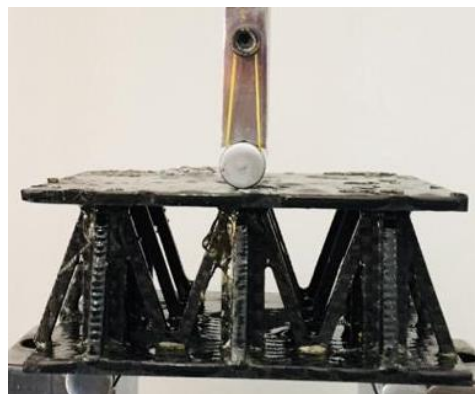
در این بخش، نتایج آزمون فشار مکانیکی یکنواخت روی ساندویچ پانل با هسته M شکل ارائه شده است. شکل ۱۵ نمودار نیرو برحسب جابجایی ساندویچ پانل کامپوزیتی با هسته M شکل را که در معرض فشاری است، به صورت آزمایشی و همچنین عددی نشان می‌دهد. همانطور که این شکل نشان می‌دهد، شبیه‌سازی عددی به خوبی قادر به پیش‌بینی رفتار له‌شدن ساندویچ پانل‌ها است و یک تطابق بسیار خوب بین نتایج تجربی و عددی وجود دارد؛ به طوری

برای درک بهتر، نتایج کمی برای مقدار بیشترین نیروی اعمالی در آزمون عددی و تجربی مقایسه و تحلیل می‌شود. با توجه به داده‌های بدست آمده در جدول ۵، اختلاف بین نتایج عددی و تجربی در پیش‌بینی حداکثر تنش به طور متوسط کمتر از ۲٪ است و به طور کلی یک توافق عالی بین نتایج عددی و تجربی وجود دارد.

شکل ۱۳ مکانیسم آسیب ساندویچ پانل کامپوزیتی با هسته M شکل همراه با فوم پلی‌اورتان تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای را نشان می‌دهد. شکل ۱۴ منحنی نیرو برحسب جابجایی را برای ساندویچ پانل پر از فوم و بدون فوم را نشان می‌دهد که تحت آزمون خمش سه نقطه قرار دارد. از این نمودار مشخص می‌شود که فوم پلی‌اورتان تأثیر زیادی در رفتار خمشی ساندویچ پانل دارد و حداکثر بار در ساندویچ پانل پر از فوم حدود ۱۵ درصد بیشتر از ساندویچ پانل بدون فوم است و نقطه B در پانل همراه با فوم بالاتر از حالت بدون فوم است.

جدول ۵- مقایسه بیشترین نیرو اعمال شده به سازه در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی برای تست خمش سه نقطه‌ای

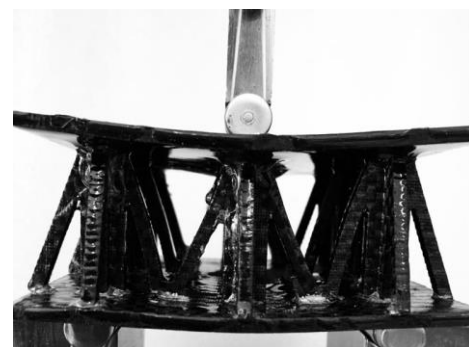
اختلاف	نتایج عددی	نتایج تجربی	نمونه تحت خمش سه نقطه‌ای
٪۰/۰۱	۶۴۳۸/۹۲	۶۴۳۹/۵۰۷۲	*



(الف)

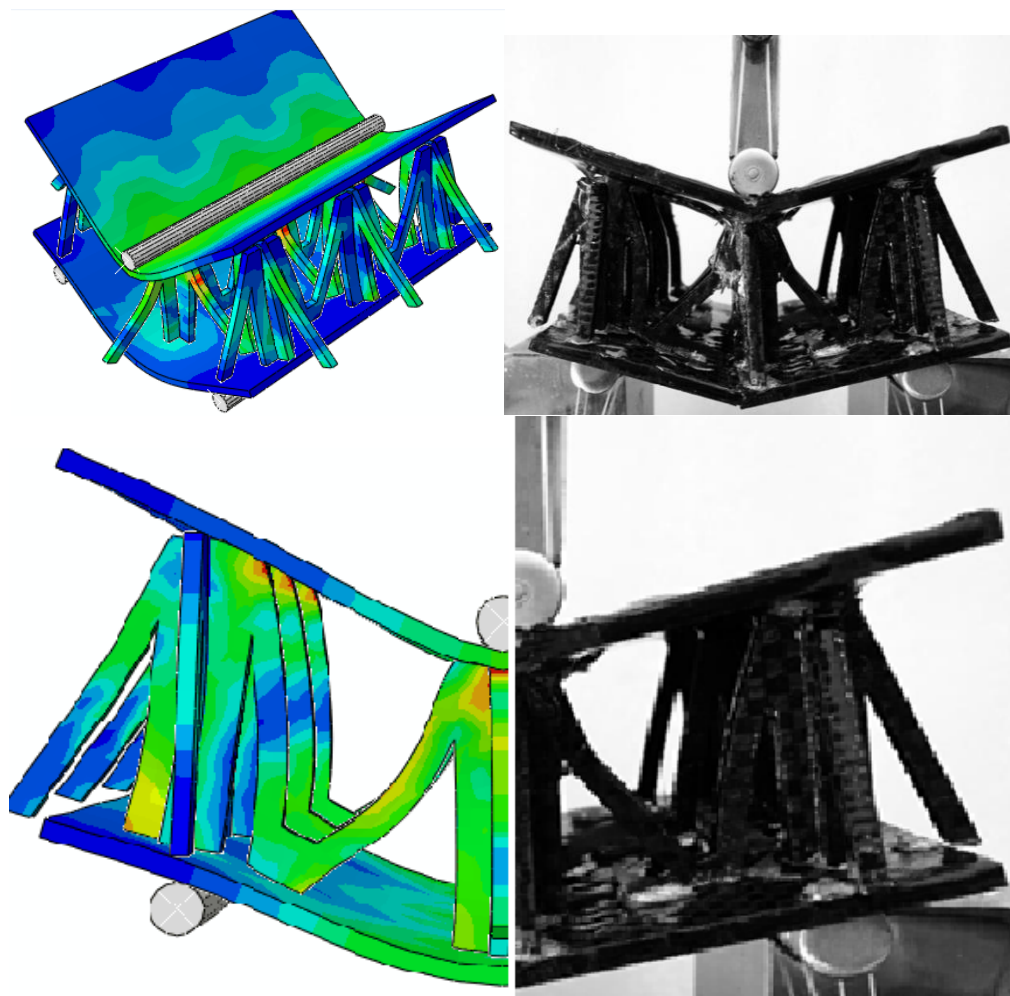


(ج)



(ب)

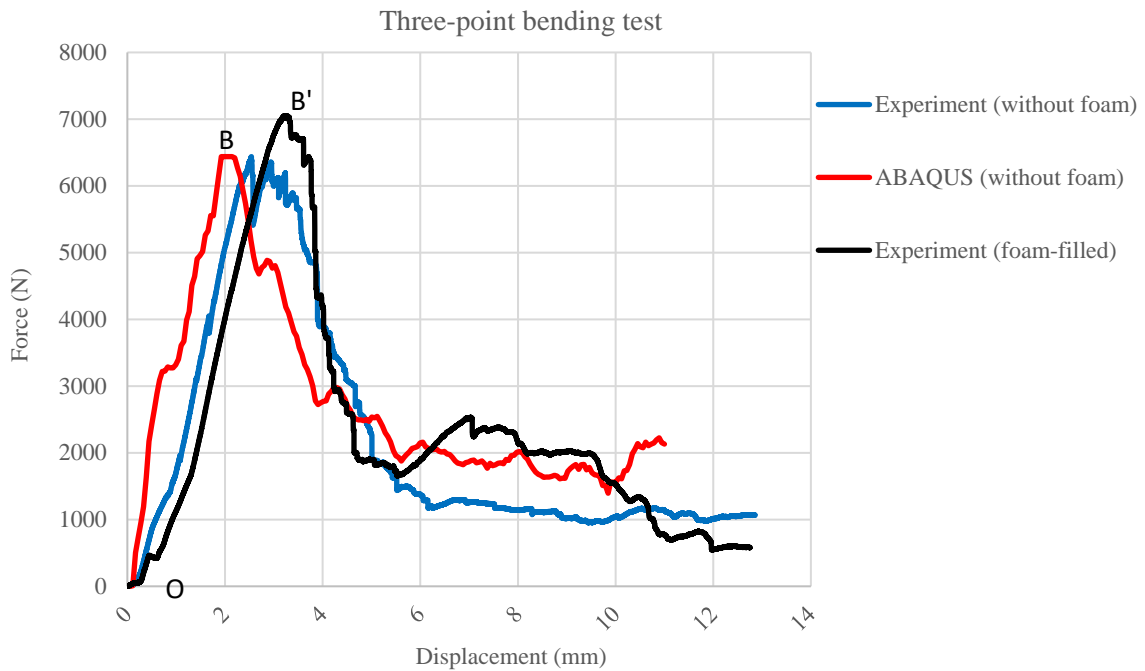
شکل ۱۱- حالت‌ها و مودهای خرابی: (الف) پاسخ الاستیک، (ب و ج) مودهای شکست در حوالی نقطه B



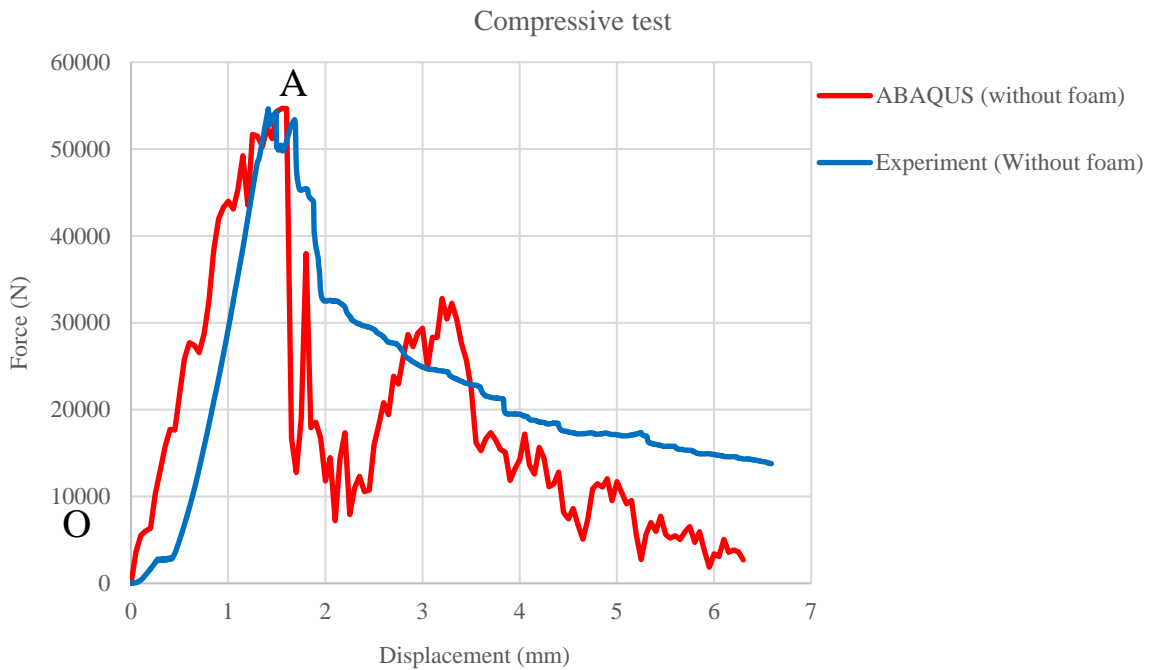
شکل ۱۲- مقایسه مکانیسم‌های آسیب در آزمون تجربی و عددی تحت بار خمشی سه نقطه‌ای



شکل ۱۳- ساندویچ پانل پر از فوم تحت آزمون خمش سه نقطه‌ای



شکل ۱۴- مقایسه نمودار نیرو-جابجایی ساندویچ پانل با هسته M شکل با و بدون فوم در آزمون خمش سه نقطه‌ای



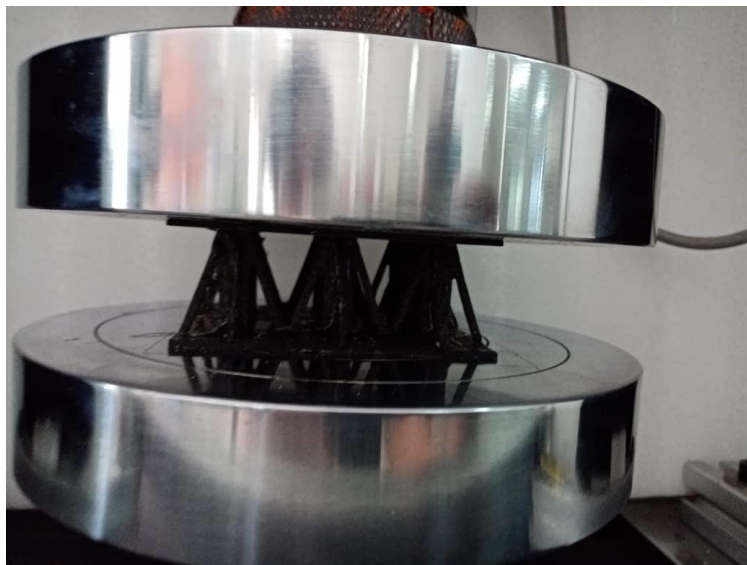
شکل ۱۵- نمودار نیرو - جابجایی ساندویچ پانل با هسته M شکل تحت فشار در آزمایش تجربی و عددی

که اختلاف بین حداکثر تنش در فرآیند بارگذاری کمتر از ۱ درصد است. از طرف دیگر، علی‌رغم خطاهای اجتناب‌ناپذیر، مدل عددی توسعه یافته پیک بارهای نمونه‌ها را در تست تجربی به خوبی پیش‌بینی می‌کند و

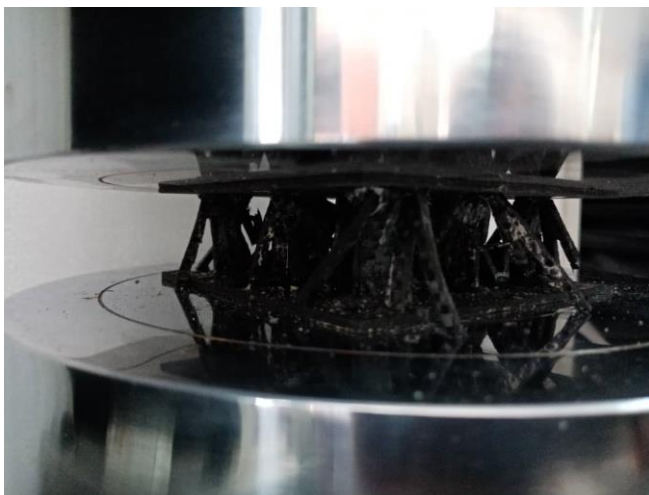
است تا حالت‌های خرابی مشاهده شده بصورت بصری را نشان دهد.

شکل ۱۷ نتایج مکانیسم آسیب و خرابی نمونه‌های ساندویچ پانل با هسته M شکل در تحلیل عددی را با نتایج تجربی مقایسه می‌کند. لازم است توجه داشته باشید که این نتایج متعلق به مکانیسم‌های آسیب در آخرین مرحله بارگذاری است. همانطور که در شکل نشان داده شده است، کانتور عددی تغییرشکل و خرابی موجود در نمونه را به خوبی ارائه می‌دهد.

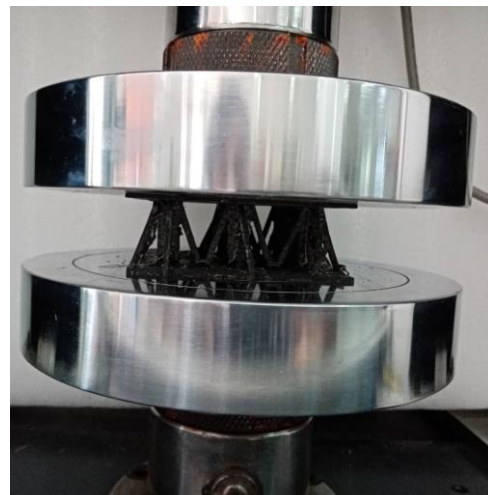
روند کلی حل عددی به طور کلی با روند تجربی مطابقت دارد. علاوه براین، همانطور که از این شکل دیده می‌شود، منطقه الاستیک از نقطه O شروع شده و در حوالی نقطه A به پایان می‌رسد و سپس شکست به طور ناگهانی اتفاق می‌افتد. واضح است که هیچ نقصی در منطقه پاسخ الاستیک در نمونه‌ها وجود ندارد (شکل ۱۶-الف). صداهای پیینگ به طور مداوم پس از حداکثر بار با آسیب گسترده به دلیل خرد شدن بعد از حوالی نقطه A مشاهده می‌شود، عکس نمونه در شکل ۱۶-ب و شکل ۱۶-ج نشان داده شده



(الف)

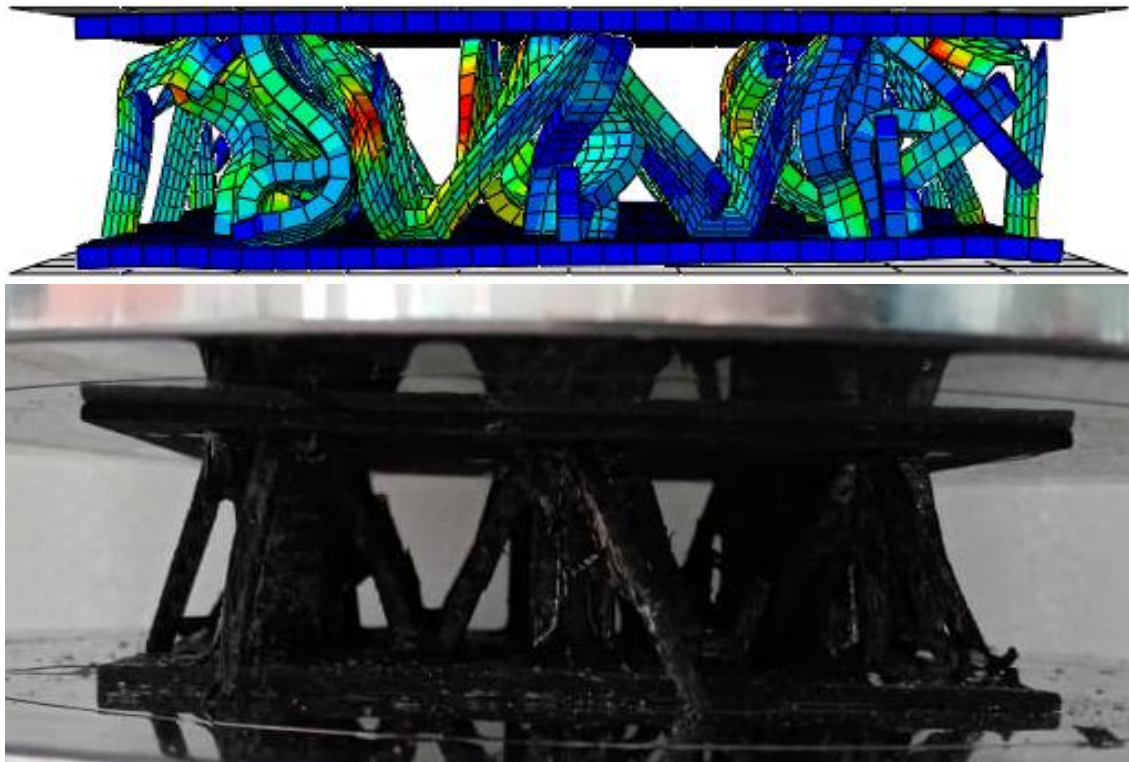


(ج)



(ب)

شکل ۱۶- حالت‌ها و مودهای خرابی: (الف) پاسخ الاستیک، (ب و ج) مودهای شکست در حوالی نقطه B



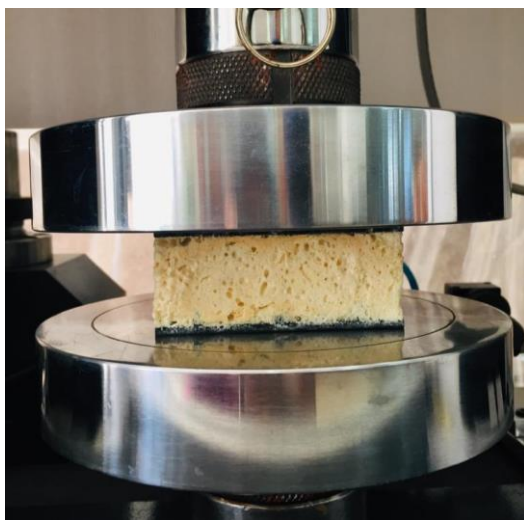
شکل ۱۷- مقایسه مکانیسم‌های آسیب در آزمون تجربی و عددی تحت بار فشاری یکنواخت

می‌دهد که تحت فشار یکنواخت قرار دارد. از این نمودار مشخص می‌شود که فوم پلی‌اورتان تأثیر زیادی در رفتار فشاری ساندویچ پانل دارد و حداکثر بار در ساندویچ پانل پر از فوم حدود ۱۵ درصد بیشتر از ساندویچ پانل بدون فوم است و نقطه A در پانل همراه با فوم بالاتر از حالت بدون فوم است.

برای درک بهتر، نتایج کمی برای مقدار بیشترین نیروی اعمالی در آزمون عددی و تجربی مقایسه و تحلیل می‌شود. با توجه به داده‌های بدست آمده در جدول ۶، اختلاف بین نتایج عددی و تجربی در پیش بینی حداکثر تنش به طور متوسط کمتر از ۱٪ است و به طور کلی یک توافق عالی بین نتایج عددی و تجربی وجود دارد.

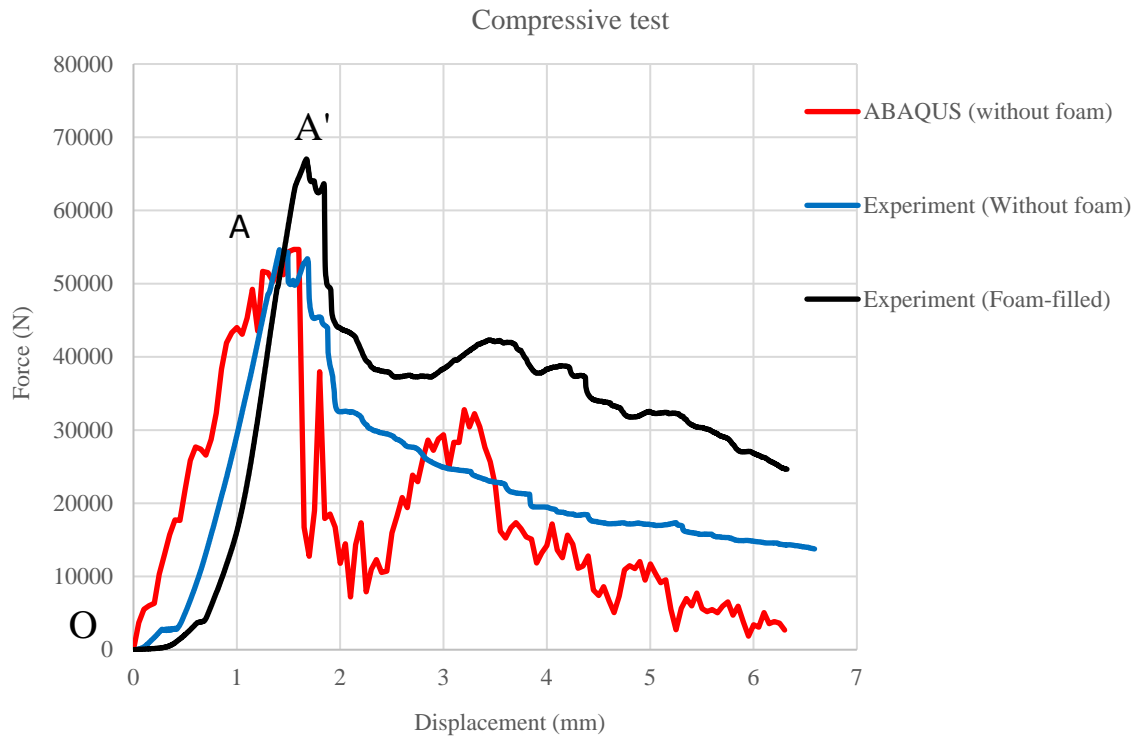
جدول ۶- مقایسه بیشترین نیرو اعمال شده به سازه در در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی برای تست فشار یکنواخت

اختلاف	نتایج عددی	نتایج تجربی	نمونه تحت فشار یکنواخت
٪۰/۰۷	۵۴۶۷۵/۱	۵۴۶۳۶/۸	*



شکل ۱۸- ساندویچ پانل پر از فوم تحت آزمون فشار

شکل ۱۸ مکانیسم آسیب ساندویچ پانل کامپوزیتی با هسته M شکل همراه با فوم پلی‌اورتان تحت آزمایش فشار یکنواخت را نشان می‌دهد. شکل ۱۹ منحنی نیرو برحسب جابجایی را برای ساندویچ پانل پر از فوم و بدون فوم را نشان



شکل ۱۹- مقایسه نمودار نیرو-جابجایی ساندویچ پانل با هسته M شکل با فوم و بدون فوم شکل در آزمون فشار یکنواخت

باعث افزایش بارهای فشاری و خمشی نهایی در ساندویچ پانل می‌شود. مطالعه منحنی‌های نیرو برحسب جابجایی به دست آمده از آزمون‌های فشار و خمش سه نقطه‌ای بر ساندویچ پانل نشان داد که ساندویچ پانل درحالی که سبک است از یک مقاومت مکانیکی مطلوب برخوردار است. در نهایت، داده‌های این آزمایش‌های مکانیکی نشان داد که نتایج عددی و تجربی از تطابق بسیار خوبی برخوردار بوده و لذا امکان استفاده از شبیه‌سازی عددی به جای روش‌های تجربی وقت‌گیر برای طراحی و تجزیه و تحلیل این نوع سازه‌ها فراهم می‌شود. لازم به ذکر است که مدت زمان مورد نیاز برای نرم افزار به منظور حل عددی مساله و ارائه نتایج در هر دو آزمایش خمش و فشار با در نظر گرفتن ۹۰ درصد پردازنده کامپیوتر تقریباً برابر با دو دقیقه است.

۸- مراجع

- [1] Farrokhhabadi A, Taghizadeh SA, Madadi H, Norouzi H, Ataei A (2020) Experimental and numerical analysis of novel multi-layer sandwich panels under three point bending load. Compos Struct 250: 112631.

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به منظور ارزیابی مقاومت خمشی و فشاری ساندویچ پانل‌های کامپوزیتی با طرح هسته جدید M شکل، ساندویچ پانل‌های پر از فوم و خالی از فوم پلی‌اورتان ساخته شده و تست‌های خمش سه نقطه‌ای و همچنین تست فشار یکنواخت روی تمامی ساندویچ پانل‌های ساخته شده اعمال شد. لازم به ذکر است که تمام نمونه‌ها با ۸ لایه لمینیت‌های اپوکسی/فیبر کربن تهیه شده‌اند. طرح هسته M شکل توسط دستگاه واترجت با اندازه خاص و ابعاد هندسی برش داده شد و سپس قطعات ساندویچ پانل با چسب اپوکسی مونتاژ شد. پس از آن، فوم پلی‌اورتان به سازه مذکور تزریق شد؛ همچنین لازم به ذکر است که تمامی آزمون‌ها هم به صورت تجربی و آزمایشگاهی و هم به صورت عددی در نرم افزار آباکوس انجام شد. نتایج نهایی نشان داد که طراحی جدید هسته (M شکل) می‌تواند کماتش و خرابی ساختارهای ساندویچی را به تعویق بی‌اندازد. از طرف دیگر، شکل و هندسه ابعاد هسته M شکل در مقاومت سازه نقش مهمی دارند. علاوه بر این، تزریق فوم پلی‌اورتان در بین هسته سازه،

- [14] Rupp P, Elsner P, Weidenmann KA (2019) Failure mode maps for four-point-bending of hybrid sandwich structures with carbon fiber reinforced plastic face sheets and aluminum foam cores manufactured by a polyurethane spraying process. *J Sandw Struct* 21(8): 2654-2679.
- [15] Cinar K (2020) Evaluation of sandwich panels with composite tube-reinforced foam core under bending and flatwise compression. *J Sandw Struct* 22(2): 480-493.
- [16] Shah UB, Kapania RK (2020) Failure of hexagonal and triangular honeycomb core sandwich panels. *AIAA J* 58(11): 4923-4940.
- [17] Djama K, Michel L, Gabor A, Ferrier E (2019) Mechanical behaviour of a sandwich panel composed of hybrid skins and novel glass fibre reinforced polymer truss core. *Compos Struct* 215: 35-48.
- [18] Gao S, Wang C, Xing B, Shen M, Zhao W, Zhao Z (2020) Experimental investigation on bending behaviour of ZrO₂ honeycomb sandwich structures prepared by DLP stereolithography. *Thin-Walled Struct* 157: 107099.
- [19] Uzay C, Geren N, Boztepe MH, Bayramoglu M (2019) Bending behavior of sandwich structures with different fiber facing types and extremely low-density foam cores. *Mater Test* 61(3): 220-230.
- [20] Wang J, Shi C, Yang N, Sun H, Liu Y, Song B (2018) Strength, stiffness, and panel peeling strength of carbon fiber-reinforced composite sandwich structures with aluminum honeycomb cores for vehicle body. *Compos Struct* 184: 1189-1196.
- [21] Norouzi H, Rostamiyan Y (2015) Experimental and numerical study of flatwise compression behavior of carbon fiber composite sandwich panels with new lattice cores. *Constr Build Mater* 100: 22-30.
- [22] Arefi M, Najafitabar F (2021) Buckling and free vibration analyses of a sandwich beam made of a soft core with FG-GNPs reinforced composite face-sheets using Ritz Method. *Thin-Walled Struct* 158: 107200.
- [23] Arefi M, Kiani M, Civalek O (2020) 3-D magneto-electro-thermal analysis of layered nanoplate including porous core nanoplate and piezomagnetic face-sheets. *Appl Phys A* 126(1): 1-18.
- [24] Arefi M, Kiani M, Zamani MH (2020) Nonlocal strain gradient theory for the magneto-electro-elastic vibration response of a porous FG-core sandwich nanoplate with piezomagnetic face sheets resting on an elastic foundation. *J Sandw Struct* 22(7): 2157-2185.
- [25] Arefi M, Mohammad-Rezaei Bidgoli E, Zenkour AM (2019) Free vibration analysis of a sandwich nano-plate including FG core and piezoelectric
- [2] Jen YM, Tang ZH (2020) Static bending strength assessment of sandwich panels with glass/polypropylene faces and aluminum foam cores. *Mod Phys Lett B* 34(7n9): 2040016.
- [3] Akhmet G, Yu Y, Hu P, Hou W, Han X (2020) Analysis of the performance of adhesively bonded corrugated core sandwich structures using cohesive zone method. *J Sandw Struct Mater* 22: 104-124.
- [4] Sayahlatifi S, Rahimi GH, Bokaei A (2020) The quasi-static behavior of hybrid corrugated composite/balsa core sandwich structures in four-point bending: Experimental study and numerical simulation. *Eng Struct* 210: 110361.
- [5] Florence A, Jaswin MA, Arul Prakash MA, Jayaram RS (2020) Effect of energy-absorbing materials on the mechanical behaviour of hybrid FRP honeycomb core sandwich composites. *Mater Res Innov* 24(4): 244-255.
- [6] Ma M, Yao W, Jiang W, Jin W, Chen Y, Li P (2020) Fatigue Behavior of composite sandwich panels under three point bending load. *Polymer Testing* 91: 106795.
- [7] Joseph JDR, Prabakar J, Alagusundaramoorthy P (2019) Flexural behavior of concrete sandwich panels under punching load and four-point bending—experimental and analytical study. *Adv Struct Eng* 2: 771-781.
- [8] Zhou G, Ling Leung H, Robinson B, Zheng C (2019) New method for the evaluation of residual compressive strengths of sandwich panels via four-point bending. *Mech Mater* 136: 103075.
- [9] Wang Z, Li Z, Xiong W (2019) Experimental investigation on bending behavior of honeycomb sandwich panel with ceramic tile face-sheet. *Compos Part B-Eng* 164: 280-286.
- [10] Shi S, Chen B, Chen H, Sun Z (2017) Three-point bending and in-plane compression properties of carbon-fiber/aluminum-honeycomb sandwich panels with short-Kevlar-fiber toughening. *Acta Mater Compos Sin* 34(9): 1953-1959.
- [11] Formisano A, Durante M, Viscusi A, Carrino L (2021) Mechanical behavior and collapse mechanisms of innovative aluminum foam-based sandwich panels under three-point bending. *Int J Adv Manuf Technol* 1: 1-9.
- [12] Sun G, Huo X, Chen D, Li Q (2017) Experimental and numerical study on honeycomb sandwich panels under bending and in-panel compression. *Mater Des* 133: 154-168.
- [13] Wang Z, Li Z, Xiong W (2019) Numerical study on three-point bending behavior of honeycomb sandwich with ceramic tile. *Compos Part B-Eng* 167: 63-70.

doubly curved shell integrated with CNT-reinforced piezoelectric layers. Mech Based Des Struct Mach 1-32.

face-sheets by considering neutral surface. Mech Adv Mater Struct 26(9): 741-752.

[26] Bidgoli EMR, Arefi M, Mohammadimehr M (2020) Free vibration analysis of honeycomb