

مطالعه تجربی استحکام پنل ساندویچی با هسته سلولی از نوع ساعت شنی و مربعی تحت بار کمانش

ملیحه آورزمانی^۱، امین فرخ آبادی^{*۲}، محمد سجاد گازر^۳

۱- کارشناس ارشد هوافضا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

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

۳- دکتر، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۶)

چکیده

در این مقاله، تحلیل استحکام سازه ساندویچی مرکبی تحت بارگذاری کمانش و همچنین هسته‌ی ترکیبی از جنس فوم پلی اورتان در سازه‌های ساندویچی مرکبی به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. برای عملکرد بهتر پوسته و هسته در سازه ساندویچی و همچنین بالا بردن استحکام آن‌ها در برابر بار فشاری کمانش، از تقویت‌کننده با هندسه جدید ساعت شنی و مربعی با فوم و بدون فوم استفاده شده است. داشتن ضریب پواسون منفی و سفتی خمشی بیشتر و همچنین قابلیت تحمل بار بیشینه دلیل استفاده از هندسه ساعت شنی می باشد. به منظور ایجاد نمونه‌هایی با کیفیت بهتر و یکنواخت‌تر از روش جدید کیسه خلأ (VARTM) استفاده شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می دهد سازه‌های ساندویچی موج‌دار با هسته ساعت شنی پر شده با فوم پلی‌اورتان در مقابل بارگذاری کمانشی بار بیشتری را تحمل می کنند و همچنین کارایی خوبی در جذب انرژی دارند. در سازه‌ی ساندویچی مرکبی بدون فوم به دلیل خالی بودن هسته موج‌دار، هسته دچار اعوجاج شده (جدایش پوسته از هسته)، و کمانش محلی رخ می‌دهد. در حالیکه در سازه ساندویچی با فوم به دلیل وجود فوم در هسته، از اعوجاج سازه جلوگیری شده است. همچنین فوم با وجود داشتن وزن سبک قادر به تحمل بار فشاری ناشی از کمانش محلی می‌باشد. در نتیجه سازه تنها دچار کمانش کلی گردیده است.

کلید واژه‌ها: بار کمانش، سازه‌های ساندویچی چندلایه، جدایش پوسته از هسته

Experimental Study of Sandwich Panel Strength with Hourglass and Square Cell Core under Buckling Load

Abstract

In this paper, the strength analysis of composite sandwich structures under buckling load as well as composite polyurethane foam core in composite sandwich structures has been studied experimentally. For better performance of the shell and core in the sandwich structure as well as to increase their strength against buckling compressive load, a reinforcer with new geometry of hourglass and square with foam and without foam has been used. Having a negative Poisson's ratio and greater flexural stiffness as well as maximum load bearing capacity are the reasons for using hourglass geometry. The new VARTM method has been used to create better and more uniform quality samples. The results of this study show that corrugated sandwich structures with hourglass filled with polyurethane foam withstand more load against buckling load and also have good efficiency in energy absorption. In a foamless composite sandwich structure, the core is distorted (separation of the shell from the core), and local buckling occurs due to the empty core. While in the sandwich structure with foam, due to the presence of foam in the core, the distortion of the structure is prevented. Also, despite its light weight, foam is able to withstand the compressive load due to local buckling. As a result, the structure has only suffered from general buckling.

Key words: Buckling load, Multilayer sandwich structures, Separation

* نویسنده پاسخگو: امین فرخ آبادی تلفن: ۰۹۱۹۷۰۴۴۱۷۶، پست الکترونیک: amin-farokh@modares.ac.ir

مقدمه

در دهه گذشته مواد مرکب ساندویچی به دلیل داشتن وزن کم در حین داشتن خواص مکانیکی خوب، مقاومت عالی در برابر خوردگی و عوامل شیمیایی مورد استقبال فراوان صنایع از جمله صنایع هوافضا، صنایع دریایی، صنایع حمل و نقل و صنایع ساختمان سازی قرار گرفته اند. هدف اصلی در طراحی سازه های هوایی و توسعه مواد مورد استفاده در صنعت هوافضا کاهش وزن است. به طور کلی، مواد مورد استفاده با سفتی و استحکام بالا و وزن کم برای کاربردهای هوایی از همه مناسب تر می باشند. سازه های هوایی باید به گونه ای طراحی شوند که اطمینان حاصل گردد هر جزئی از مواد در ظرفیت و توان کامل خود مورد استفاده قرار گرفته است [1]. در ساختارهای ساندویچی رویه ها مانند باله ها در تیرهای I شکل عمل می کنند و نیروهای کششی و فشاری را تحمل می کنند. هسته نیز مانند جان تیر عمل می کند و ضمن نگهداری رویه ها، نیروهای برشی وارد شده بر تیر را نیز تحمل می کند [2]. با توجه به ویژگیهای منحصر بفرد سازه های ساندویچی کامپوزیتی، تحقیقات بسیاری روی آنها انجام شده است. در این مطالعات مواردی چون، ساختارهای مختلف هسته کاربردهای مختلف این سازه ها، مقاومت این سازه ها تحت بارگذاری های مختلف، و مودهای خرابی این سازه ها مورد بررسی قرار گرفته است. مودهای خرابی مانند جدایش رویه از هسته، شکست هسته، چروکیدگی رویه ها، کمانش اجزای هسته و رویه، ترک ماتریسی و ... در این سازه ها هنگامیکه تحت بارگذاری های مختلف از جمله کمانش قرار می گیرند، گزارش شده است. بنابراین در سال های اخیر بررسی رفتار انواع مختلف سازه های ساندویچی تحت بارگذاری های مختلف مانند کمانش، بعنوان یکی از دلایل شکست در آنها، مورد توجه بوده است. تقی زاده و همکارانش [3] رفتار فشاری سازه های ساندویچی با هسته های موج دار مختلف را مورد بررسی قرار دادند. آنها پس از قرار دادن نمونه ها تحت سه نوع بارگذاری به این نتیجه رسیدند که خواص مکانیکی و مودهای شکست سازه ساندویچی مرکبی با هسته موج دار عمدتاً به هندسه و پارامترهای شکل نوک ضربه بستگی دارد، از بین سه نوع هسته، هسته مربعی بهترین بازدهی را در مقایسه با انواع دیگر دارد. اولیس و کارلسون [4] جدایش پانل ها از هسته تحت بار فشاری را به

صورت تجربی بررسی کردند و نشان دادند که استحکام فشاری با کاهش سفتی هسته به شدت کاهش می یابد و در نتیجه آن وسعت جدایش افزایش پیدا می کند. مسلمیان و همکارانش [5] با بررسی تجربی و عددی خرابی در کامپوزیت های ساندویچی آسیب دیده تحت بار فشاری یکنواخت به این نتیجه رسیدند که رشد و گسترش ترک در مطالعه عددی در بعضی موارد با آزمایش تجربی هم خوانی خوبی دارد. فدایی پور و فرخ آبادی [6] با بررسی کمانش غیرخطی کامپوزیت های ساندویچی آسیب دیده به این نتیجه رسیدند که وجود آسیب هایی مانند جداشدگی در فصل مشترک پوسته و هسته باعث کاهش بار بحرانی کمانش می شود. همچنین آنها گزارش کردند با کمتر شدن ضخامت پوسته، شیب نمودار نیرو-جابجایی کمی کمتر شده و در نتیجه آن، میزان تحمل بار کمانشی در سازه ساندویچی کم می شود. ملکی نژاد و همکارانش [7] جدایش رویه از هسته در سازه های ساندویچی مرکبی با هسته مشبک ترکیبی را تحت بار خمشی به صورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. آنها در این تحقیق با در نظر گرفتن اثر ضخامت رویه بر روی مقاومت به جدایش رویه از هسته، در مقایسه با سازه ساندویچی با هسته ساده به این نتیجه رسیدند که با افزایش لایه های رویه، قبل از جدایش رویه از هسته شکست اتفاق می افتد. صیاح لطیفی و همکارانش [8] با بررسی تجربی و عددی سازه های ساندویچی با هسته مشبک بالسا و هسته هیبریدی کامپوزیت/بالسا تحت بارگذاری خمش سه نقطه نشان دادند که هسته هیبریدی، استحکام نسبت به دانسیته وزنی و سفتی نسبت به دانسیته وزنی را به ترتیب به مقدار ۳۴/۷ و ۲۸/۲ درصد افزایش می دهد. روزبهبانی و همکارانش [9] پس از تحلیل تجربی بار کمانش ورق مرکبی ساندویچی با هسته لوزی شکل و استفاده از رهیافت همبستگی ارتعاشی به این نتیجه رسیدند که با افزایش درصد بار اعمالی و تعداد دفعات اندازه گیری فرکانس، دقت پیش بینی بار کمانش (به طوری که اعمال بار بیش از ۶۳ درصد خطا را تا کمتر از ۹ درصد کاهش می دهد) افزایش می یابد. لی و هوآنگ [۱۰] کمانش ثانویه و رفتار خرابی ساندویچ پانل های مرکبی با هسته ضعیف و قوی تحت بارگذاری برشی در صفحه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از عددی آنها نشان داد که خرابی پس

از کمانش به دو عامل استحکام برشی هسته در راستای ضخامت و استحکام کششی عرضی رویه بستگی دارد بسیاری از مطالعات دیگر نیز با بررسی تاثیر ساختارهای مختلف هسته در سازه‌های ساندویچی بر بار بحرانی کمانش نشان داده‌اند که همچنان انجام مطالعات بشتر روی ساختارهای مختلف می‌تواند ظرفیت تحمل بار کمانش این سازه‌ها را به شکل قابل توجهی تغییر دهد.

بیایگی و بارت اسمیت [۱۱] با بررسی پاسخ در صفحه‌ی ستون با هسته مشبک به این نتیجه رسیدند که سازه‌های ساندویچی کامپوزیتی با هسته مشبک مثلثی برای استفاده در ساخت برخی اجزای هواپیما که تحت بار خمشی قرار دارند مناسب هستند. بابا قصاب‌ها و همکارانش [۱۲] با تحلیل عددی کمانش ورق‌های ساندویچی تخت و موج‌دار مرکبی با روکش تخت آلومینیوم به این نتیجه رسیدند که در ساندویچ پانل با هسته دوزنقه‌ای ۶۰ درجه، بار کمانش نسبت به دیگر ورق‌های ساندویچی دارای مقدار بالاتری است. گرین و است و ریانیدر [۱۳] چروکیدگی ساندویچ پانل‌های کامپوزیتی با رویه موج و تحت بار فشاری را بصورت تجربی، عددی و تحلیلی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها رویه‌های موج را بصورت سینوسی و نیم دایره بر روی رویه‌ها ایجاد کردند. آن‌ها بیان کردند که در موج سینوسی به دلیل به وجود آمدن کمانش موضعی، مقاومت کمتری را نسبت به موج دایره‌ای دارد و در حالت کلی، ایجاد رویه‌های موج، به‌طور قابل ملاحظه‌ای مقاومت در برابر چروکیدگی را افزایش می‌دهند. رن و همکارانش [۱۴] هسته‌های مقاوم برای بهبود جذب انرژی خمشی سازه‌های ساندویچی مشبک طراحی نمودند. آن‌ها با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف از قبیل ارتفاع هسته، عرض پایین و بالای هسته دوزنقه‌ای، زاویه ریب‌ها و ریب عمودی به عنوان مستحکم کننده اضافی، به این نتیجه رسیدند که

ساندویچ پانل‌های مرکبی با هسته مشبک با ریب عمودی مستحکم کننده تا ۵۴/۴۸ درصد در جذب انرژی مخصوص نسبت به نوع معمولی آن عملکرد بهتری دارند. چن و همکارانش [۱۵] با بررسی پاسخ فشاری کامپوزیت‌های ترموپلاستیک چندلایه با هسته مشبک در سه حالت مختلف به این نتیجه رسیدند که سازه‌های ساندویچی با هسته‌های عمود نسبت به هم، کارایی بهتری را در مقابل نیروی فشاری از خود نشان می‌دهند. نورآبادی و همکارانش [۱۶] در تحقیقی کمانش صفحات ساندویچی با هسته مشبک تحت بار محوری و فشار یکنواخت روی صفحه را مورد بررسی قرار داده و گزارش کردند که با افزایش ضخامت ریب و رویه بالایی و پایینی سازه ساندویچی با هسته مشبک، بار بحرانی کمانش افزایش می‌یابد. سون و همکارانش [۱۷] با مطالعه تجربی و عددی ساندویچ پانل‌های لانه‌زنبوری تحت بارگذاری خمشی فشاری، به این نتیجه رسیدند که ارتفاع هسته، طول هر یک از سلول‌های هسته، ضخامت هسته و ضخامت پانل نقش مهمی را در تعیین خواص مکانیکی ساندویچ پانل با هسته آلومینیومی ایفا می‌کند. سرخوش و همکاران [۱۸، ۱۹] به بررسی تجربی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف طبیعی و مصنوعی پرداختند. فرخ‌آبادی و ویسی [۲۰] خواص مکانیکی معادل را با روش تحلیلی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد هسته با زاویه بسته ۶۵ درجه دارای ضریب پواسون منفی هست. از پژوهش‌هایی که به بررسی کاربرد سازه‌های ساندویچی مرکبی پرداخته شده است این چنین برداشت می‌شود که این گروه از سازه‌ها بیشترین کاربرد را در صنایع هوافضا دارند. در میان این مطالعات محققین سعی در ابداع روش‌های ساخت و ارائه روش‌های نوین در راستای کاهش هزینه‌های ساخت و بالا بردن قابلیت افزایش جذب انرژی نموده‌اند.

از کمانش به دو عامل استحکام برشی هسته در راستای ضخامت و استحکام کششی عرضی رویه بستگی دارد بسیاری از مطالعات دیگر نیز با بررسی تاثیر ساختارهای مختلف هسته در سازه‌های ساندویچی بر بار بحرانی کمانش نشان داده‌اند که همچنان انجام مطالعات بشتر روی ساختارهای مختلف می‌تواند ظرفیت تحمل بار کمانش این سازه‌ها را به شکل قابل توجهی تغییر دهد.

بیایگی و بارت اسمیت [۱۱] با بررسی پاسخ در صفحه‌ی ستون با هسته مشبک به این نتیجه رسیدند که سازه‌های ساندویچی کامپوزیتی با هسته مشبک مثلثی برای استفاده در ساخت برخی اجزای هواپیما که تحت بار خمشی قرار دارند مناسب هستند. بابا قصاب‌ها و همکارانش [۱۲] با تحلیل عددی کمانش ورق‌های ساندویچی تخت و موج‌دار مرکبی با روکش تخت آلومینیوم به این نتیجه رسیدند که در ساندویچ پانل با هسته دوزنقه‌ای ۶۰ درجه، بار کمانش نسبت به دیگر ورق‌های ساندویچی دارای مقدار بالاتری است. گرین و است و ریانیدر [۱۳] چروکیدگی ساندویچ پانل‌های کامپوزیتی با رویه موج و تحت بار فشاری را بصورت تجربی، عددی و تحلیلی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها رویه‌های موج را بصورت سینوسی و نیم دایره بر روی رویه‌ها ایجاد کردند. آن‌ها بیان کردند که در موج سینوسی به دلیل به وجود آمدن کمانش موضعی، مقاومت کمتری را نسبت به موج دایره‌ای دارد و در حالت کلی، ایجاد رویه‌های موج، به‌طور قابل ملاحظه‌ای مقاومت در برابر چروکیدگی را افزایش می‌دهند. رن و همکارانش [۱۴] هسته‌های مقاوم برای بهبود جذب انرژی خمشی سازه‌های ساندویچی مشبک طراحی نمودند. آن‌ها با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف از قبیل ارتفاع هسته، عرض پایین و بالای هسته دوزنقه‌ای، زاویه ریب‌ها و ریب عمودی به عنوان مستحکم کننده اضافی، به این نتیجه رسیدند که

ترکیب یکسان ساخته شده و به داخل هسته‌ها تزریق شده است.



شکل ۱- شماتیکی از مواد مصرفی ساخت هسته مربعی

هندس

ابعاد و هندسه کلی نمونه‌ها با توجه به معیارهای استاندارد ASTM مربوط به تعیین خواص فشاری با کد ۳۶۴ و کمانشی با کد ۳۶۵ ساختارهای ساندویچی انتخاب شده است. [۲۱-۲۲] ابعاد و هندسه نمونه‌ها مطابق جدول (۱) نمایش داده شده است.

جدول ۱- ابعاد نمونه‌ها (برحسب میلی‌متر)

طول مفید	۴۰۰
عرض نمونه	۶۵
ضخامت نمونه	۲۲,۴
ضخامت هسته	۲۱,۶
ضخامت رویه	۰,۴

برای ساخت رویه و هسته موج‌دار هر دو نمونه ساعت شنی و مربعی از دو لایه مرکبی استفاده شده است. ضخامت هر لایه در رویه و هسته برابر ۰,۲ میلی‌متر می‌باشد. نحوه قرارگیری

مطالعه حاضر از لحاظ ساختار سازه‌های ساندویچی و روش ساخت سازه به دلیل استفاده از روش کیسه خلا^۱ از کیفیت ساخت بهتری برخوردار است. استفاده از روش کیسه خلا برای ساخت پوسته و هسته موج‌دار بصورت یکپارچه برای اولین بار انجام شده است. هدف از این پژوهش بررسی رفتار کمانش و پس‌کمانش سازه‌های ساندویچی هسته‌های موج‌دار ساعت شنی و موج‌دار مربعی در حضور جداشدگی است. پوسته این سازه‌ها از جنس شیشه-اپوکسی و داخل هسته‌های آن‌ها از نوع فوم پلی‌اورتان می‌باشد هم‌چنین هسته‌ها متشکل از دو لایه موج‌دار مرکبی از جنس شیشه اپوکسی با شکل موج مربعی و ساعت شنی با فوم و بدون فوم است که داخل این چند لایه مرکبی قرار دارد. با توجه به مطالعات صورت گرفته یکی از نقاط مستعد خرابی در سازه‌های ساندویچی جدایش بین رویه و هسته است. در این پژوهش به بررسی جدایش پوسته از هسته در سازه‌های چندلایه ساندویچی با هسته ترکیبی فوم و بدون فوم، تحت بار کمانشی پرداخته شده است. هم‌چنین استفاده از هسته جدید (ساعت شنی) به دلیل داشتن ضریب پواسون منفی و سفتی خمشی بالا باعث تحمل بار بیشینه تحت بارگذاری کمانش خطی و غیرخطی می‌شود.

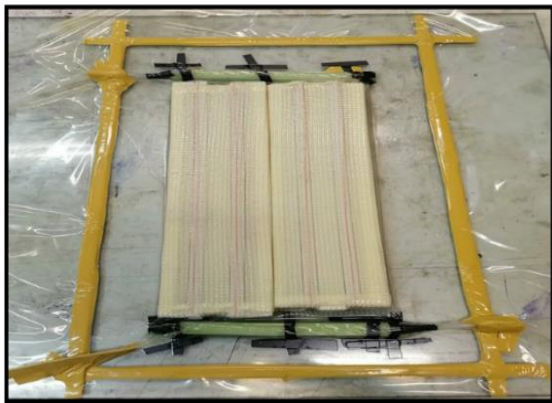
جزئیات ساخت

مواد مصرفی

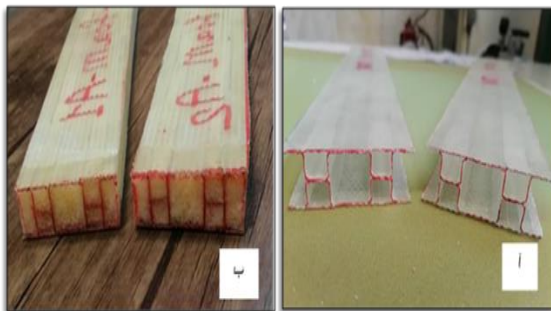
جهت ایجاد فاز زمینه کامپوزیت، در هسته‌ها و پوسته‌ها از رزین اپوکسی با گرید ML506 و هاردنر HA11 با چگالی ۱۱۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب در دمای اتاق استفاده شده است. نسبت ترکیب این رزین با هاردنر ۱۰۰ به ۱۳ است و حدود ۳۰ دقیقه تا تبدیل شدن به ژل زمان سپری می‌شود. جهت ساخت پوسته‌های مرکبی از الیاف پارچه شیشه‌ای بافته شده‌ای-گلس با مقدار چگالی ۲۰۰ گرم بر مترمربع استفاده شده است. فوم پلی‌اورتان از مخلوط شدن دو جزء ایزوسیانات با پلی‌ال با درصد

^۱ VARTM

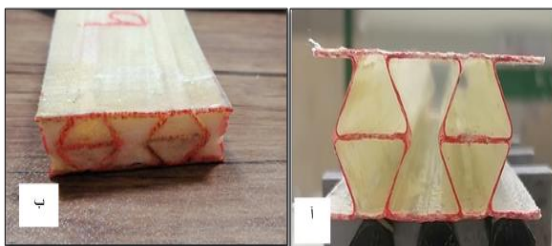
توسط نایلون و کیوم و خمیر مخصوص، آب‌بندی شده است، رزین به کمک پمپ خلأ تزریق شده و بدین ترتیب تمام محفظه به‌طور یکنواخت از رزین پر شده و رویه و هسته به‌طور یکنواخت آغشته به رزین می‌شوند. در مرحله دوم پس از خارج نمودن هسته‌های چوبی که برای شکل‌دهی هسته موج‌دار از آن‌ها استفاده شده است تزریق فوم پلی اورتان دو جزئی (ایزوسیانات + پلی ال) انجام می‌پذیرد. به منظور تکرار و اطمینان از نتایج آزمایش‌ها، برای هر هندسه از هسته، دو نمونه مجزا ساخته شده است.



شکل ۴- ساخت نمونه‌ها با استفاده از روش VARTM

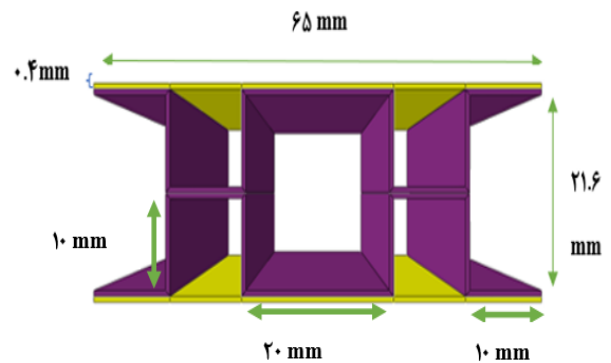


شکل ۵- الف) هسته مربعی بدون فوم و ب) هسته مربعی با فوم پلی اورتان

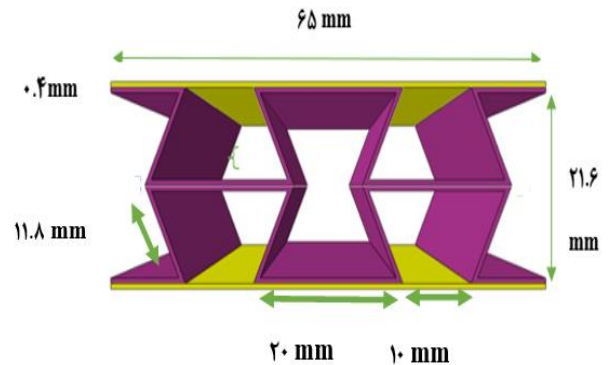


شکل ۶- الف) هسته ساعت شنی بدون فوم و ب) هسته ساعت شنی با فوم پلی اورتان

رویه‌ها و هسته نسبت به هم و شکل کلی نمونه‌ها در شکل (۲) و (۳) قابل مشاهده است.



شکل ۲- شماتیکی از ابعاد کلی و سطح مقطع نمونه با هسته مربعی



شکل ۳- شماتیکی از ابعاد کلی و سطح مقطع با هسته ساعت شنی

مراحل ساخت نمونه‌ها

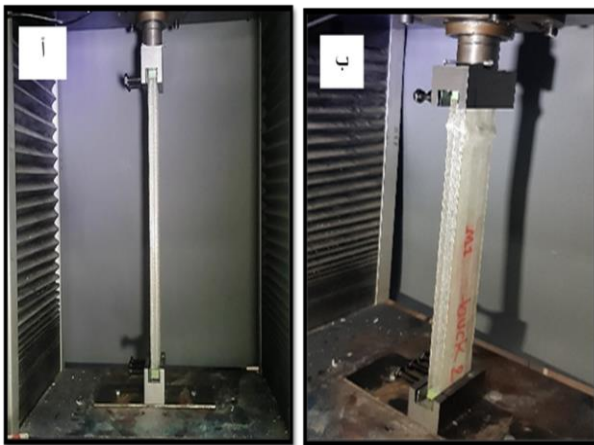
با مشخص شدن ابعاد و هندسه نمونه‌ها در حالت‌های مختلف، نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM ساخته شدند. لازم به گفتنی است با توجه به محدودیت دسترسی به مواد اولیه مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها به ناچار به ساخت دو نمونه بسنده شد (تعداد پیشنهادی استاندارد سه مورد). برای ساخت رویه و هسته‌های موج‌دار از دو لایه الیاف شیشه با روش انتقال رزین به کمک کیسه خلأ استفاده شده است. استفاده از روش کیسه خلأ باعث شده است تا نمونه‌هایی با کیفیت بالا و یکنواخت ساخته شود هم‌چنین تأثیر عیوب هنگام ساخت در نتایج تحلیل تجربی به کمترین مقدار ممکن رسیده است.

ساخت نمونه‌های با فوم و بدون فوم شامل دو مرحله است: در مرحله اول، هسته که شامل چند لایه مرکبی موج‌دار هسته به همراه رویه‌ها به صورت یکپارچه توسط روش انتقال رزین به کمک خلأ به یکدیگر متصل می‌شوند. در این فرآیند، پس از آماده‌سازی هسته و رویه‌ها و قرار دادن آن‌ها در محفظه‌ای که

شکل ۷ - نمودار تنش - کرنش فوم پلی اورتان

آزمون تجربی کمانش با فیکسچر

آزمون کمانش با استفاده از دستگاه یونیورسالی قدرت تحمل بار ۲۰ کیلو نیوتن برای آزمون‌های فشار انجام شده است. مطابق با استاندارد توصیه می‌شود که انتهای بالا و پایین قطعه برای جلوگیری از خرابی و لایه شدن احتمالی بر اثر فشار نیرو مقاومت‌سازی شود، که در این آزمون انتهای تمام قطعات توسط فوم پی‌وی‌سی و چسب اپوکسی-گلس مقاومت‌سازی شده است. سرعت حرکت دستگاه آزمون کشش و فشار طبق استاندارد ASTM C364، ۰/۲ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که این شرایط برای تمامی آزمایش‌ها یکسان در نظر گرفته شده است. ابعاد نمونه‌ها ۶،۵ × ۴۴ × ۲،۱ سانتی‌متر است. با توجه به اینکه دو سر نمونه‌ها از هر دو طرف به اندازه ۲ سانتی‌متر داخل فیکسچر قرار گرفته است، طول مؤثر نمونه برابر ۴۰ سانتی‌متر شده است، که ضخامت هسته ۲۱،۶ سانتی‌متر و ضخامت هر یک از پوسته‌ها (دو لایه) ۰،۰۴ سانتی‌متر می‌باشد. جهت انجام آزمون تجربی نمونه‌ها بصورت عمودی داخل فیکسچر طراحی شده قرار گرفته شد و از هر مدل تعداد دو نمونه مورد آزمون تجربی قرار گرفت. سرعت عمودی جابه‌جایی فک بالایی دستگاه در حین انجام آزمون ۰،۲ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شد و آزمون کمانش برای ۸ نمونه انجام پذیرفت. شکل (۸) نمونه (آ) در حال آزمون کمانش توسط دستگاه و هم‌چنین نمونه (ب) پس از آزمون کمانش را نشان می‌دهد.



شکل ۸ - (آ) نمونه تحت آزمون کمانش (ب) نمونه پس از آزمون

با توجه به آزمون کشش انجام شده خواص مکانیکی رویه و هسته‌های مرکبی موج‌دار طبق جدول (۲) آورده شده است [23].

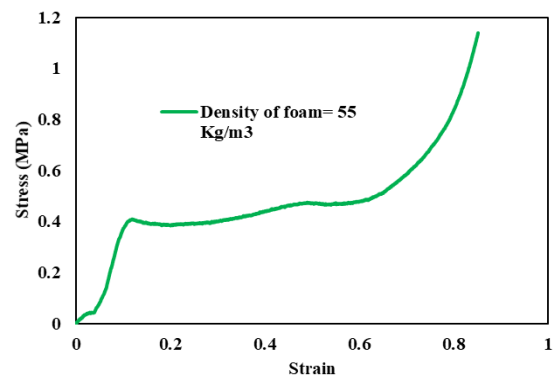
جدول ۲- مشخصات خواص مکانیکی چند لایه مرکبی

خواص مکانیکی	مقدار
E ₁	۲۲۶۸۸
E ₂	۲۲۶۸۸
E ₃	۲۷۰۰
□ ₁₂	۰،۱۴۴
□ ₁₃	۰/۱
□ ₂₃	۰/۱
G ₁₂	۵۴۹۴
G ₁₃	۵۴۹۴
G ₂₃	۱۶۰۰

خواص مکانیکی فوم پلی اورتان به کار رفته در هسته مطابق جدول (۳) از نمودار آزمون تنش و کرنش شکل (۷) که بصورت تجربی بدست آمده است، استخراج شده است.

جدول ۳- مشخصات فوم پلی اورتان

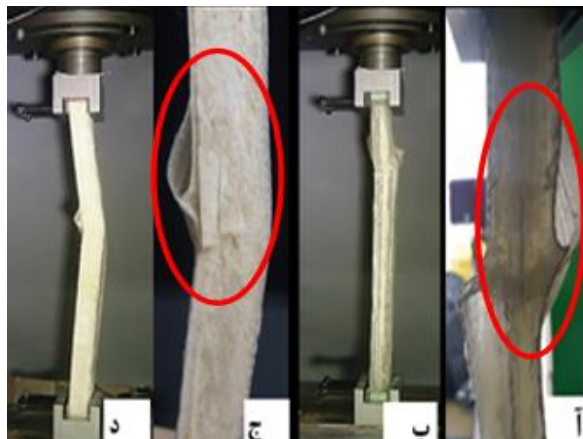
چگالی (Kg/mm ³)	۵۵
مدول الاستیک (MPa)	۷
نسبت پواسون	۰/۱



(۱۰) (آ-ب)، برای هسته مربعی و شکل (۱۱) (آ-ب) برای هسته ساعت شنی سازه چهار شکست و ترک می‌شود. اما در سازه‌های ساندویچی با هسته فوم دار، برخلاف حالت بدون فوم، سازه پس از شروع آزمون تنها دچار کمانش کلی شده، که در نهایت منجر به جدایش پوسته از هسته و هسته از فوم می‌شود که مطابق شکل (۱۰)، (ج-د) برای سازه با هسته مربعی و شکل (۱۱) (آ-ب) برای هسته ساعت شنی نمایش داده شده است.



شکل ۱۰- نمایی از خرابی سازه ساندویچی با هسته مربعی تحت بار کمانش (الف- ب) بدون فوم (ج- د) با فوم



شکل ۱۱- نمایی از خرابی سازه ساندویچی با هسته ساعت شنی تحت بار کمانش (آ- ب) بدون فوم (ج- د) با فوم

مقایسه نمودار نیرو-جابجایی سازه با هسته مربعی با فوم و بدون فوم تحت بار کمانش در شکل (۱۲) نشان داده شده است. همچنین مقایسه نمودار نیرو-جابجایی سازه با هسته ساعت شنی نیز مطابق شکل (۱۳) از نتایج تجربی بدست آمده است. طبق نمودار هر دو شکل (۱۲) و (۱۳) نتیجه می‌شود که میزان تحمل بار کمانشی در نمونه‌ها با هسته ساعت شنی و

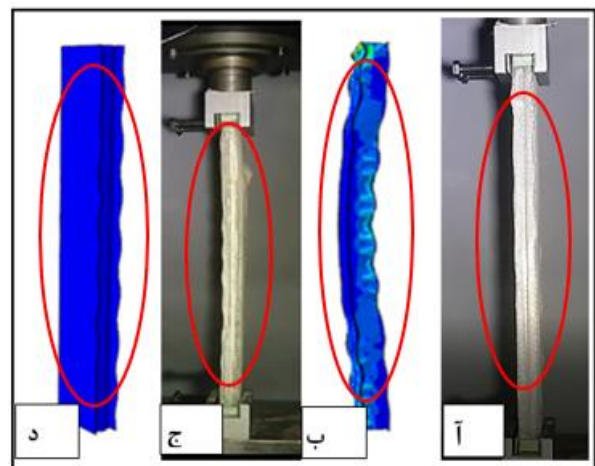
برای تفکیک نمونه‌های مرکبی از یکدیگر بهتر است برای هر نمونه یک کد شناسایی در نظر گرفته شود که در جدول (۴) بصورت اختصار آورده شده است.

جدول ۴- کد نمونه‌ها

نوع هسته	کد نمونه
مربعی بدون فوم	M1, M2
مربعی با فوم	MF1, MF2
ساعت شنی بدون فوم	S1, S2
ساعت شنی با فوم	SF1, SF2

بررسی نتایج تجربی

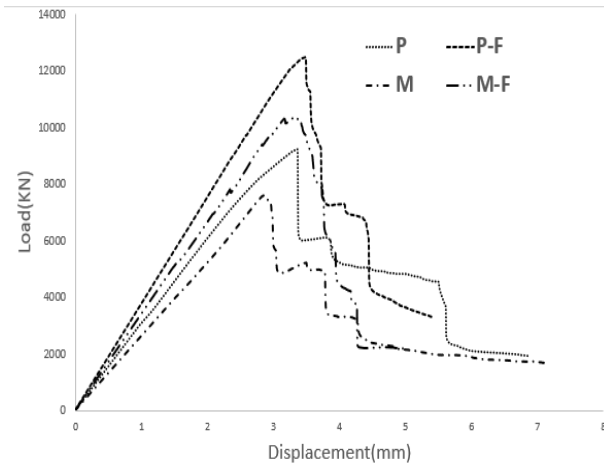
طبق مشاهدات صورت گرفته برای آزمون سازه ساندویچی با هسته مربعی و ساعت شنی بدون فوم، ابتدا سازه بعد از گذشت چند ثانیه از آزمون، شروع به کمانش موضعی می‌کند. به طوری که تمام قسمت‌های سازه بخصوص لبه‌ها که فقط شامل پوسته می‌باشند و ضخامت کمتری نسبت به سایر نقاط دارند، مطابق شکل (۹) دچار اعوجاج می‌شوند.



شکل ۹- نمایی از اعوجاج در سازه ساندویچی با هسته ساعت شنی و مربعی بدون فوم تحت بار کمانشی

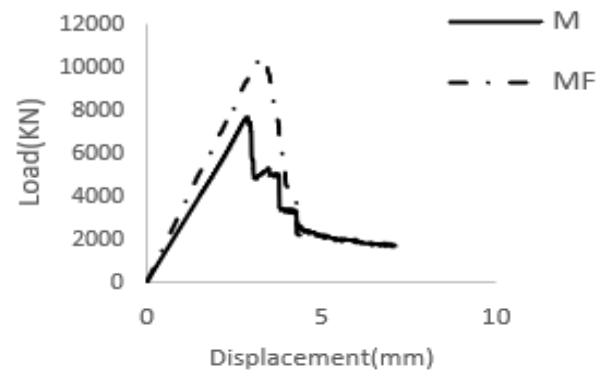
همچنین تا زمانی که سازه به بار نهایی خود برسد دو مرتبه دچار افت نیرو می‌شود. این افت نیرو باعث جداشدگی پوسته از هسته شده است. که در شکل (۱۰) و (۱۱) (آ-ج) مشاهده می‌شود و در انتها با جابه‌جایی ثابت و افت بار مطابق شکل

تجربی بیشتر است. بدلیل استفاده از کامپوزیت بیشتر در سازه با هسته ساعت شنی، سطح مقاومت کمانشی افزایش یافته است و سازه ظرفیت بار بیشتری را تحمل می‌کند. همچنین نمونه ساعت شنی بدون فوم در مقابل مربعی بدون فوم در حالت ناحیه غیرخطی، ناپایداری و افت بار کمتری دارد.



شکل ۱۴- مقایسه نمودار نیرو-جابجایی هسته ساعت شنی و مربعی با فوم و بدون فوم تحت بار کمانش

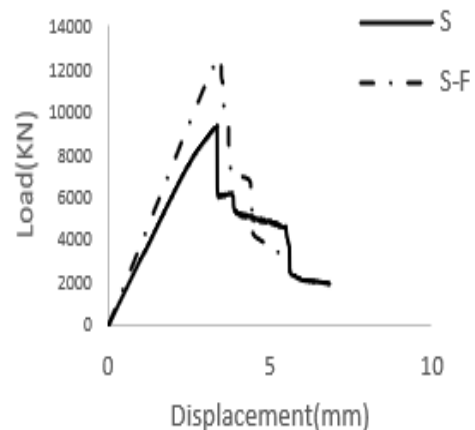
مربعی با فوم، در مقابل نمونه‌ها با هسته ساعت شنی و مربعی بدون فوم بیشتر است. این امر به دلیل وجود فوم در هسته است. با وجود اینکه فوم از وزن سبکی بر خوردار است اما زمانی که داخل هسته‌ها تزریق می‌شود تحمل بار فشاری وارد بر سازه را به شکل قابل توجهی افزایش می‌دهد. نکته دیگر این است که وجود فوم باعث شده در سازه کمانش محلی و افت بار ناگهانی صورت نگیرد. افت بار در سازه مربعی و ساعت شنی با فوم بصورت نوسانی است اما در نمودار بدون فوم افت ناگهانی بار مشاهده می‌شود که به دلیل کمانش محلی است.



شکل ۱۲- مقایسه نمودار نیرو-جابجایی هسته ساعت مربعی با فوم و بدون فوم تحت بار کمانش

جدول ۵- نتایج تحلیل تجربی آزمون بار کمانش

نوع هسته	بار کمانشی (KN)
هسته مربعی بدون فوم	۹/۱
هسته مربعی با فوم	۱۰/۳
هسته ساعت شنی بدون فوم	۹/۲
هسته ساعت شنی با فوم	۱۲/۴



شکل ۱۳- مقایسه نمودار نیرو-جابجایی هسته ساعت شنی با فوم و بدون فوم تحت بار کمانش

نتیجه‌گیری

نتایجی که از مطالعه آزمون تجربی در این پژوهش استنباط شده است.

- ساخت سازه‌های مرکب با هسته جدید ساعت شنی و مربعی ارائه شده است.
- ساختار هسته ساعت شنی به واسطه شکل هندسی خود نسبت به هسته مربعی در مقابل بار کمانشی مقاوم‌تر است و از قابلیت جذب انرژی بالاتری

طبق شکل (۱۴) مقایسه نمودار نیرو-جابجایی هسته ساعت شنی و مربعی با فوم و بدون فوم تحت بار کمانش انجام شده است. همانطور که مشاهده می‌شود میزان تحمل بار نمونه ساعت شنی بدون فوم نسبت به مربعی بدون فوم در آزمون

- of Sandwich Structures & Materials*, 8(1), 7-31.
- [5]. Moslemian, R., Quispitupa, A., Berggreen, C., & Hayman, B. (2012). *Failure of uniformly compression loaded debonded sandwich panels—An experimental and numerical study. Journal of Sandwich Structures & Materials*, 14(3), 297-324.
- [6]. Fadaeipoor H, Farrokhabadi A. (2018). *Non-Linear buckling of composite sandwiches include delamination. 27th Annual International Conference of Iranian Society of Mechanical Engineering and 7th Conference on Thermal Power Plants.*
- [7]. Malekinejad Bahabadi, H., Rahimi, G. H., & Farrokhabadi, A. (2016). *Numerical and experimental investigation of skin/core debonding in composite sandwich structures with corrugated core under bending loading. Modares Mechanical Engineering*, 16(6), 52-62.
- [8]. Sayahlatifi, S., Rahimi, G., & Bokaei, A. (2021). *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*, 23(1), 94-131.
- [9]. Aghaei-Ruzbahani, M., Shahgholian-Ghahfarokhi, D., & Rahimi, G. (2020). *Experimental Analysis of Composite Sandwich Plates Buckling with Lozenge Core Using the Vibration Correlation Technique. Modares Mechanical Engineering*, 20(5), 1399-1408.
- [10]. Li, D., & Huang, B. Z. (2019). *Secondary buckling and failure behaviors of composite sandwich panels with weak and strong cores under in-plane shear loading. Aerospace Science and Technology*, 95, 105463.
- [11]. Biagi, R., & Bart-Smith, H. (2012). *In-plane column response of metallic corrugated core sandwich panels. International Journal of Solids and Structures*, 49(26), 3901-3914.
- [12]. Babaqashabha, Vahid, Adalat, Mohammad Ehsan, and Tatlari Maryam, *Numerical analysis of the buckling of flat and corrugated sandwich sheets with flat aluminum coating. The first national*

برخوردار است. این نوع هسته به دلیل داشتن ضریب پواسون منفی می‌تواند در آزمون کمانش بار بیشتری را تحمل کند.

- استفاده از روش کیسه خلاء در سازه های مرکب باعث بهبود کیفیت ساخت شده است.
- استفاده از چندلایه مرکبی موج‌دار در داخل هسته استحکام سازه و ناپایداری سازه را می‌توان تا حد زیادی بهبود بخشید.
- با توجه به شکل نمودارها، میزان بار کمانش سازه ساندویچی ساعت شنی با فوم بیشتر از مربعی با فوم و همچنین میزان بار کمانش ساعت شنی بدون فوم بیشتر از مربعی بدون فوم است.
- در سازه ساندویچی مرکبی بدون فوم در هر دو هسته به دلیل خالی بودن، هسته دچار اعوجاج شده و کمانش محلی رخ داده است.
- در سازه ساندویچی با فوم به دلیل وجود فوم در هسته از اعوجاج سازه جلوگیری شده است در حالی که فوم از وزن سبکی برخوردار است اما زمانی که داخل هسته‌ها تزریق می‌شود تحمل بار فشاری وارد بر سازه را به شکل قابل توجهی افزایش می‌دهد.

منابع و مراجع

- [1]. Petrone, G., D'Alessandro, V., Franco, F., Mace, B., & De Rosa, S. (2014). *Modal characterisation of recyclable foam sandwichpanels. Composite Structures*, 113, 362-368.
- [2]. Gupta, N., Woldeesenbet, E., Hore, K., & Sankaran, S. (2002). *Response of syntactic foam core sandwich structured composites to three-point bending. Journal of Sandwich Structures & Materials*, 4(3), 249-272.
- [3]. Taghizadeh, S. A., Farrokhabadi, A., Liaghat, G., Pedram, E., Malekinejad, H., Mohammadi, S. F., & Ahmadi, H. (2019). *Characterization of compressive behavior of PVC foam infilled composite sandwich panels with different corrugated core shapes. Thin-Walled Structures*, 135, 160-172.
- [4]. Aviles, F., & Carlsson, L. A. (2006). *Experimental study of debonded sandwich panels under compressive loading. Journal*

- [21]. ASTM C-364-94. (1994). Standard test method for edgewise compressive strength of sandwich constructions. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- [22]. ASTM International. (2016). Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores. ASTM.
- [23]. Farrokhhabadi, A., Neyestani, S., Akbari, D., & Sarkhosh, R. (2021). *Assessment of delamination growth due to matrix cracking in hybrid Glass-Kevlar composite laminates using experimental, numerical and analytical methods. Engineering Fracture Mechanics, 247*, 107691.
- conference on the central development of civil engineering, architecture, electricity and mechanics in Iran; 2014.*
- [13]. Grenestedt, J. L., & Reany, J. (2007). *Wrinkling of corrugated skin sandwich panels. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 38(2)*, 576-589.
- [14]. Yiru, R. E. N., Yabin, D. E. N. G., & Jiang, H. (2021). *Core reinforcement design for improving flexural energy-absorption of corrugated sandwich composite structure. Chinese Journal of Aeronautics, 34(5)*, 510-522.
- [15]. Chen, L., Peng, S., Liu, J., Liu, H., Chen, L., Du, B., ... & Fang, D. (2020). *Compressive response of multi-layered thermoplastic composite corrugated sandwich panels: Modelling and experiments. Composites Part B: Engineering, 189*, 107899.
- [16]. Noorabadi, Milad, Jafar Eskandari, and Nateghi, Hossein Ali, *buckling analysis of sandwich plates with mesh core under axial load and uniform pressure on the plate, 13th Marine Industry Conference; 1390.*
- [17]. Sun, G., Huo, X., Chen, D., & Li, Q. (2017). *Experimental and numerical study on honeycomb sandwich panels under bending and in-panel compression. Materials & Design, 133*, 154-168.
- [18]. Sarkhosh R, Zarei H. Design, Manufacturing and mechanical and electrical properties evaluation of glass fiber reinforced PTFE polymer matrix composites. *Modares Mechanical Engineering. 2021; 21 (2) :117-127 (In persion)*
- [19]. Sarkhosh, R., Arabqomi, H., Farrokhhabadi, A. Design, manufacturing, and evaluation of mechanical and electrical properties of biodegradable epoxy/hemp composite produced by VARTM method. *Journal of Aeronautical Engineering, 2022. (In persion)*
- [20]. Veisi, H., & Farrokhhabadi, A. (2021). *Investigation of the equivalent material properties and failure stress of the re-entrant composite lattice structures using an analytical model. Composite Structures, 257*, 113161.