مجله مهندسی مکانیک مدرس، تیر 1394، دوره 15، شماره 4، ص‌ص 51-57

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی تجربی تأثیر شکل موج هسته بر خواص فشاری ساختارهای ساندویچی با رویه کامپوزیت و هسته کامپوزیتی موج‌دار و فوم

عباسعلی محمدی ده‌آبادی[1]، غلامحسین رحیمی[2*]، رحمت‌الله رحمانی[3]

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
3- کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
* تهران، صندوق پستی 14115143، rahimi_gh@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 17 آذر 1393
پذیرش: 07 بهمن 1393
ارائه در سایت: 28 بهمن 1393

کلید واژگان:
بارگذاری فشاری
ساختار ساندویچی
هسته موج‌دار کامپوزیتی
رویه کامپوزیتی

چکیده

در این مقاله، رفتار ساختارهای ساندویچی با رویه‌هایی از جنس کامپوزیت و هسته‌ای متشکل از فوم و چندلایه کامپوزیتی موج‌دار، تحت بار محوری فشاری بصورت تجربی بررسی شده است. سه شکل موج هندسی مربعی، ذوزنقه‌ای و مثلثی برای چندلایه کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته در نظر گرفته شده و نتایج با نمونه مرجع که هسته آن ساده و تنها متشکل از فوم می‌باشد، مقایسه شده‌اند. رویه‌ها و چندلایه کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته با استفاده از الیاف بافته شده شیشه و رزین اپوکسی ساخته شده و فوم داخل هسته از جنس PVC می‌باشد. برای ساخت چندلایه کامپوزیتی موج‌دار از روش لایه‌چینی دستی و برای اتصال رویه‌ها به هسته از تکنیک انتقال رزین به کمک خلأ، استفاده شده است. به منظور صحت‌سنجی نتایج تجربی، از هر نوع شکل موج هسته، سه نمونه یکسان ساخته شده و برای مقایسه نتایج، از میانگین داده‌های تجربی استفاده شده است. آزمون تجربی نمونه‌ها مطابق با آزمون فشار لبه‌ای سازه‌های ساندویچی و بر اساس استاندارد ASTM، انجام شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که استفاده از چندلایه کامپوزیتی موج‌دار در داخل هسته خواص مکانیکی (نظیر استحکام فشاری، سفتی محوری، چقرمگی) و نسبت خواص مکانیکی به جرم سازه را تا حد زیادی بهبود می‌دهد، همچنین هرچه شکل موج هسته به شکل موج مربعی نزدیکتر باشد، سازه خواص مکانیکی مطلوب‌تری را در مقابل بارگذاری فشاری دارد. در مجموع استحکام فشاری از 188/56% (هسته مثلثی) تا 362/37% (هسته مربعی) و نسبت استحکام فشاری به جرم نیز از 92/36% (هسته مثلثی) تا 141/4% (هسته مربعی)، نسبت به حالت مرجع افزایش داشته‌اند.

Experimental investigation on core shape effect on compressive properties of sandwich structures with composite skins, corrugated composite core and foam

Abbasali Mohammadi Dehabadi, Gholam Hosein Rahimi*, Rahmat Rahmani

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
* P.O.B. 14115143 Tehran, rahimi_gh@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 08 December 2014
Accepted 27 January 2015
Available Online 17 February 2015

Keywords:
Compressive load
Sandwich structure
Corrugated composite core
Composite skin

ABSTRACT

In this paper, the behavior of sandwich structures with composite skins and the core that consists of foam and a corrugated composite laminate under compressive load is investigated experimentally. Three geometrical shapes including square, trapezoid and triangle forms are considered for corrugated composite laminate and results are compared with reference specimen with simple core that is made of foam. Skins and corrugated composite laminate are made from woven glass and epoxy resin; PVC foam is used in core. Corrugated composite laminate is built using the hand layup method and vacuum assisted resin transfer molding technique is used to join the skins to the core. In order to confirm experimental accuracy of test three of the same samples have been produced for each type of core shape and the average of the data tests has been used to compare the results. The edgewise compressive test based on ASTM is used to perform the experimental test. The results show that set corrugated laminate composite in core improves the mechanical properties (such as compressive strength, axial stiffness, toughness) and the ratio of mechanical properties to the weight of these structures to a large extent. Also, by approaching the square shape the structure achieves more favorable properties. The results have shown that compressive strength is increased from 188.56% (triangle core) to 362.37% (square core) and the ratio of compressive strength to weight is increased from 92.36% (triangle core) to 141.4% (square core).

1- مقدمه

سازه‌های ساندویچی به سازه‌هایی گفته می‌شود که از دو رویه نازک با خواص مکانیکی بالا و هسته‌ای ضخیم ولی نسبتاً ضعیف و سبک تشکیل شده‌اند؛ ترکیب این ویژگی‌ها سبب افزایش استحکام و استحکام به وزن سازه می‌گردد.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
A. Mohammadi Dehabadi, Gh. H. Rahimi, R. Rahmani, Experimental investigation on core shape effect on compressive properties of sandwich structures with composite skins, corrugated composite core and foam, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 51-57, 2015 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.4.14.6]

با توجه به نوع کاربرد این سازه‌ها، می‌توان از جنس و اشکال مختلفی برای رویه‌ها و هسته استفاده کرد. بعنوان نمونه برای رویه‌ها می‌توان از چوب، آلومینیوم، پلاستیک و کامپوزیت بصورت مسطح و یا موج‌دار و برای هسته از چوب، انواع فوم‌ها، آلومینیوم و کامپوزیت بصورت هسته‌های موج‌دار و شکل-های مختلف لانه‌زنبوری استفاده کرد. در بین مواد مورد استفاده، مواد کامپوزیتی ساندویچی به دلیل دارا بودن خواصی نظیر وزن کم در حین داشتن خواص مکانیکی مطلوب، مقاومت عالی در برابر خوردگی و عوامل شیمیایی، عایق بودن نسبی در برابر حرارت و صدا، قابلیت ساخت و پایداری مناسب مورد استقبال فراوان صنایع مانند صنایع هوافضا، صنایع دریایی، صنایع حمل و نقل و صنایع ساختمان‌سازی قرار گرفته‌اند. طی چند سال اخیر، مطالعاتی در زمینه رفتار مکانیکی ساختارهای ساندویچی صورت گرفته است.

رائو [1] کمانش برشی ورق‌های موج‌دار کامپوزیتی را مورد بررسی قرار داد. شکل موج ورق‌ها به صورت موج سینوسی و ذوزنقه‌ای بود. او ورق‌های موج‌دار را به یک ورق معادل تبدیل کرد و خواص آن را با استفاده از پارامترهای هندسی و خواص مکانیکی پانل به دست آورد. در تحلیل او فرض شده بود که دو لبه روبه‌رویی پانل‌ها، دارای تکیه‌گاه ساده هستند و پانل از دو طرف دیگر طویل باشد و برای حل مسئله، فرضیات کیرشهف–لاو را در نظر گرفت. نتایج او نشان داد که صفحه موج‌دار عمود بر طول کوچک‌تر عملکرد بهتری نسبت به صفحه موج‌داری دارد که بر طول بزرگ‌تر عمود است. هدر [2] با استفاده از روش‌های المان محدود و حل تحلیلی به محاسبه بار کمانشی ساندویچ پانل‌های ساده و ساندویچ پانل‌های تقویت‌شده پرداخت. او با استفاده از روش انرژی و همچنین توابع تغییر شکل که شرایط مرزی را ارضا می‌کنند، بار کمانشی را برای پانل‌ها، تحت شرایط مرزی مختلف، محاسبه کرد. تحلیل‌های آن‌ها نشان داد که اگر ساندویچ پانل‌ها داری شرایط مرزی تکیه‌گاه ساده باشند، نتایج به‌دست آمده از هر دو روش اختلاف کمی با یکدیگر دارند و در موارد دیگر اگر نسبت طول به عرض یک یا بیشتر از آن باشد، نتایج هر دو روش با یکدیگر سازگارند. ویلیام و جکسون[3] با استفاده از روش ریلی-ریتز به تحلیل کمانش ساندویچ پانلی که هسته‌های آن بصورت هانی کمب و از جنس تیتانیوم، و رویه‌ها از جنس کامپوزیت با زمینه فلزی بود و تحت بار فشاری در صفحه و بار برشی قرار داشت، پرداختند. آن‌ها در تحلیل خود اثر برش عرضی هسته را در نظر گرفتند. نتایج آن‌ها نشان می‌داد که ساندویچ پانل‌های بلند نسبت استحکام به وزن بهتری دارند. همچنین افزایش مقاومت کمانشی پانل در برش سریع‌تر از فشار کاهش پیدا می‌کند. هم‌چنین جهت الیاف در رویه‌ها برای بهینه کردن مقاومت کمانشی تحت بار فشاری و برشی به‌شدت به شرایط بارگذاری و ضریب لاغری پانل‌ها وابسته است. بوانیک و همکارانش [4] با استفاده از تئوری همگن‌سازی، خواص مؤثر ساندویچ پانل‌ها با هسته مواج را مورد بررسی قرار دادند. با استفاده از این تئوری هسته مواج را به یک ورق همگن با رفتار کلی تک‌سلول پایه تبدیل کردند. آن‌ها نتایج به دست آمده از این تئوری را با آزمون‌های تجربی و مدل‌سازی المان محدود مقایسه کرده و دریافتند که در حالت بارگذاری بصورت خمش خالص نتایج با استفاده از روش‌های گوناگون بسیار به هم نزدیک هستند، درصورتی‌که در بارگذاری خمش ساده به دلیل وجود اثرات برش عرضی، نتایج با یکدیگر اختلاف دارند. تیان و لو [5] به بهینه کردن وزن یک پانل تحت فشار که هسته بصورت موج‌دار بوده و دارای یک یا دو رویه است، پرداخته‌اند. آن‌ها برای بهینه کردن وزن از دو روش بهینه‌سازی استفاده کرده و هشت نوع هندسه شامل مربعی، تقویت شده با تیغه، ذوزنقه‌ای و سه‌گوش را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که از نقطه‌نظر وزنی، پانل‌ها با تقویت‌کننده‌های تیغه‌ای برای شرایط تکیه‌گاهی استفاده شده بهترین عملکرد و هسته‌های مربعی کمترین عملکرد را دارند. نیاز و لیاقت [6] مسئله ضربه با سرعت کم بر روی یک پانل ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی از جنس شیشه/اپوکسی و هسته لانه‌زنبوری از جنس آلومینیوم را مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی مسئله ضربه به دو روش تحلیلی و عددی مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج این دو روش با نتایج آزمون‌های تجربی مقایسه شده است. گرین استث و ریانی [7] چروکیدگی ساندویچ پانل‌های کامپوزیتی با رویه مواج و تحت بار فشاری را بصورت تجربی، عددی و تحلیلی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها رویه‌های مواج را بصورت سینوسی و نیم‌دایره بر روی رویه‌ها ایجاد کردند. آن‌ها بیان کردند که موج سینوسی به دلیل به وجود آمدن کمانش موضعی، مقاومت کمتری را نسبت به موج دایره‌ای دارد و در حالت کلی، ایجاد رویه‌های مواج، به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای مقاومت در برابر چروکیدگی را افزایش می‌دهند. گرین استث و ریانی [8] ساندویچ پانل‌هایی را مورد بررسی قرار دادند که یک رویه آن‌ها مسطح و رویه دیگر مواج بوده و هسته با استفاده از فوم PVC پر شده است. آن‌ها تئوری همگن‌سازی را برای این نوع پانل‌ها توسعه دادند و پروفیل‌های مختلف رویه‌های مواج را بررسی کردند. بریسکو و همکارانش [9] کمانش شبکه‌ها در ساندویچ پانل‌های با هسته مربعی و پرشده با فوم که بصورت برشی بارگذاری شده بودند، بررسی کردند. آن‌ها شبکه متصل شده به فوم را با اعمال فرضیاتی، به صفحه‌ای که بر روی بستر الاستیک قرار دارد و تحت شرایط مرزی تکیه‌گاه ساده است، در نظر گرفتند و این مدل تحلیلی را برای کل پانل بسط دادند. همچنین تحلیل المان محدود به‌منظور اعتبار سنجی مدل ارائه شده توسط آن‌ها انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد که این مدل ارائه شده می‌تواند مقاومت کمانشی را با خطای کمتر از 25 درصد پیش‌بینی کند. حلیمی و همکارانش [10] امکان ساخت قطعات ساندویچی با هسته‌ای از جنس فوم PVC و رویه‌هایی از جنس شیشه/اپوکسی را با استفاده از تکنیک انتقال رزین به کمک خلأ مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها برای بررسی و بهینه‌سازی ساخت سازه‌های ساندویچی با استفاده از روش متغیّرهای: استفاده از الیاف با نفوذپذیری بالا، ایجاد الگوهای مختلف تکرار سوراخ بر روی هسته و ایجاد انواع مختلف شیار بر سطح پایینی هسته فومی را مورد مطالعه قرار دادند. تأثیر سوراخ‌ها و شیارهای ایجاد شده در هسته بر نحوه جریان رزین، زمان تولید، وزن نهایی قطعه، خواص مکانیکی و استحکام چسبندگی رویه به هسته، بررسی شده است. کیوه و همکارانش [11] اثر شرایط مختلف تکیه‌گاهی را روی بار کمانش بحرانی و رفتار پس از کمانش ساختار ساندویچی که بصورت محوری تحت فشار قرار دارد، بررسی کردند. همچنین از روش گالرکین و روش المان محدود هم برای تحلیل استفاده کردند. جیاکریشان و همکارانش [12] رفتار کمانشی ساندویچ پانل‌های لانه‌زنبوری شش‌ضلعی را مطالعه کردند. هسته ساندویچ پانل‌ها از جنس آلومینیوم بوده و تحت شرایط تکیه‌گاه ساده و بصورت استاتیکی بارگذاری شده بودند. آن‌ها به ازای ضرایب لاغری مختلف، ضریب تصحیح را برای به دست آوردن بار کمانش بحرانی بهینه کردند و نتایج حاصل از آزمایش را با تحلیل عددی مقایسه کردند. بارتولازی و همکارانش [13] یک فرمول تحلیلی کلی برای توصیف یک پانل موج‌دار به مواد معادل ارائه کردند. روش ارائه شده قادر است هر نوع شکل موجی را برای صفحه و تیر مدل کند؛ در صورتی که در

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.4.14.6]

روش‌های قبلی شکل موج خاصی را تحلیل می‌کردند. همچنین با استفاده از این روش شکل موج‌های نامتقارن را نیز می‌توان بررسی کرد. برای اعتبار سنجی نتایج از داده‌های مقالات دیگر استفاده کردند و در مواردی که نوع شکل موج بررسی نشده بود، از تحلیل المان محدود استفاده کردند. یان و همکارانش [14] پانل‌های ساندویچی با هسته موج‌دار و پرشده با فوم آلومینیوم را که تحت بار فشاری و جهت خارج از صفحه به پانل وارد می‌شد را بررسی کردند و به تحلیل آن با استفاده از نرم‌افزار المان محدود پرداختند. آن‌ها بیان کردند که پانل‌های پرشده با فوم آلومینیوم استحکام و جذب انرژی بیشتری را نسبت به پانل‌های موج‌دار بدون فوم یا فقط پرشده با فوم آلومینیوم، دارند. همچنین فوم، سازه‌ها را در مقابل جابه‌جایی تقویت می‌کند و سبب تأخیر در تغییر شکل محوری به تغییر شکل خمشی می‌گردد. رحمانی و رحیمی [15] رفتار خمشی ساختارهای ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی و هسته ترکیبی شامل فوم و یک چندلایه کامپوزیتی موج‌دار را تحت بارگذاری خمشی سه نقطه‌ای بررسی کردند. آن‌ها اثر پارامترهای ضخامت، گام و شکل هندسی چندلایه کامپوزیتی را بر روی ویژگی‌های خمشی از قبیل سفتی خمشی و نسبت سفتی خمشی به جرم بررسی کردند. همچنین با شبیه‌سازی نمونه‌ها در نرم‌افزار المان و مقایسه با نتایج تجربی، بیان کردند که شبیه‌سازی المان محدود قادر است به خوبی رفتار این سازه‌ها را تحت بارگذاری خمشی پیش‌بینی کند. ژانگ و همکارانش [16] استحکام، سفتی و جذب انرژی ساختارهای ساندویچی کامپوزیتی و موج‌دار را بررسی کردند. آن‌ها اثر ضخامت هسته و رویه و زاویه موج را مطالعه کردند. آن‌ها بیان کردند که افزایش زاویه موج و ضخامت هسته استحکام خمشی را بهبود می‌بخشد ولی افزایش طول قسمت اتصال یافته استحکام را کاهش می‌دهد.

در این تحقیق، با ساخت ساندویچ پانل‌هایی متشکل از هسته فومی و چندلایه کامپوزیتی موج‌دار و رویه کامپوزیتی، رفتار این نوع سازه‌ها در مقابل بارگذاری فشاری بررسی می‌شود. در واقع با ایجاد هسته موج‌دار و کامپوزیتی به سه شکل مربعی، ذوزنقه‌ای و مثلثی، اثر چندلایه کامپوزیتی موج‌دار و شکل موج هندسی آن بر روی خواص سازه نظیر استحکام فشاری، استحکام فشاری به جرم، سفتی محوری، سفتی محوری به جرم، چقرمگی و کرنش شکست؛ نسبت به حالتی که هسته این سازه‌ها فقط از فوم باشد، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

2- مواد اولیه، ابعاد نمونه‌ها و روش ساخت

2-1- مواد اولیه

مواد مورد استفاده برای ساخت رویه کامپوزیتی و چندلایه کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته شامل پارچه بافته‌شده شیشه ساخت شرکت کلان[1] استرالیا با کد AF251؛ رزین اپوکسی ساخت شرکت کاماتینی[2] با کد EC130Lv و هاردنر با کد W340 استفاده شده است. نسبت ترکیب رزین به هاردنر 100 به 30 است. همچنین مدت زمان مورد نیاز برای ژل شدن و کمترین زمان مورد نیاز برای پخت نمونه به ترتیب سه ساعت و پانزده ساعت، در دمای اتاق، می‌باشد. فوم استفاده شده در هسته از نوع PVC، ساخت شرکت سیکامین[3] فرانسه، با کد C70.75 و ضخامت 15 mm می‌باشد.

2-2- ابعاد نمونه‌ها

ابعاد نمونه‌ها با توجه به معیار استاندارد مربوط به تعیین خواص فشاری ساختارهای ساندویچی، ASTM-C364، انتخاب شده است. این معیار بصورت خلاصه در رابطه (1) بیان شده است:

$$w \geq 50\ \text{mm}, \quad w \geq 2 \times d, \quad L_e \leq 8 \times d, \quad L_s \geq 6\ \text{mm} \qquad (1)$$

مطابق شکل 1، w عرض نمونه، L_e طول مؤثر نمونه (طول قسمتی از نمونه که داخل تکیه‌گاه قرار ندارد)، L_s طول قسمتی از نمونه که داخل تکیه‌گاه قرار دارد و با رزین تقویت شده است، λ طول موج چندلایه کامپوزیتی موج‌دار و d ضخامت کل نمونه می‌باشد. برای ساخت رویه‌ها و چندلایه کامپوزیتی موج‌دار از سه لایه پارچه شیشه استفاده شده و طول موج چندلایه موج‌دار 2 cm در نظر گرفته شده است. با توجه به این‌که ضخامت فوم استفاده شده 15 mm و ضخامت چندلایه کامپوزیتی 1 mm می‌باشد، ابعاد مطابق با رابطه (2)، به‌منظور برقراری شرایط استاندارد برای نمونه‌ها در نظر گرفته شده‌اند:

$$w = 60\ \text{mm}, \quad L_e = 140\ \text{mm}, \quad L_s = 20\ \text{mm} \qquad (2)$$

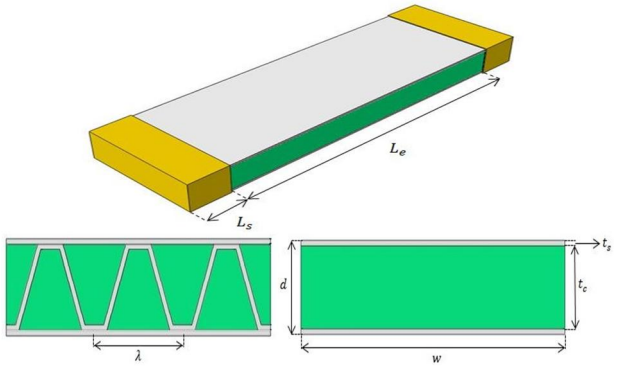
2-3- روش ساخت

ساخت نمونه‌ها شامل دو مرحله است: در مرحله اول، هسته که شامل چندلایه کامپوزیتی موج‌دار و فوم است، ساخته می‌شود و در مرحله دوم رویه به هسته متصل می‌شود.

به‌منظور تکرار و اطمینان از نتایج آزمایش‌ها، برای هر شکل موج هسته، سه نمونه ساخته شده است. نام‌گذاری نمونه‌ها بدین گونه‌است که حرف اول بیانگر نوع بارگذاری؛ عدد دوم، نوع شکل موج هسته و عدد سوم، شماره نمونه از سه نمونه ساخته شده می‌باشد. شماره مربوط به نوع هسته‌ها و کد نمونه‌های ساخته شده در جدول 1 بیان شده است.

2-3-1- ساخت هسته

با مشخص شدن ابعاد و هندسه نمونه‌ها بر اساس استاندارد، ابتدا فوم PVC با توجه به زاویه هر شکل موج به‌وسیله اره مدرج برش داده می‌شود (زاویه صفحه مدرج اره، برای شکل موج مربعی، ذوزنقه‌ای و مثلثی به ترتیب 0°، 18/43° و 33/69° می‌باشد). سپس فوم‌های برش داده شده را به



شکل 1 شماتیک نمونه، مقطع نمونه با هسته ساده و مقطع نمونه با هسته موج‌دار

جدول 1 شماره مربوط به شکل موج هسته و کد نمونه‌های ساخته شده

نوع هسته	عدد مربوط به شکل موج	کد نمونه‌های ساخته شده
هسته ساده	1	c01,c02,c03
هسته مربعی	2	c11,c12,c13
هسته ذوزنقه‌ای	3	c21,c22,c23
هسته مثلثی	4	c31,c32,c33

1- COLAN
2- Commatini
3- SICOMIN

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.4.14.6]

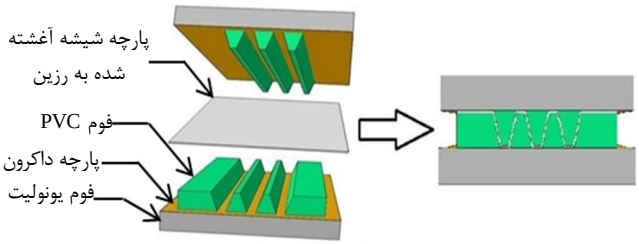
صورت قالب‌های نرگی و مادگی تهیه کرده و پارچه آغشته شده به رزین در قالب تعبیه شده و بعد از آن قالب نهایی در دستگاه پرس سرد قرار داده می‌شود. شماتیک نحوه ساخت هسته موج‌دار در شکل 2 نشان داده شده است.

2-3-2- اتصال رویه و هسته

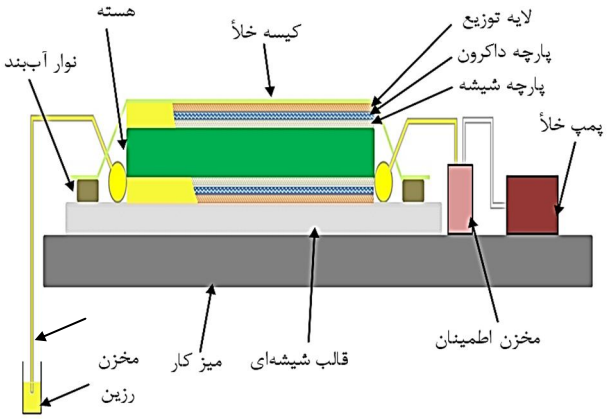
بعد از خارج کردن هسته از دستگاه پرس سرد، برای اتصال رویه‌ها به هسته، به‌منظور ایجاد نمونه‌هایی با کیفیت بهتر و یکنواخت‌تر، از روش نوین انتقال رزین به کمک خلأ[1] استفاده شده است. در این فرآیند، پس از قرار دادن هسته در محفظه و ایجاد خلاء نسبی در آن، رزین از داخل لوله تغذیه وارد قالب می‌شود، به‌طوری‌که تمام محفظه به‌طور یکنواخت از رزین پر می‌شود. شماتیک این فرآیند در شکل 3 نشان داده شده است.

پس از ساخت نهایی نمونه‌ها، به منظور جلوگیری از ایجاد مودهای خرابی در محل اعمال نیرو (شکل 4) این نقاط به وسیله رزین تقویت می‌شوند.

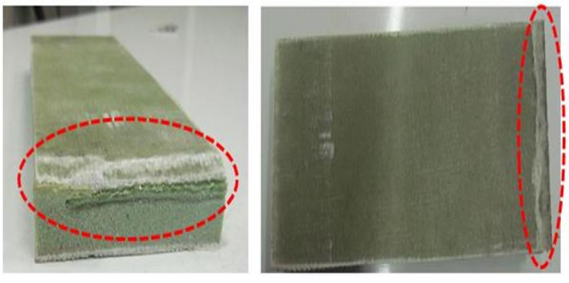
همچنین به‌منظور این‌که ضخامت قسمت تقویت شده، از سطح قطعه برای تمامی لبه‌ها باید به یک اندازه باشد (به دلیل حساسیت ویژه‌ای که بارگذاری فشاری نسبت به هم‌راستا بودن تکیه‌گاه‌ها دارد)، با استفاده از



شکل 2 شماتیکی از نحوه تولید هسته موج‌دار



شکل 3 شماتیک فرآیند انتقال رزین به کمک خلأ



شکل 4 نمونه‌هایی از خرابی در تکیه‌گاه

دستگاه فرز این همراستایی تنظیم شده است. نمونه‌های نهایی برای آزمون، در شکل 5 نشان داده شده است.

3- انجام آزمایش‌ها

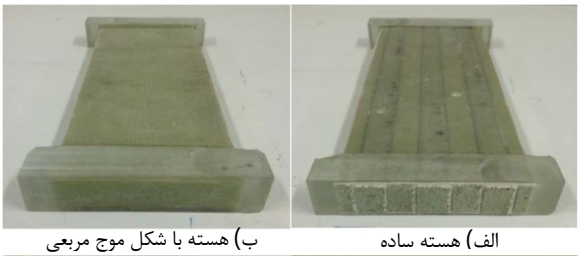
آزمون فشار لبه‌ای بر روی نمونه‌ها بر طبق استاندارد ASTM-C364 و با استفاده از دستگاه هیدرولیکی سنتام[2] انجام گرفته است. میزان جابجایی محل اعمال نیرو توسط دستگاه ثبت می‌شود و میزان نیرو نیز از طریق نیروسنج متصل به دستگاه به ازای هر میزان جابجایی در محل اعمال نیرو ذخیره می‌گردد و در نهایت نتایج آزمایش بصورت نمودارهای نیرو-جابه‌جایی در خروجی نمایش داده می‌شود. بر اساس استاندارد، سرعت عمودی جابه‌جایی فک دستگاه، برای انجام این آزمون 0/5 mm/min و فاصله بین دو فک برابر طول نمونه و برابر 18 cm است. در شکل 6 دستگاه آزمون و نمونه قرار داده شده در دستگاه را نشان می‌دهد.

4- نتایج

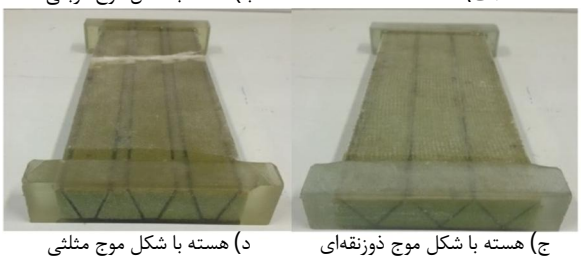
به‌منظور بررسی اثر هسته کامپوزیتی موج‌دار و شکل موج آن بر روی خواصی نظیر استحکام فشاری، استحکام فشاری به جرم، سفتی محوری و چقرمگی؛ هسته ساده که فقط متشکل از فوم PVC می‌باشد، بعنوان نمونه مرجع در نظر گرفته شده و سایر شکل موج‌ها نسبت به آن بررسی می‌شوند. هم‌چنین از مقادیر میانگین، برای مقایسه نتایج استفاده شده است.

در شکل 7 نمودارهای تنش-کرنش بارگذاری فشاری را برای شکل موج‌های مختلف هسته نشان می‌دهد.

بررسی نمودارها نشان می‌دهد که رفتار سازه‌های بررسی شده در این

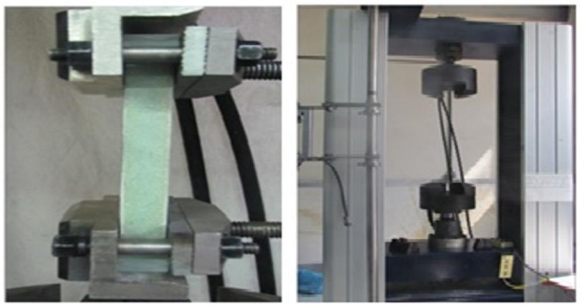


الف) هسته ساده ب) هسته با شکل موج مربعی



ج) هسته با شکل موج ذوزنقه‌ای د) هسته با شکل موج مثلثی

شکل 5 نمونه‌های نهایی با هسته ساده و هسته موج‌دار



شکل 6 دستگاه آزمون و نمونه قرار داده شده در دستگاه

1- Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM)

2- Santam

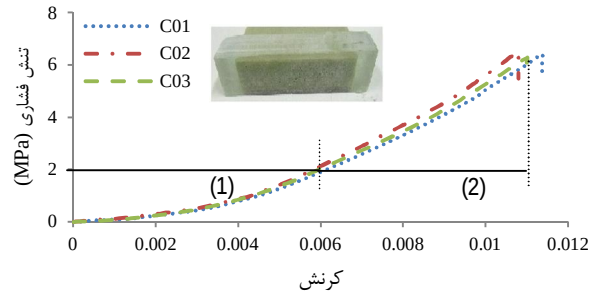
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.4.14.6]

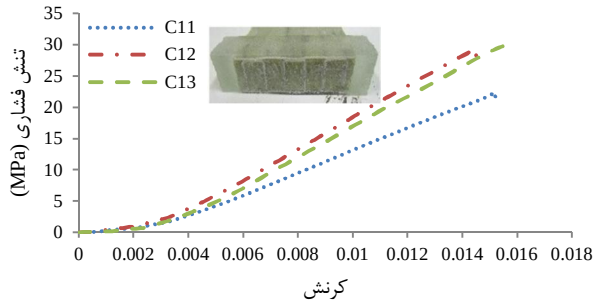
مقاله، تحت بارگذاری فشاری به دو ناحیه مجزا تقسیم‌بندی می‌گردد (شکل 7-الف): در ناحیه اول، به‌دلیل وجود نواقص ساختاری، منحنی تنش-کرنش با شیب غیرثابتی افزایش می‌یابد؛ در واقع سازه یک رفتار غیر خطی را از خود نشان می‌دهد. در ناحیه دوم، منحنی تنش-کرنش با شیب ثابتی افزایش یافته و سازه رفتاری الاستیک را از خود نشان می‌دهد و تا نقطه شکست ادامه دارد.

4-1- جرم نمونه‌ها

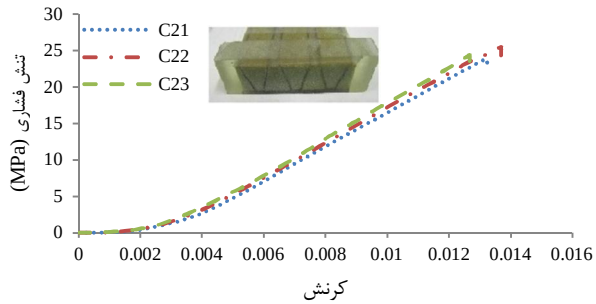
افزایش جرم نمونه‌ها در اثر استفاده از چندلایه کامپوزیتی موج‌دار در



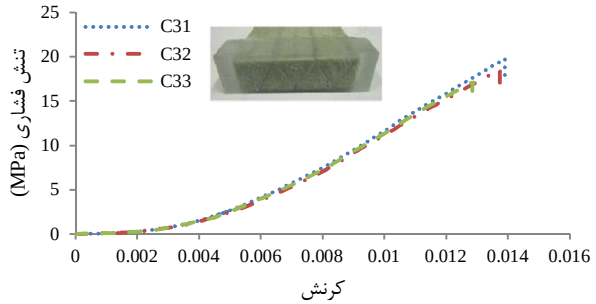
الف) هسته ساده (نمونه مرجع)



ب)هسته با شکل موج مربعی



ج) هسته با شکل موج ذوزنقه



د) هسته با شکل موج مثلثی

شکل 7 نمودار تنش-کرنش برای شکل موج‌های مختلف هسته

جدول 2 بیان شده است. اندازه‌گیری این پارامتر به منظور محاسبه نسبت استحکام به جرم و سفتی محوری به جرم نمونه‌ها مورد نیاز است.

نتایج نشان می‌دهد که با تغییر شکل هندسی چندلایه کامپوزیتی موج‌دار، به ترتیب از هسته مثلثی به هسته ذوزنقه‌ای و از هسته ذوزنقه‌ای به هسته مربعی افزایش جرم بیشتری مشاهده می‌شود، که این امر به دلیل افزایش مقدار کامپوزیت به کار رفته در هسته می‌باشد. در نهایت بیشترین افزایش جرم مربوط به نمونه با هسته مربعی با مقدار % 91/53 و کمترین افزایش جرم مربوط به نمونه با هسته مثلثی با مقدار % 50 می‌باشد.

4-2- استحکام فشاری و استحکام فشاری به جرم

استحکام و استحکام به وزن بالای سازه‌های ساندویچی از مهم‌ترین ویژگی‌های این نوع سازه هاست که در صنایعی نظیر هوافضا از اهمیت بسیار زیادی برخوردار می‌باشد. در جدول 3 مقادیر استحکام فشاری و استحکام فشاری به جرم برای انواع مختلف شکل موج هسته بیان شده‌است. با توجه به شکل 8-الف، بیشترین افزایش در استحکام فشاری، مربوط به هسته با شکل موج مربعی به میزان %362/37 بوده و این بدین معنی است که در این حالت استحکام فشاری نسبت به حالت مرجع بیش از 4/6 برابر شده است. همچنین کمترین افزایش در استحکام فشاری مربوط به هسته با شکل موج مثلثی به میزان %188/56 بوده و این به این معنی است که در این حالت استحکام فشاری نسبت به حالت مرجع بیش از 2/8 برابر شده است.

همچنین با توجه به شکل 8-ب، بیشترین افزایش در نسبت استحکام فشاری به جرم مربوط به هسته با شکل موج مربعی است که به میزان %141/40 می‌باشد و این بدین معنی است که در این حالت نسبت استحکام فشاری به جرم نسبت به حالت مرجع بیش از 2/4 برابر شده است. همچنین کمترین افزایش در نسبت استحکام فشاری به جرم نیز مربوط به حالت هسته با شکل موج مثلثی بوده که به میزان %92/36 می‌باشد و این بدین معنی است که نسبت استحکام فشاری به جرم در این حالت نسبت به حالت مرجع بیش از 1/9 برابر شده است.

4-3- سفتی محوری و سفتی محوری به جرم

سفتی محوری، بیانگر مقاومت سازه به تغییر شکل، در مقابل بار اعمالی می‌باشد. در واقع هر چه میزان این پارامتر بیشتر باشد تغییر شکل سازه هنگامی که تحت بارگذاری قرار می‌گیرد، کمتر است. سفتی محوری با استفاده از شیب قسمت خطی نمودار نیرو-جابه‌جایی محاسبه می‌شود.

جدول 2 نتایج مربوط به اندازه‌گیری جرم نمونه‌های ساخته شده

شکل موج هسته	جرم میانگین (gr)	افزایش جرم نسبت به نمونه مرجع (%)
نمونه مرجع	37/33	0
هسته مربعی	71/5	91/53
هسته ذوزنقه‌ای	70/33	88/40
هسته مثلثی	56	50

جدول 3 استحکام فشاری و استحکام فشاری به جرم

شکل موج هسته	استحکام فشاری (MPa)	استحکام فشاری به جرم (MPa/gr)
هسته ساده	6/3991	0/1714
هسته مربعی	29/586	0/4138
هسته ذوزنقه‌ای	24/578	0/3495
هسته مثلثی	18/468	0/3297

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.4.14.6]

مقادیر مربوط به سفتی محوری و سفتی محوری به جرم در جدول 4 ارائه شده است. براساس شکل 9-الف، افزایش سفتی محوری نسبت به حالت مرجع برای هسته مثلثی، ذوزنقه‌ای و مربعی به ترتیب به میزان 175/09%، 200/36% و 210/56% می‌باشد. بنابراین سفتی محوری از هسته مثلثی به هسته ذوزنقه‌ای و از هسته ذوزنقه‌ای به هسته مربعی افزایش می‌یابد. همچنین سفتی محوری هسته ذوزنقه‌ای و هسته مربعی بسیار به هم نزدیک می‌باشند (حدود 3/5% اختلاف دارند).

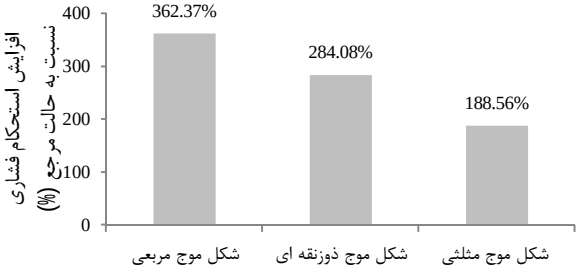
سفتی محوری به جرم سازه‌ها از هسته ذوزنقه‌ای به هسته مربعی و از هسته مربعی به هسته مثلثی افزایش می‌یابد (شکل 9-ب)؛ در واقع کمتر بودن جرم هسته مثلثی نسبت به هسته مربعی و ذوزنقه‌ای، سبب شده است در این نوع شکل موج، نسبت سفتی محوری به جرم افزایش بیشتری داشته باشد.

4-4- کرنش شکست

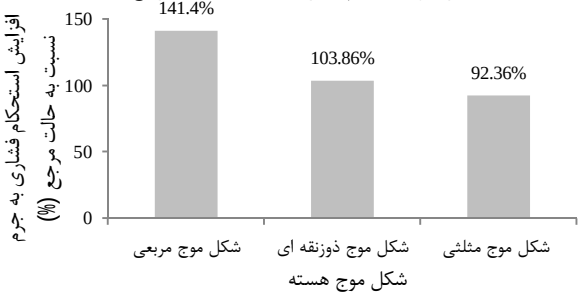
با توجه به شکل 10، هسته مربعی با 1/501% تغییر شکل و هسته مثلثی با 1/318% تغییر شکل، به ترتیب بیشترین و کمترین تغییر شکل را تا زمان را تا زمان شکست سازه دارند. همچنین کرنش شکست از هسته مثلثی به هسته ذوزنقه‌ای و از هسته ذوزنقه‌ای به هسته مربعی افزایش یافته است.

4-5- چقرمگی

با محاسبه سطح زیر منحنی تنش-کرنش یا به عبارتی دیگر چقرمگی ماده،می‌توان تأثیر استحکام فشاری، سفتی محوری و کرنش شکست را به‌طور



الف) افزایش استحکام فشاری نسبت به حالت مرجع



ب) افزایش استحکام فشاری به جرم نسبت به حالت مرجع

شکل 8 افزایش استخکام فشاری و استحکام فشاری به جرم نسبت به حالت مرجع

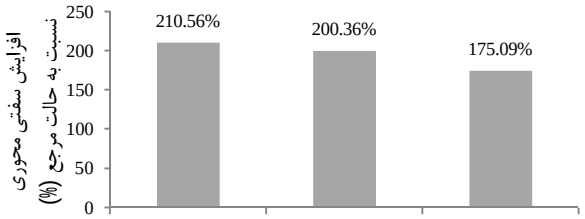
جدول 4 سفتی محوری و سفتی محوری به جرم

شکل موج هسته	سفتی محوری (kN/mm)	سفتی محوری به جرم (kN/(mm*gr))
هسته ساده	4/2726	0/1145
هسته مربعی	13/269	0/1856
هسته ذوزنقه‌ای	12/833	0/1825
هسته مثلثی	11/754	0/2099

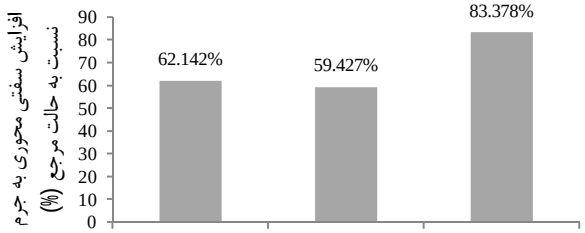
همزمان بر روی رفتار سازه مشاهده نمود. با توجه به شکل 11 هسته مربعی با مقدار 660/5% و هسته مثلثی با مقدار 269/13% به ترتیب، بیشترین و کمترین افزایش را در چقرمگی نسبت به حالت مرجع داشته‌اند.

5- نتیجه‌گیری

در این مقاله، خواص مکانیکی سازه‌های ساندویچی از قبیل استحکام فشاری، استحکام فشاری به جرم، سفتی محوری، سفتی محوری به جرم، چقرمگی و کرنش شکست؛ تحت بارگذاری فشاری محوری مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور یک چندلایه کامپوزیتی موج‌دار با اشکال هندسی مختلف (مربعی،

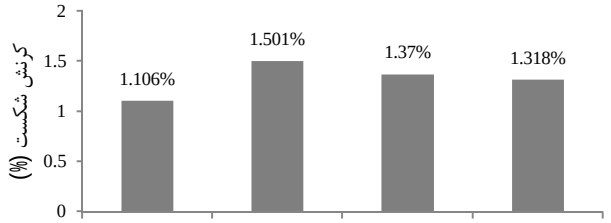


الف) افزایش سفتی محوری نسبت به حالت مرجع

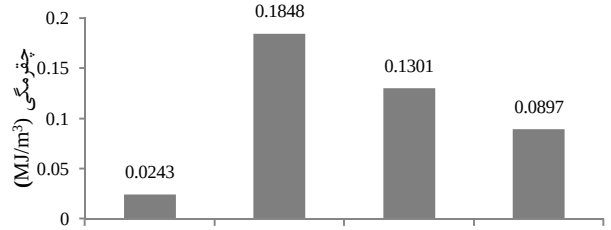


ب) افزایش سفتی محوری به جرم نسبت به حالت مرجع

شکل 9 افزایش سفتی محوری و سفتی محوری به جرم نسبت به حالت مرجع



شکل 10 کرنش شکست برای شکل موج‌های مختلف هسته



شکل 11 چقرمگی برای شکل موج‌های مختلف هسته

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.4.14.6]

ذوزنقه و مثلثی) در داخل هسته فومی تعبیه و خواص فشاری قطعه تولید شده با قطعه‌ای با هسته ساده فومی مقایسه شد.

بررسی نتایج نشان دادند که این سازه‌ها در طی مراحل بارگذاری دو نوع رفتار متفاوت را از خود نشان می دهند به طوری که در مراحل اولیه بارگذاری رابطه تنش و کرنش به صورت غیر خطی و پس از آن تنش به صورت خطی با کرنش افزایش می‌یابد.

در مجموع استفاده از چندلایه کامپوزیتی موج‌دار در داخل هسته خواص سازه را تا حد زیادی بهبود می‌بخشد. هسته با شکل موج مربعی، بیشترین افزایش را در خواص مکانیکی (به غیر از سفتی محوری به جرم) موجب می‌شود. در این حالت استحکام فشاری 362/37%، استحکام فشاری به جرم 141/4%، سفتی محوری 210/56%، کرنش شکست 35/71% و چقرمگی 660/5% نسبت به حالت مرجع افزایش یافته است. همچنین هسته با شکل موج مثلثی، کمترین افزایش را در خواص مکانیکی داشته است. در این حالت استحکام فشاری 188/56%، استحکام فشاری به جرم 92/36%، سفتی محوری 175/09%، کرنش شکست 19/16% و چقرمگی 269/13% نسبت به حالت مرجع افزایش یافته است. بنابراین با تغییر شکل موج هندسی از هسته مثلی به هسته ذوزنقه‌ای و از هسته ذوزنقه‌ای به هسته مربعی خواص مکانیکی سازه افزایش می‌یابد، به عبارت دیگر هر چه شکل موج هسته به شکل موج مربعی نزدیک‌تر می‌شود، خواص مذکور دارای مقادیر بیشتری می‌باشند و با فاصله گرفتن از شکل موج مربعی و زاویه دار شدن هسته، خواص سازه کاهش خواهد یافت.

نسبت سفتی محوری به جرم، به دلیل کمتر بودن جرم هسته مثلثی نسبت به هسته مربعی و ذوزنقه‌ای، از هسته ذوزنقه‌ای به هسته مربعی و از هسته مربعی به هسته مثلثی افزایش می‌یابد.

با تغییر شکل موج از یک هندسه به هندسه دیگر، مقادیر استحکام فشاری و چقرمگی نسبت به مقادیر سفتی محوری و کرنش شکست، بیشتر تغییر می‌کنند. در واقع استحکام فشاری و چقرمگی نسبت به تغییر شکل موج هسته، حساسیت بیشتری نسبت به سفتی محوری و کرنش شکست دارند.

6- مراجع

[1] K. Rao, Shear buckling of corrugated composite panels, *Composite structures,* Vol. 8, No. 3, pp. 207-220, 1987.

[2] M. Heder, Buckling of sandwich panels with different boundary conditions—a comparison between FE-analysis and analytical solutions, *Composite structures,* Vol. 19, No. 4, pp. 313-332, 1991.

[3] W. L. Ko, R. H. Jackson, Compressive and shear buckling analysis of metal matrix composite sandwich panels under different thermal environments, *Composite Structures,* Vol. 25, No. 1, pp. 227-239, 1993.

[4] N. Buannic, P. Cartraud, T. Quesnel, Homogenization of corrugated core sandwich panels, *Composite Structures,* Vol. 59, No. 3, pp. 299-312, 2003.

[5] Y. Tian, T. Lu, Optimal design of compression corrugated panels, Thin-walled structures, Vol ,٤٣ .No. 3, pp. 477-498, 2005.

[6] A. Niaz, G.H. Liaghat, *Experimental investigation of low speed impact on sandwich panel with honeycomb core, and comparation with finite element resulet,* M.Sc thesis, Department of Mechanical engineering , Tarbiat Modares University, Tehran, 2008. (In Persian)

[7] J. L. Grenestedt, J. Reany, Wrinkling of corrugated skin sandwich panels, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing,* Vol. 38, No. 2, pp. 576-589, 2007.

[8] J. Reany, J. L. Grenestedt, Corrugated skin in a foam core sandwich panel, *Composite Structures,* Vol. 89, No. 3, pp. 345-355, 2009.

[9] C. R. Briscoe, S. C. Mantell, J. H. Davidson, Shear buckling in foam-filled web core sandwich panels using a Pasternak foundation model, *Thin-Walled Structures,* Vol. 48, No. 6, pp. 460-468, 2010.

[10] F. Halimi, M. Golzar, M.H. Beheshti, *Effect of distribution media on mold filling and quality of the final part in a vacuum assisted resin transfer molding,* M.Sc thesis, Department of Mechanical engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, 2011. (In Persian)

[11] C. Kueh, N. Navaranjan, M. Duke, The effect of in-plane boundary conditions on the post-buckling behaviour of rectangular corrugated paperboard panels, *Computers & Structures,* Vol. 104, pp. 55-62, 2012 .

[12] P. Jeyakrishnan, K. K. Chockalingam, R. Narayanasamy, Studies on buckling behavior of honeycomb sandwich panel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* Vol. 65, No ,٨-٥ .pp. 803-815, 2013.

[13] G. Bartolozzi, N. Baldanzini, M. Pierini, Equivalent properties for corrugated cores of sandwich structures: A general analytical method, *Composite Structures,* Vol. 108, pp. 736-746, 2014.

[14] L. Yan, B. Yu, B. Han, C. Chen ,Q. Zhang, T. Lu, Compressive strength and energy absorption of sandwich panels with aluminum foam-filled corrugated cores, *Composites Science and Technology,* Vol. 86, pp. 142-148, 2013.

[15] R. Rahmani, G.H. Rahimi, *Flexural behavior investigation of sandwich structures with composite skins and corrugated composite and foam core,* M. Sc thesis, Department of Mechanical engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, 2012. (In Persian)

[16] J. Zhang, P. Supernak, S. Mueller-Alander, C. H. Wang, Improving the bending strength and energy absorption of corrugated sandwich composite structure, *Materials & Design,* Vol. 52, pp. 767-773, 2013.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.4.14.6]